

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

.....  
LOGÍSTICA DEL FUTURO : HYPERLOOP  
.....

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico ...~~2018-2019~~ es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es  
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada

de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.:



Fecha: 23 / 08 / 2019

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.:



Fecha: 23 / 08 / 2019



## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

### **1°. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.**

El autor D. CATALINA AUGUSTIN ACEDO-RICO

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

LOGÍSTICA DEL FUTURO: HYPERLOOP,

que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### **2°. Objeto y fines de la cesión.**

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

### **3°. Condiciones de la cesión y acceso**

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL persistente).

### **4°. Derechos del autor.**

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

### **5°. Deberes del autor.**

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 23 de Septiembre de 2019

**ACEPTA**

Fdo.  .....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

# LOGÍSTICA DEL FUTURO: HYPERLOOP

Autor: Augustin Acedo-Rico, Catalina.

Directora: García Carasusan, Brígida.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## RESUMEN DEL PROYECTO

El presente documento es una breve descripción del Trabajo de Fin de Máster realizado por Catalina Augustin Acedo-Rico, alumna de la Universidad Pontificia de Comillas (I.C.A.I.) y dirigido por Brígida García Carasusan ingeniero industrial por la Universidad de Málaga.

**Palabras clave:** Hyperloop, levitación magnética, motor lineal, energía fotovoltaica.

### I. INTRODUCCIÓN

El incremento del tráfico provoca pérdidas económicas en la productividad, accidentes y contaminación atmosférica. El alto nivel de congestión de las carreteras es un factor que afecta a la salud pública.

Según el informe *Road Tech* publicado por Abertis en colaboración con la Unidad de Inteligencia Economista (EIU, por sus siglas en inglés) se espera que el número de vehículos se cuadruplique para 2050 llegando a los 4 mil millones. Actualmente el 54% de la población vive en grandes ciudades siendo el transporte urbano privado responsable del 22% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Si se cumplen las expectativas, para 2050, estos valores podrían aumentar hasta llegar al 66% de la población viviendo en las ciudades y siendo el transporte privado el responsable del 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub> [1]. La Figura 1 muestra el

porcentaje que supone cada tipo de vehículo respecto al global del transporte en la UE.

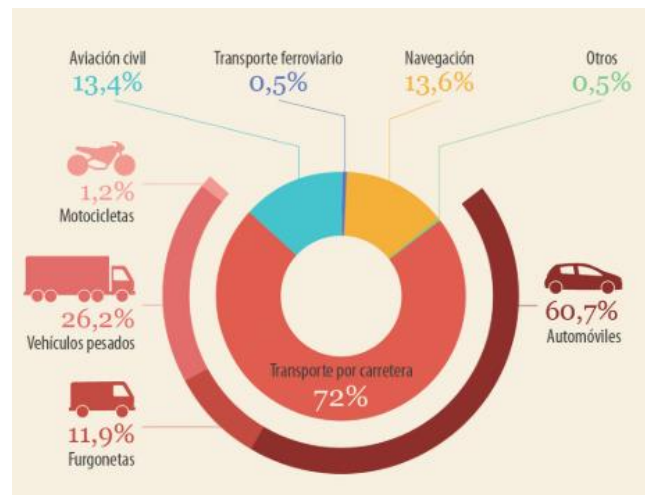


Figura 1. Emisiones de CO<sub>2</sub> originadas por el transporte en la UE en 2016. Fuente: AEMA.

El 80% de la población está expuesta a niveles de contaminación superiores a los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés). Esto ha causado sólo en la UE 450.000 muertes prematuras en 2013 debidas principalmente a ataques al corazón y enfermedades respiratorias. Incurriendo en un costo para las economías de la región de 1,4 mil millones de dólares anuales.

Dado que el transporte es uno de los principales causantes de la contaminación en la actualidad la búsqueda de métodos de transporte alternativos a los vehículos propulsados con combustibles fósiles es uno de los temas en que más se está invirtiendo en los últimos años.

Los OEM's<sup>1</sup> se esfuerzan en diseñar y comercializar modelos de vehículo híbrido y eléctrico además de considerar la sustitución total de los vehículos de combustión de su portfolio en los próximos años. Sin embargo, aunque se está investigando la manera de hacer frente al llamado *range anxiety*<sup>2</sup> la realidad es que las baterías continúan ofreciendo una capacidad limitada. Por ello, los vehículos eléctricos están teniendo éxito para su uso en entornos urbanos mediante su implementación en nuevos modelos de negocio de *carsharing* (Car2Go, Zity, Emov...) *motosharing* y *scootersharing* (eCooltra, Flash, Lime...).

Hyperloop se plantea como una alternativa para el transporte de mercancías y personas en los trayectos de distancia media/larga realizados actualmente por aviones, coches, trenes y barcos. Consiste en tubos en condiciones de baja presión que permiten la circulación de cápsulas que levitan a una velocidad de hasta 1.000 km/h.

## II. METODOLOGÍA

El alcance del proyecto contempla el estado del arte de la tecnología y el análisis de los sectores que puede Hyperloop revolucionar, entre ellos, el transporte de personas y el transporte de mercancías.

Adicionalmente se recaba información sobre las principales empresas que están desarrollando la tecnología, así como las oportunidades y retos para los distintos sectores que conforman el ecosistema de Hyperloop. Por último, se realiza una propuesta para llevar a cabo la alimentación del sistema mediante la utilización de energía fotovoltaica.

Para conseguir alcanzar dichos objetivos se han utilizado las siguientes plataformas:

1. Información de empresas: CBInsights y Tracxn.
2. Búsqueda y análisis de propiedad intelectual: Espacenet y Derwent.

3. Información diseño planta fotovoltaica: PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*).

## III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto se dividen en diferentes secciones.

### A. Estado del arte

El concepto de Hyperloop surge por primera vez en el documento Hyperloop Alpha publicado por la empresa SpaceX en 2013 [2]. Sin embargo, no es la primera vez que se considera un sistema similar. En 1910, Robert Goddard, ingeniero estadounidense considerado uno de los creadores del primer cohete, ya había planteado un sistema cuyo fundamento se basaba en el vacío de los tubos y la levitación magnética.

Elon Musk, físico y empresario fundador de las empresas Tesla y Space X ha sido uno de los principales precursores de Hyperloop en los últimos años. Junto a su empresa SpaceX descartan la viabilidad técnica y económica de generar un vacío absoluto en un sistema como el mencionado y plantea la utilización de tubos a baja presión en lugar de al vacío, bautizando el concepto como Hyperloop.

Para fomentar y acelerar el proceso de diseño e implantación de Hyperloop, la empresa SpaceX anunció el 15 de junio de 2015 el patrocinio de una competición llamada *SpaceX Hyperloop POD Competition*, de ahora en adelante SXHPC, en la cual invitaban a grupos universitarios y no universitarios a nivel mundial a proponer diseños para las cápsulas de este sistema. A raíz de las sucesivas ediciones de la SXHPC surgen la mayoría de las empresas que actualmente se encuentran desarrollando la tecnología.

Hyperloop puede considerarse un híbrido entre tren y avión. Circula a nivel de corteza terrestre, como un tren, pero a velocidad similar a la del avión. Es decir, gracias a la levitación magnética y

<sup>1</sup> Original Equipment Manufacturer.

<sup>2</sup> Expresión utilizada para hacer referencia a la preocupación por la autonomía de los vehículos eléctricos.

a las condiciones de baja presión de los tubos, pretende convertirse en el método de transporte terrestre más veloz. La Figura 2 muestra una comparativa de distintos modelos de tren de alta velocidad con sus respectivas velocidades medias y máximas.

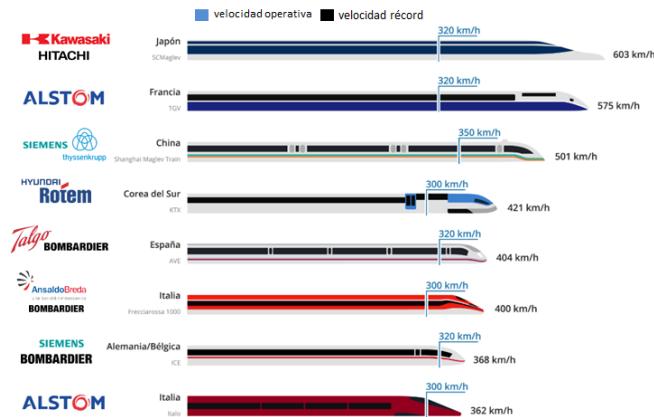


Figura 2. Comparativa trenes de alta velocidad. Fuente: GoEuro.

Actualmente el tren japonés Maglev ostenta el record de velocidad (603 km/h). Hyperloop se plantea como una versión mejorada de este tipo de tren. Al circular dentro de tubos en condiciones de baja presión permitiría no solo alcanzar velocidades superiores si no también hacerlo de una manera más eficiente.

### B. Tecnología de Hyperloop

[3] La tecnología de Hyperloop se compone de varios sistemas que permiten la levitación y el movimiento de las cápsulas, también conocidas como vainas, vagones o pods, de manera autónoma dentro de los tubos de vacío. A continuación se resume la tecnología detrás de cada uno de estos sistemas.

De manera genérica existen dos alternativas para conseguir **levitación**: (i) mediante la utilización de aire y (ii) levitación basada en el principio de magnetismo. La siguiente figura muestra un resumen de las alternativas que se van a explicar a continuación.

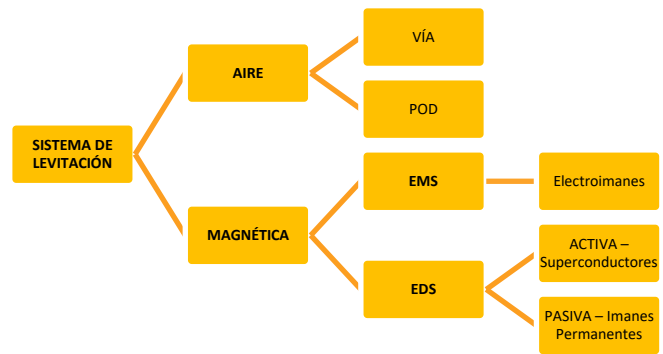


Figura 3. Resumen sistema de levitación. Fuente: Elaboración propia.

La utilización de aire comprimido para la levitación de las cápsulas fue propuesta conceptualmente por Elon Musk y su empresa SpaceX en el documento Hyperloop Alpha. Sin embargo, ha terminado descartándose debido a que el almacenamiento de aire comprimido en las cápsulas podría comprometer la seguridad de los pasajeros, limitaría el alcance de las vainas y a que carece de sentido inyectar aire en un sistema que se basa en tubos en condiciones de vacío.

La levitación magnética se consigue mediante la interacción de campos magnéticos que dan lugar a fuerzas de atracción o de repulsión en función del sistema que se utilice: (i) suspensión electromagnética conocida como EMS, por sus siglas en inglés o (ii) suspensión electrodinámica también conocida como EDS. La principal diferencia entre un sistema EMS y un EDS es que, en el primero, la levitación del tren es producida por la atracción entre los electroimanes colocados en el vehículo y la vía, mientras que en el segundo la levitación se consigue gracias a las fuerzas de repulsión generadas entre los imanes permanentes o superconductores del vagón y la vía.

La principal ventaja de los sistemas de levitación activa (electroimanes, y superconductores) es la capacidad de levitar las vainas incluso en parado. La principal desventaja es la dependencia energética. Por su parte, para la levitación con imanes permanentes es necesaria la existencia de una velocidad relativa inicial con respecto a las vías

y la instalación de ruedas para soportar el movimiento en las velocidades inferiores a la velocidad de despegue, así como un escudo magnético para la protección de los pasajeros frente al campo magnético generado por los imanes.

La elección del tipo de sistema de levitación magnética a utilizar (electroimanes, superconductor o imanes permanentes) así como la cantidad y su disposición en la vaina y vía forman parte de los parámetros de diseño de las distintas empresas desarrolladoras o equipos que se presentan anualmente a la SXHPC. Estos parámetros se obtienen mediante el planteamiento de ecuaciones de magnetismo y se resuelven utilizando softwares matemáticos y de diseño que permiten calcular y comprobar las hipótesis en un proceso iterativo.

El **sistema de estabilización** está muy ligado al de levitación pues se utilizan los mismos principios. La Figura 4 muestra los tipos de movimiento que pueden experimentar las cápsulas conocidos como cabeceo, alabeo y guiñada (del inglés pitch, roll y yaw respectivamente).

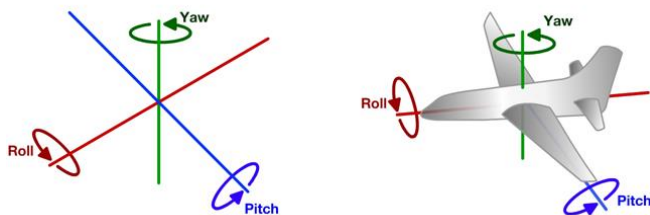


Figura 4. Posibles perturbaciones en el pod. Fuente: Touring Machine Company.

En el caso de utilizar levitación activa también serán necesarios sistemas activos de estabilización. Si se utilizan imanes permanentes, solo sería necesario la implementación de un sistema activo de estabilización para el movimiento de yaw o guiñada puesto que los otros dos estarán cubiertos gracias a las propiedades de los imanes permanentes.

La **propulsión** en el sistema Hyperloop se logra mediante el uso de un motor lineal. En términos constructivos el motor lineal deriva de un motor

rotativo convencional el cual es cortado y desenrollado tal y como muestra la Figura 5.

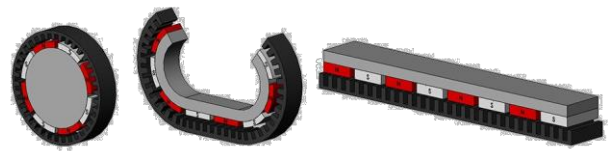


Figura 5. Esquema constructivo motor lineal. Fuente: Motion Control.

Al igual que el motor rotativo, consta de una parte fija y una parte móvil, que son las vías y el pod respectivamente. Sin embargo, el movimiento que produce este tipo de motor no es de rotación si no de traslación lineal. En función de las características constructivas y de electrificación tanto de la vía como del pod se pueden distinguir dos tipos de motor lineal: LIM (*Linear Induction Motor*) y LSM (*Linear Synchronous Motor*). El primero se utiliza en los trenes de baja o media velocidad y el segundo en trenes de alta velocidad como el Maglev, Transrapid o Hyperloop.

El principio de funcionamiento del LSM es el siguiente. El estator es un circuito de bobinas sobre la vía por el cual circula una corriente alterna trifásica controlada. El campo magnético generado por la corriente al circular por las bobinas de la vía también se conoce como onda magnética puesto que se mueve linealmente a lo largo de esta. Al interactuar con el rotor instalado en el pod (electroimanes, superconductores o imanes permanentes según proceda) crea una sucesión de polos norte y sur que empujan o tiran del vehículo hacia delante.

Existen dos variantes del motor LSM: Long Stator y Short Stator. En el Long Stator, el estator se encuentra en toda la longitud de la vía moviendo el pod tal y como se ha explicado anteriormente. Este es el tipo de motor que se encuentra en los trenes de levitación magnética actuales como el Transrapid alemán o el Maglev japonés. En el caso del Short Stator se dispone el estator en tramos de manera estratégica a lo largo de la vía tal y como muestra la siguiente figura.

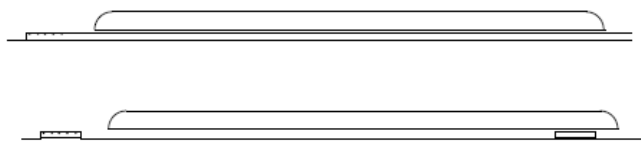


Figura 6. Configuración Long Stator y Short Stator. Fuente: BCD Engineering.

La figura a continuación muestra un resumen de los tipos de motor lineal con sus características principales.

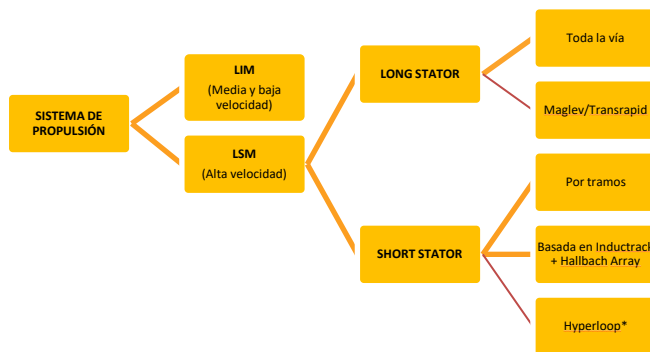


Figura 7. Resumen sistema de propulsión. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la velocidad a la que circularían las cápsulas Hyperloop, debe contar con numerosos **sistemas para garantizar la seguridad** en caso de emergencia, por ejemplo, sistema de parada de emergencia mediante zapatas de carbono, un SAI para garantizar la alimentación de los sistemas más críticos entre otros.

Cada uno de los sistemas que componen Hyperloop son diseñados teniendo en cuenta que todos han de ser coordinados por un sistema mayor, el **sistema de comunicación y control**. Este sistema aprovecha los beneficios de las tecnologías que caracterizan la cuarta revolución industrial: IoT, Big Data y Machine Learning. En lugar de seleccionar un único tipo computación para el sistema IoT (Cloud, Fog, Mist, Edge Computing), se implementa un sistema híbrido que optimiza y distribuye el almacenamiento y la capacidad de procesamiento en función de las necesidades. Se utiliza *Edge & Mist Computing* en aquellas tareas consideradas críticas de forma que

se minimice al máximo latencia en el proceso de toma de decisión. Por su parte, el análisis del conjunto de datos a gran escala de Hyperloop llevado a cabo mediante *Cloud Computing* se sustenta sobre bastidores situados en entornos controlados y con acceso seguro.

Debido a la sensibilidad de los datos y a la existencia de ciberataques (*Denial of Service, Masquerading, Man in the middle, Replay Attack*), se debe implementar un sistema que garantice la confidencialidad, disponibilidad, integridad y autenticidad de los datos. El sistema Cloud debe disponer de las siguientes funcionalidades:

1. Cortafuegos perimetral avanzado
2. Sistema de detección de intrusos con registro de eventos.
3. Cortafuegos internos para cada aplicación y base de datos.
4. Cifrado de datos en reposo.

Por su parte la arquitectura del sistema dispondrá de dos segmentos diferenciados: comunicación interna y comunicación externa. Para la comunicación interna se utilizará el estándar de redes de área local Ethernet. Este protocolo permite establecer la conexión por cable de las unidades de red dentro de la cápsula evitando la conexión a internet y reduciendo así la vulnerabilidad a los ataques.

Para la comunicación externa se estudia la posibilidad de utilizar tecnologías alternativas a la Wifi, como por ejemplo, la comunicación por luz visible también conocida como Li-Fi o VLC (*Visible Light Communications*).

### C. Empresas desarrollando la tecnología

Actualmente existen seis empresas desarrollando la tecnología, tres de las cuales fueron creadas a raíz de la participación de sus fundadores en la SXHPC. Dado el estado de desarrollo y la competitividad existente por conseguir la mejor tecnología, la información pública disponible acerca de los detalles técnicos de cada una de las propuestas de dichas empresas es limitada. Todas coinciden en la utilización de

energías renovables para la alimentación y en la utilización de sistemas de levitación magnética. La clasificación de los sistemas de propulsión resulta más complicada puesto que cada empresa realiza y protege mediante patentes los desarrollos realizados a los sistemas de propulsión explicados anteriormente.

En la Figura 8 se muestra una clasificación de las distintas empresas en función del nivel de madurez de su tecnología, TRL (*Technology Readiness Levels*). Esta clasificación se basa en la información obtenida de cada una de las empresas como, por ejemplo, si han hecho o no pruebas y a qué escala.

|   |                                                                                                            |   |                                                                                     |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | INVESTIGACIÓN BÁSICA<br>Se puede describir las necesidades del concepto pero no se tienen pruebas          | 1 |    |
| 2 | FORMULACIÓN DE LA TECNOLOGÍA<br>Se han formulado los conceptos y la aplicación                             | 2 |    |
| 3 | NECESIDAD DE VALIDACIÓN<br>Primeras muestras de interés por parte de los stakeholders                      | 3 |    |
| 4 | PROTOTIPO A PEQUEÑA ESCALA<br>Construido a escala de laboratorio                                           | 4 |                                                                                     |
| 5 | PROTOTIPO A GRAN ESCALA<br>Probado en un entorno relevante                                                 | 5 |    |
| 6 | PROTOTIPO DEL SISTEMA<br>Probado en un entorno relevante cercano a las condiciones de desempeño real       | 6 |   |
| 7 | DEMOSTRACIÓN DEL SISTEMA<br>Operar en un entorno cercano a las condiciones de desempeño real               | 7 |  |
| 8 | PRIMER SISTEMA COMERCIAL<br>Todos los procesos técnicos y sistemas funcionan de cara a la comercialización | 8 |                                                                                     |
| 9 | APLICACIÓN COMERCIAL COMPLETA<br>Sistema listo para ser comercializado a todos los consumidores            | 9 |                                                                                     |

Figura 8. Clasificación empresas en función de su TRL. Fuente: Elaboración propia.

En los primeros tres niveles se las empresas que se encuentran en un estado conceptual. Los niveles TRL 4 y 5 se utilizan para designar proyectos que se ya encuentran en estado de desarrollo de prototipos. Los niveles TRL 6 y 7 son asignados a aquellos proyectos que se encuentran en estado de validación. Por último, los niveles superiores se reservan para aquellos proyectos que se encuentren en la fase de producción.

De la información disponible, se deduce que la empresa más avanzada tecnológicamente es Virgin Hyperloop One puesto que ha realizado pruebas con prototipos en un entorno cercano a las condiciones de desempeño real, tal y como puede verse en la Figura 9.



Figura 9. Imágenes del DevLoop desierto de Nevada, Virgin Hyperloop One. Fuente: New York Times.

#### D. Rutas potenciales

Estudiar la orografía y las posibles rutas para la implantación de la tecnología Hyperloop es uno de los puntos clave asociados al desarrollo de la tecnología. Los principales mercados son aquellos en los que no existen líneas de alta velocidad o tienen una presencia escasa. La puesta en marcha de un sistema como Hyperloop requiere de considerables medios económicos por lo que el mercado con potencial se encuentra en Canadá, Australia, EEUU y Oriente Medio.

A este respecto, la empresa estadounidense Virgin Hyperloop One, lanzó en mayo de 2016 el mencionado Hyperloop One Global Challenge, una competición que invitaba a la realización de propuestas integrales para la construcción de redes Hyperloop que conecten ciudades y regiones de todo el mundo. Entre las finalistas se encuentran rutas en Reino Unido, India, Méjico, Canadá y EEUU.

Aunque la primera ruta comercial ha sido anunciada por Hyperloop Transportation Technologies para 2022, la estimación no parece posible puesto que la empresa todavía no ha realizado demostraciones formales del funcionamiento de su tecnología por lo que se considera por detrás de empresas como Hardt o Virgin Hyperloop One. Esta última estima poder poner en marcha su primera ruta comercial entre Numbai y Pune a partir de 2025.

#### E. Oportunidad para empresas

Según la consultora *Allied Market Research*, se espera que el mercado de la tecnología Hyperloop esté valorado en 1.350 millones de dólares en

2022 y que alcance los 6.340 millones de dólares en 2026.

Hyperloop espera revolucionar los sistemas de transporte de personas y mercancías actuales. Por ello, se ha realizado un análisis de la situación de estos sistemas tomando Europa como mercado de referencia. Se han tomado los datos públicos de Eurostat, la oficina estadística de la Comisión Europea.

[4] En lo que respecta al transporte de mercancías, se ha producido un desarrollo acelerado debido al crecimiento del comercio mundial así como a la evolución del comercio *just in time* promovido por gigantes como Inditex o Amazon quienes basan por completo o gran parte de su negocio en el sector *e-commerce*. La entrega de mercancías se ha visto forzada a mejorar notablemente en términos de capacidad y calidad en los últimos años. Por el contrario, la evolución del estado de las infraestructuras de transporte ha empeorado en términos de tráfico y congestión lo que, de no desarrollar alternativas como el sistema Hyperloop, afectará al desarrollo del mercado a nivel nacional e internacional.

[5] El transporte de personas distingue entre terrestre (coches, autobuses y trenes), marítimo y aéreo. En cuanto a los desplazamientos terrestres destaca la utilización del coche como el medio más utilizado con aproximadamente el 80% de los trayectos por tierra. Por su parte los desplazamientos avión suponen un nivel de ocupación de más de 316 millones de personas que llegan o salen de un aeropuerto solo en los 5 aeropuertos más representativos de la Unión Europea en 2016.

El transporte aéreo está llegando a sus límites de capacidad. Además es el método de transporte más contaminante (ver Figura 10). Por ello, los gobiernos están tomando cada vez más conciencia medioambiental y buscan desincentivar el uso de este método de transporte mediante la posibilidad de crear tasas adicionales por pasajero y billete (Holanda), la limitación del número de vuelos por pasajero (Alemania) o prohibir utilizar el avión cuando existan alternativas en tren inferiores a un

cierto número de horas (Francia). Actualmente los vuelos internos en la UE están obligados a pagar por las emisiones dentro del sistema de comercio de derechos de emisiones europeo. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha acordado crear un sistema mundial de comercio similar al europeo, sin embargo, no se prevé su aplicación al completo hasta el 2027.

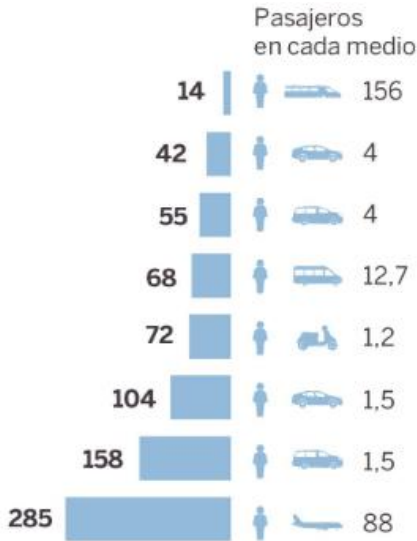


Figura 10. Contaminación de medios de transporte. Emisiones de CO<sub>2</sub> g/km/persona. Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente.

Las estadísticas demuestran que, de disponer de una alternativa para trayectos medios, el uso del transporte aéreo se vería reducido. En el caso de España la inversión en líneas de alta velocidad provocó una reducción del uso del avión en distancias de menos de 500 km.

Por todo ello, son muchas las empresas desarrollando la tecnología las que se están asociando de alguna forma con actores importantes de la alta velocidad. Las asociaciones son tanto con los fabricantes para el apoyo en el desarrollo, como con los gestores de infraestructuras. Un ejemplo claro es el acuerdo firmado en 2018 entre la empresa Virgin Hyperloop One y la empresa encargada de la gestión de las infraestructuras ferroviarias ADIF para establecer en 2020 un centro de experimentación y desarrollo de Hyperloop en Antequera, Málaga.

Este nuevo método de transporte supone por lo tanto una oportunidad para empresas tanto del sector ferroviario como empresas del sector de la construcción o el sector de energías renovables entre otros.

#### F. Propuesta de alimentación con PV

Desde el punto de vista de una empresa de gestión de infraestructuras, servicios y energías renovables, resulta interesante la realización de una propuesta de alimentación del sistema Hyperloop mediante la utilización de energía fotovoltaica.

Tras analizar el interés de posibles rutas dentro de la península ibérica se decide proponer una instalación para una posible conexión entre Getafe, considerado como uno de los centros de operaciones más importantes de Madrid, y Antequera en Málaga. Gracias a la levitación magnética y a la configuración de la matriz Halbach, Hyperloop tiene un consumo energético relativamente constante y reducido a velocidad de crucero. Por lo tanto, el consumo de Hyperloop está asociado principalmente a las etapas de aceleración y deceleración, es decir, la primera y la última.

Este estudio se ha centrado en el diseño de una planta de PV para cubrir parte de las necesidades de aceleración y deceleración en Getafe, concretamente en el solar delimitado por la vía Camino Viejo de Toledo y la Carretera del Cementerio. Este solar dispone de una superficie de 86.998,35 m<sup>2</sup>, con latitud 40.283 y longitud -3.741.

Las infraestructuras generadoras a partir de fuentes renovables estarán interconectadas a la red eléctrica en modo autoconsumo sin almacenamiento (ver Figura 11) para evitar el sobre coste excesivo, de modo que se asegure la disponibilidad de energía en períodos y horarios de baja irradiación solar.

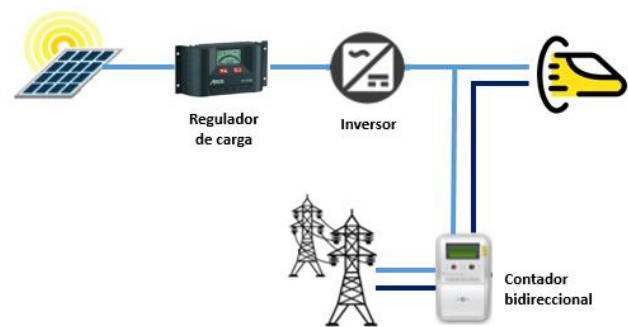


Figura 11. Esquema de la instalación modo autoconsumo. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta el área disponible en el solar se instalan un total de 32.800 placas. Estas placas no dispondrán de dispositivo de seguimiento del sol por lo que es necesario calcular la pendiente y el azimut óptimos para su instalación en base a su situación geográfica, obteniendo una pendiente de 34 grados y un azimut de 0 grados. Es decir, las placas estarán orientadas al sur y con una configuración en planta en el solar tal y como muestra el croquis de la siguiente figura.



Figura 12. Distribución de los paneles vista en planta y perfil. Fuente: Elaboración propia.

Gracias a la información disponible en PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*), el número de placas y a las especificaciones técnicas de estas, se obtiene un CEM (potencia pico instalada) de 8,69 MW<sub>p</sub>. Teniendo en cuenta un factor de aprovechamiento global de la planta del 80% (calentamiento del sistema y otros factores que reduzcan el rendimiento), la producción diaria de la planta, dimensionada para el mes más desfavorable en el emplazamiento seleccionado es de 603,57 MWh/día, lo que implica una producción de 220,3 GWh anuales.

Dado que el sistema se encuentra en fases de desarrollo no se dispone de datos objetivos de la potencia que puede llegar a tener la tecnología. Sin embargo, a grandes rasgos, se considera que la potencia sería similar a la de los trenes de alta velocidad actuales, basándose en la hipótesis de que el ahorro de energía asociado a la menor resistencia aerodinámica sería aproximadamente igual a la energía necesaria para generar las condiciones de baja presión en los tubos.

La potencia asociada al TGV francés está entre 6.500 kW y 12.000 kW en función del modelo. Para la realización de los cálculos en la ruta estimada se utilizará 10.000 kW. La distancia que separa ambas estaciones es aproximadamente 450 km y teniendo en cuenta una velocidad media de 700 km/h el recorrido podría realizarse en 39 minutos con un consumo aproximado de 6,5MWh. Esto significa que, en el peor de los casos, la planta diseñada podría soportar 93 viajes al día.

El estudio aquí descrito puede ser escalable al solar adyacente de forma que se aumente la generación de energía y se reduzca todavía más el impacto de esta instalación en la red eléctrica o con el fin de proporcionar energía a la red. Algunas de las alternativas que se barajan para la alimentación de Hyperloop plantean la instalación de placas en la parte superior del tubo o incluso en el propio tubo a modo de envoltura. La siguiente figura ilustra el concepto.



Figura 13. Alternativa para la instalación de paneles sobre tubos.  
Fuente: RTVE.

La ventaja de este tipo de propuesta es que no es necesaria la expropiación de terrenos a lo largo de la ruta para la instalación de los parques solares, sin embargo, se requeriría un estudio de irradiación a lo largo del recorrido del tubo y analizar la posibilidad de instalar baterías en las zonas del trayecto en las que no se tenga acceso a la red.

El LCOE de la instalación diseñada, estimando los valores del CAPEX a 600 €/kW y un OPEX de aproximadamente el 5 % de la inversión, es de 0,02486 €/kWh lo cual implica una instalación rentable en comparación con los valores registrados en 2018 por IRENA (*International Renewable Energy Agency*).

#### IV. CONCLUSIONES

Hyperloop es un método de transporte que se basa en una tecnología incipiente que se encuentra en fases de desarrollo. Su tecnología se basa en levitación magnética y propulsión electromagnética mediante motor lineal.

Hyperloop está siendo diseñado para convertirse en el método de transporte a gran escala y velocidad menos contaminante del mundo. Se puede considerar que tiene mayor impacto visual que otros medios de transporte, sin embargo, su diseño permitiría reducir el ruido, los costos operacionales y de mantenimiento y la dependencia de las condiciones meteorológicas. Gracias a la eliminación del factor humano mediante la automatización de todo el sistema,

Hyperloop será uno de los métodos de transporte más seguros.

Los sistemas de transporte tradicionales además de ser más contaminantes están llegando a sus límites de saturación lo cual confirma la necesidad de un nuevo método de transporte rápido y libre de emisiones. Dados los niveles de contaminación actuales y el compromiso de los gobiernos con los ODS, Hyperloop está pensado para ser alimentado con energías renovables como, por ejemplo, fotovoltaica.

A raíz de los acuerdos firmados entre los gobiernos y las distintas empresas, la inversión que reciben y las asociaciones planteadas, se puede afirmar que el interés que despierta una tecnología como Hyperloop es bastante alto.

Este sistema es posible gracias a los desarrollos tecnológicos y la evolución de la industria. En este sentido, Hyperloop se apoya en tecnologías propias de la cuarta revolución industrial, también conocida como Industria 4.0. En este documento se ha descrito la utilidad de algunas de las tecnologías características de esta cuarta revolución en el sistema Hyperloop. En concreto se han explicado y aplicado los conceptos de Cloud, Edge, Mist Computing y los entornos IoT en el sistema de comunicación y control que se encarga de gestionar tanto el movimiento autónomo de las cápsulas como su correcto funcionamiento y monitorización.

Sin embargo, Hyperloop se apoyará en más tecnologías 4.0 como por ejemplo la realidad virtual para mejorar la experiencia del usuario puesto que las cápsulas están cerradas al exterior o la realidad aumentada que permitirá a los operarios realizar el mantenimiento de las instalaciones y cápsulas de manera veloz y eficaz. La impresión 3D se usará para la fabricación de piezas complejas e *in situ* en el mantenimiento, tanto de los tubos como de las cápsulas, para diseñar el interior de las cápsulas e incluso las estaciones y paradas. Por su parte la tecnología Blockchain sería de utilidad para certificar el origen renovable de la energía excedente volcada a la red.

Por todo ello, Hyperloop además de representar una oportunidad de mercado para un amplio número de empresas existentes también supone la creación de un océano azul. Mientras las aerolíneas o los trenes actuales se encuentran en un océano rojo compitiendo entre ellos para incrementar su cuota de mercado a base de reducir sus márgenes o mejorar la calidad del servicio, Hyperloop supone un nuevo método de transporte. Proporciona la velocidad de un avión a nivel de corteza terrestre al tiempo que mantiene la comodidad de un tren gracias a la tecnología de levitación magnética y generar el vacío en los tubos.

## REFERENCIAS

- [1] ABERTIS (2018). *ROAD TECH*. OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.ABERTIS.COM/ONTHEROAD/THE-FUTURE-OF-MOBILITY/?LANG=EN](https://www.abertis.com/ontheroad/the-future-of-mobility/?lang=en)
- [2] HYPERLOOP ALPHA, (2013) OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.SPACEX.COM/SITES/SPACEX/FILES/HYPERLOOP\\_ALPHA-20130812.PDF](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)
- [3] BCD ENGINEERING (2011). *MAGLEV WORLDWIDE STATUS AND TECHNICAL REVIEW*. OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PUBLICATION/236993225\\_MAGLEV\\_-\\_WORLDWIDE\\_STATUS\\_AND\\_TECHNICAL\\_REVIEW](https://www.researchgate.net/publication/236993225_MAGLEV_-_WORLDWIDE_STATUS_AND_TECHNICAL_REVIEW)
- [4] ANÁLISIS SECTOR FREIGHT. OBTENIDO DE [HTTPS://EC.EUROPA.EU/EUROSTAT/STATISTICS-EXPLAINED/INDEX.PHP/FREIGHT\\_TRANSPORT\\_STATISTICS#ROAD\\_FREIGHT](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Freight_transport_statistics#Road_freight)
- [5] ANÁLISIS SECTOR TRANSPORTE DE PERSONAS. OBTENIDO DE [HTTPS://EC.EUROPA.EU/EUROSTAT/STATISTICS-EXPLAINED/INDEX.PHP/PASSENGER\\_TRANSPORT\\_STATISTICS#AIR\\_PASSENGERS](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Passenger_transport_statistics#Air_passengers)

# LOGISTICS OF THE FUTURE: HYPERLOOP

Author: Augustin Acedo-Rico, Catalina.

Director: García Carasusan, Brígida.

Universidad Pontificia Comillas ICAI.

## PROJECT SUMMARY

This document is a brief description of the Master's Thesis completed by Catalina Augustin Acedo-Rico, student at Universidad Pontificia de Comillas (I.C.A.I.) and directed by Brígida García Carasusan industrial engineer from Universiadd de Malaga.

**Key words:** Hyperloop, magnetic levitation, lineal motor, photovoltaic energy.

## I. INTRODUCTION

Traffic causes economic losses in productivity, accidents and air pollution. The high level of road congestion is a factor that affects public health.

According to the Road Tech report published by Abertis in collaboration with the Economist Intelligence Unit (EIU), the number of vehicles is expected to quadruple by 2050 reaching 4 billion. Currently 54% of the population lives in large cities, with private urban transport being responsible for 22% of CO<sub>2</sub> emissions. If expectations are met, by 2050, these values could increase to 66% of the population living in cities and causing 30% of CO<sub>2</sub> emissions [1]. Figure 1 shows the CO<sub>2</sub> percentage of each type of vehicle with respect to the overall transport in the EU.

Around 80% of the population is exposed to pollution levels higher than those established by the World Health Organization (WHO). This has caused only in the EU 450,000 premature deaths

in 2013 due to heart attacks and respiratory diseases. Entering a cost for the economies of the region of 1.4 billion dollars annually.

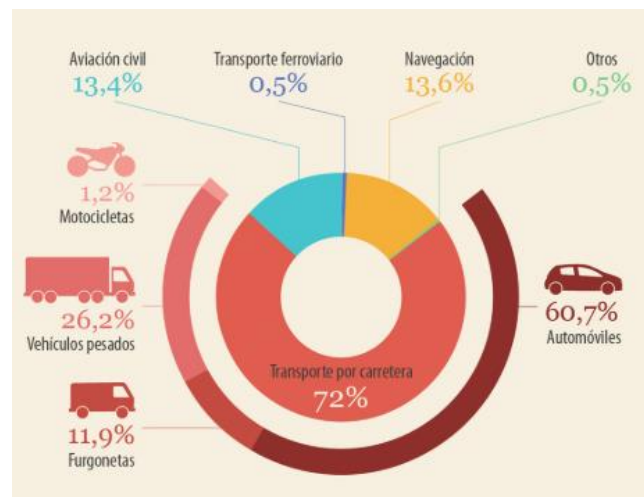


Figure 1. CO<sub>2</sub> emissions originated by transport in 2016 in the EU.  
Source: AEMA.

Given that transport is one of the main causes of pollution, with 22% emissions, the search for alternatives to fossil-fueled transport methods is one of the most important and invested topics in recent years.

OEMs are designing and marketing hybrid and electric vehicle models in addition to considering the total replacement of combustion vehicles from their portfolio in the coming years. However, although the way to deal with the so-called range anxiety is being investigated, the reality is that batteries continue to offer limited capacity. Electric vehicles due to their characteristics are succeeding as part of carsharing business models such as the well-known Car2Go, Zity, Emov, or in

scootersharing such as eCooltra or Flash for use in urban environments.

Hyperloop is proposed as an alternative for medium / long distance journeys currently made by airplanes, cars, trains and ships for the transport of goods and people. It consists of tubes in low pressure conditions that allow the circulation of capsules that levitate at a speed of up to 1.000 km / h.

## II. METHODOLOGY

The scope of the project contemplates the state of the art of technology and the analysis of the sectors that Hyperloop can revolutionize, the transport of people and the transport of goods, among others.

Additionally, information is collected on the main companies that are developing the technology, as well as the opportunities and challenges for the different sectors that make up the Hyperloop ecosystem. Finally, a proposal is made to carry out the feeding of the system through the use of photovoltaic energy.

To achieve these objectives, the following platforms have been used:

1. Company's information: CBInsights and Tracxn.
2. Search and analysis of intellectual property: Espacenet and Derwent.
3. Photovoltaic información: PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*).

## III. RESULTS

The results obtained in the development of the project are divided into different sections.

### A. State of the art

The concept of Hyperloop arises for the first time in the Hyperloop Alpha document published by the SpaceX company in 2013 [2]. However, it is not the first time that a similar system is considered. In 1910, Robert Goddard, an American

engineer considered one of the creators of the first rocket, had already proposed a system whose foundation was based on the vacuum of the tubes and magnetic levitation.

Elon Musk, physicist and founding entrepreneur of the companies Tesla and Space X has been one of the main precursors of Hyperloop in recent years. His company SpaceX, discarded the technical and economic feasibility of generating vacuum in a system like the one mentioned above and proposes the use of low-pressure tubes instead of vacuum, baptizing the concept as Hyperloop.

To encourage and accelerate the Hyperloop design and implementation process, SpaceX announced on June 15, 2015 the sponsorship of a competition called SpaceX Hyperloop POD Competition, from now on SXHPC, in which they invited university and non-university groups worldwide to propose designs for the capsules of this system. Part of the companies currently developing the technology emerge from this competition.

Hyperloop can be considered a hybrid between train and plane. It circulates at the level of the earth's crust, like a train, but at a speed similar to that of the plane. That is, thanks to the magnetic levitation and the low pressure conditions of the tubes, it aims to become the fastest land transport method. Figure 2 shows a comparison of different high-speed train models with their respective maximum speeds.

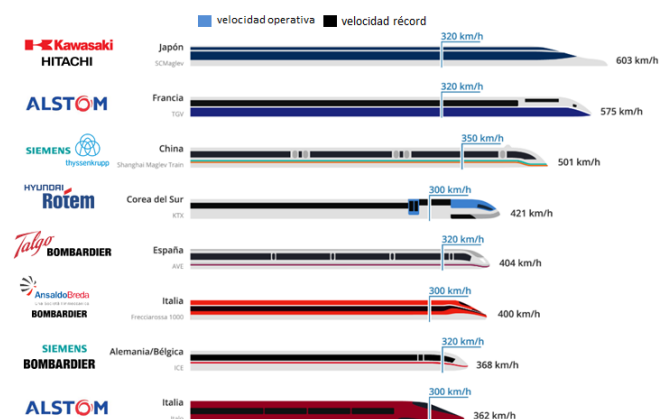


Figure 2. High speed trains with velocities. Source: GoEuro.

The Japanese Maglev currently holds the speed record (603 km / h). Hyperloop is proposed as an improved version of this type of train. Circulating inside tubes under low pressure conditions would allow not only to reach higher speeds but also to do it in a more efficient way.

### B. Hyperloop technology

[3] Hyperloop technology consists of several systems that allow the levitation and movement of the capsules, also known as pods, wagons or pods, autonomously within the vacuum tubes. The technology behind each of these systems is summarized below.

In general, there are two alternatives to achieve **levitation**: (i) through the use of air and (ii) levitation based on the principle of magnetism. The following figure shows a summary of the alternatives that will be explained below.

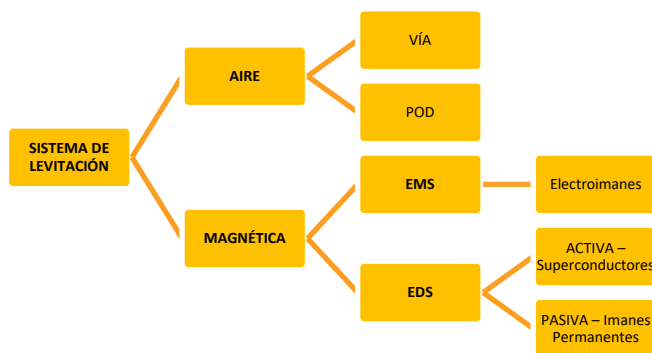


Figure 3. Levitation system summary. Source: Own Elaboration.

The use of compressed air for the levitation of the capsules was conceptually proposed by Elon Musk and his company SpaceX in the Hyperloop Alpha document. However, it has ended up being discarded because the storage of compressed air in the capsules could compromise passenger safety, limit the reach of the pods and because it makes no sense to inject air into a system that relies on tubes in vacuum conditions.

Magnetic levitation is achieved through the interaction of magnetic fields that generate forces of attraction or repulsion depending on the system used: (i) electromagnetic suspension known as

EMS and (ii) electrodynamic suspension also known as EDS. The main difference between an EMS system and an EDS is that, in electromagnetic levitation, the train levitates by the attraction between the electromagnets placed in the vehicle and the track, while in electrodynamic the levitation is achieved thanks to the forces of repulsion generated between the permanent magnets or superconductors of the car and the track.

The main advantage of active levitation systems (electromagnets, and superconductors) is the ability to levitate pods even when standing still. The main disadvantage is energy dependence. For its part, levitation with permanent magnets requires the existence of an initial relative speed with respect to the tracks and the installation of wheels to support movement at speeds below the takeoff speed, as well as a magnetic shield for protection of the passengers against the magnetic field generated by the magnets.

The choice of the type of magnetic levitation system to be used (electromagnets, superconductors or permanent magnets) as well as the quantity and its arrangement in the sheath and tracks are part of the design parameters of the different development companies or equipment that are competing annually in the SXHPC. These parameters are obtained through the approach of magnetism equations and are solved using mathematical and design softwares that allow to calculate and test the hypotheses in an iterative process.

The **stabilization system** is closely linked to the levitation system because uses the same principles. Figure 4 shows the types of movement that capsules can experience known as pitch, roll and yaw respectively.

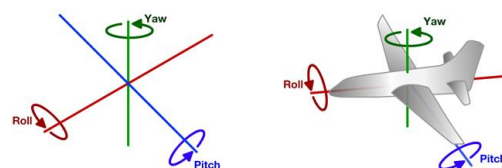


Figure 4. Pod's possible movements. Source: Touring Machine Company.

If the levitation system is active, the stabilization system requires active systems as well. If permanent magnets are used, it would only be necessary to implement an active stabilization system for yaw movement since the other two types of movement will be covered thanks to the properties of permanent magnets.

Propulsion in the Hyperloop system is achieved through the use of a linear motor. In constructive terms the linear motor derives from a conventional rotary motor which is cut and unwound as shown in Figure 5.

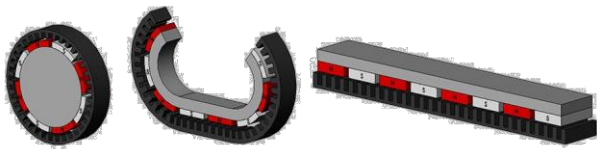


Figure 5. Linear motor construction scheme. Source: Motion Control.

Like the rotary engine, it consists of a fixed part and a moving part, which are the tracks and the pod respectively. However, the movement produced by this type of engine is not rotating but linear translation. Depending on the construction and electrification characteristics of both the track and the pod, two types of linear motor can be distinguished: LIM (Linear Induction Motor) and LSM (Linear Synchronous Motor). The first is used in low or medium speed trains and the second in high speed trains such as Maglev, Transrapid or Hyperloop.

The operating principle of the LSM is as follows. The stator is a circuit of coils on the track through which a controlled three-phase alternating current flows. The magnetic field generated by the current flowing through the coils of the track is also known as the magnetic wave since it moves linearly along it. By interacting with the rotor installed in the pod (electromagnets, superconductors or permanent magnets as appropriate) it creates a succession of north and south poles that push or pull the vehicle forward.

There are two variants of the LSM engine: Long Stator and Short Stator. In the Long Stator, the stator is located along the entire length of the

track, dragging the pod as explained above. This is the type of engine found in current magnetic levitation trains such as the German Transrapid or the Japanese Maglev. In the case of the Short Stator, the stator is arranged in strategically placed sections along the track as shown in the following figure.

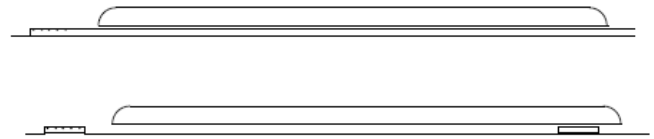


Figure 6. Long Stator and Short Stator Configuration. Source: BCD Engineering.

The figure below shows a summary of the linear motor types explained with their main characteristics.

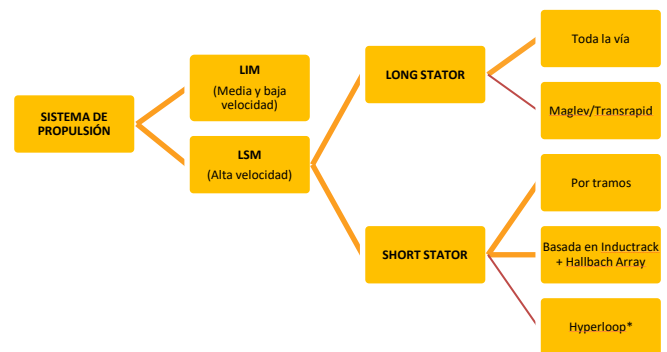


Figure 7. Propulsion system summary. Source: Own Elaboration.

Taking into account the speed at which Hyperloop capsules would circulate, it must have numerous **systems to ensure safety in case of emergency**: UPS to guarantee the power of the most critical systems or emergency stop using, for example, carbon footings, among others.

Each of the systems that make up Hyperloop are designed taking into account that all of them have to be coordinated by a larger system, the **communication and control system**. This system takes advantage of the technologies that characterize the fourth industrial revolution: IoT, Big Data and Machine Learning. Instead of selecting a single computing type for the IoT system (Cloud, Fog, Mist, Edge Computing), a hybrid system is implemented in order to optimize

and distribute storage and processing capacity according to Hyperloop's needs. Edge & Mist Computing are used in those tasks considered critical in a way that minimizes the maximum latency in the decision-making process. Cloud Computing to support large-scale data processing and analysis. Hyperloop scale is carried out on racks located in controlled environments and with secure access.

Due to the sensitivity of the data and the existence of cyber-attacks (Denial of Service, Masquerading, Man in the middle, Replay Attack), a system that guarantees the confidentiality, availability, integrity and authenticity of the data must be implemented. The Cloud system must have the following features:

1. Advanced perimeter firewall.
2. Intruder detection system with event log.
3. Internal firewall for each application and database.
4. Data encryption at rest.

For its part, the system architecture will have two distinct parts: internal communication and external communication. The Ethernet local area network standard will be used for internal communication. This protocol allows to establish the cable connection of the network units inside the capsule avoiding internet connection and thus reducing vulnerability to attacks.

For external communication, the possibility of using technologies other than Wi-Fi is being studied, such as, for example, visible light communication also known as Li-Fi or VLC (Visible Light Communications).

### C. Companies developing technology

There are currently six companies developing the technology, three of which were created following the participation of its founders in the SXHPC. Given the state of development and the existing competitiveness to achieve the best technology, the public information available about the details of each of the proposals of these companies is limited. All coincide in the use of renewable energy

and in the use of magnetic levitation systems. The classification of propulsion systems is more complicated since each company makes and protects by patents the developments made to the propulsion systems explained above.

Figure 8 shows a classification of these companies according to the level of maturity of their technology, TRL (Technology Readiness Levels). This classification is based on the information obtained from each of the companies, such as whether or not they have done tests and at what scale.

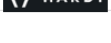
|   |                                                                                                                   |   |                                                                                      |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | <b>INVESTIGACIÓN BÁSICA</b><br>Se puede describir las necesidades del concepto pero no se tienen pruebas          | 1 |   |
| 2 | <b>FORMULACIÓN DE LA TECNOLOGÍA</b><br>Se han formulado los conceptos y la aplicación                             | 2 |   |
| 3 | <b>NECESIDAD DE VALIDACIÓN</b><br>Primeras muestras de interés por parte de los stakeholders                      | 3 |   |
| 4 | <b>PROTOTIPO A PEQUEÑA ESCALA</b><br>Construido a escala de laboratorio                                           | 4 |                                                                                      |
| 5 | <b>PROTOTIPO A GRAN ESCALA</b><br>Probado en un entorno relevante                                                 | 5 |   |
| 6 | <b>PROTOTIPO DEL SISTEMA</b><br>Probado en un entorno relevante cercano a las condiciones de desempeño real       | 6 |   |
| 7 | <b>DEMOSTRACIÓN DEL SISTEMA</b><br>Operar en un entorno cercano a las condiciones de desempeño real               | 7 |  |
| 8 | <b>PRIMER SISTEMA COMERCIAL</b><br>Todos los procesos técnicos y sistemas funcionan de cara a la comercialización | 8 |                                                                                      |
| 9 | <b>APLICACIÓN COMERCIAL COMPLETA</b><br>Sistema listo para ser comercializado a todos los consumidores            | 9 |                                                                                      |

Figure 8. Companies' TRL classification. Source: Own Elaboration.

In the first three levels are companies that are in a conceptual state. TRL levels 4 and 5 are used to designate projects that are already in a state of prototype development. The TRL 6 and 7 are assigned to those projects that are in a validation state. Finally, the upper levels are reserved for those projects that are in the production phase.

The most technologically advanced company is Virgin Hyperloop One since it has carried out prototype tests in an environment close to the real performance conditions as it can be seen in Figure 9.



Figure 9. Virgin Hyperloop One tubes, Devloop, Nevada's desert.  
Source: New York Times.

#### D. Potential routes

Studying the orography and the possible routes for the implementation of Hyperloop technology is one of the key points associated with the development of the technology. The main markets are those in which there are no high-speed lines or have a low presence. The implementation of a system such as Hyperloop requires considerable economic means so the potential market is located in Canada, Australia, USA and Middle East.

In this regard, the US company Virgin Hyperloop One, launched in May 2016 the aforementioned Hyperloop One Global Challenge, a competition that invited to the realization of comprehensive proposals for the construction of Hyperloop networks that connect cities and regions around the world. Among the finalists there are routes in the United Kingdom, India, Mexico, Canada and the US.

Although the first commercial route has been announced by Hyperloop Transportation Technologies by 2022, the estimate does not seem possible since the company has not yet made formal demonstrations of the operation of its technology, which is why it is considered behind companies such as Hardt or Virgin Hyperloop One. The latter estimates that it will be able to launch its first commercial route between Mumbai and Pune from 2025.

#### E. Business opportunity

According to the consulting firm Allied Market Research, the Hyperloop technology market is expected to be valued at 1.350 million dollars in 2022 and reach 6.340 million dollars in 2026.

Hyperloop hopes to revolutionize way people and goods are transported. Therefore, an analysis of the situation of these systems has been carried out taking Europe as a reference market. Public data have been taken from Eurostat, the statistical office of the European Commission.

[4] With regard to the transport of goods, there has been an accelerated development due to the growth of world trade as well as the evolution of the just-in-time trade promoted by giants such as Inditex or Amazon who completely or largely base their business on the e-commerce sector. The delivery of goods has been forced to improve in terms of capacity and quality in recent years. On the contrary, the evolution of the state of transport infrastructure has worsened in terms of traffic and congestion which will affect the development of the market at national and international level if alternative transportation such as Hyperloop is not considered.

[5] The transport of people distinguishes between land (cars, buses and trains), sea and air. As for land travel, the car stands out as the most used with approximately 80% of the journeys made by land in 2016. On the other hand, air travel has an occupancy level of more than 316 million passengers arriving or leaving an airport only in the 5 most representative airports of the European Union.

Air transport is reaching its capacity limits. It is also considered the most polluting transport method (see Figure 10). Therefore, governments are becoming increasingly environmentally conscious and seek to discourage the use of planes through the possibility of creating additional fees per passenger and ticket (Holland), limiting the number of flights per passenger (Germany) or forbidding the use of an airplane when there are alternatives by train of less than a certain number of hours (France). Nowadays, internal flights in the EU are required to pay for emissions within the European emission rights trading system. The International Civil Aviation Organization (ICAO) has agreed to create a global trading system

similar to the European one, however, its full application is not planned until 2027.

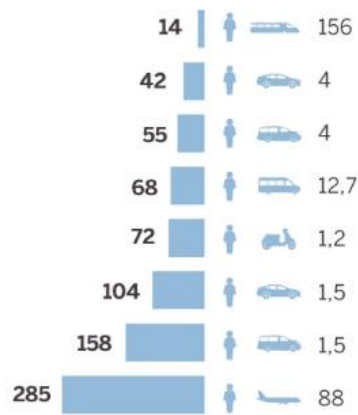


Figure 10. CO<sub>2</sub> emissions (g/km/persona) of each type of transport.  
Source: European Environment Agency.

Statistics show that, if an alternative for medium routes is available, the use of air transport would be reduced. In the case of Spain, investment in high-speed lines caused a reduction in the use of the planes traveling less than 500 km.

There are many high-speed actors who are associating in some way with companies developing the technology. Partnerships are with both manufacturers, for development support, and infrastructure managers. A clear example is the agreement signed in 2018 between Virgin Hyperloop One and the ADIF railway infrastructure management company to establish a Hyperloop experimentation and development center in 2020 in Antequera, Malaga.

This new method of transport is therefore an opportunity for companies in both the railway sector and companies in the construction sector or the renewable energy sector, among others.

#### F. PV power supply proposal

From the point of view of an infrastructure, services and renewable energy management company, it is interesting to carry out a proposal for powering the system through the use of photovoltaic energy.

After analyzing the interest of possible routes within the Iberian Peninsula, it has been decided to propose an installation of a connection between

Getafe, considered one of the most important operations centers in Madrid, and Antequera in Malaga. Thanks to the magnetic levitation and the configuration of the Halbach array, Hyperloop has a relatively constant and reduced energy consumption at cruising speed. Therefore, Hyperloop consumption is mainly associated with the acceleration and deceleration stages, that is, the first and the last.

This study has focused on the design of a PV plant to cover part of the needs for acceleration and deceleration in Getafe, specifically in the plot delimited by the Camino Viejo de Toledo road and the Carretera del Cementerio. This plot has an area of 86,998.35 m<sup>2</sup>, with latitude 40,283 and longitude -3,741.

The infrastructures generating from renewable sources will be interconnected to the electricity grid in self-consumption mode without storage (see Figure 11) to avoid excessive cost overrun, so as to ensure the availability of energy in periods and times of low solar irradiation.



Figure 11. Scheme of the self-consumption mode installation.  
Source: Own Elaboration.

Taking into account the area available on the site, a total of 32.800 panels are installed. These plates will not have a sun tracking device so it is necessary to calculate the optimum slope and azimuth for installation based on the geographical location of the site, obtaining a slope of 34 degrees and an azimuth of 0 degrees. That is to say, the plates will be oriented to the south and with a configuration in the site as shown in the sketch of the following figure.



Figure 12. Scheme of the panels' distribution. Source: Own Elaboration.

Thanks to the information available in PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), the number of panels and their technical specifications, the installation results in a CEM (installed peak power) of 8.69 MW<sub>p</sub>. Taking into account a factor of global utilization of the plant of 80% (heating of the system and other factors that reduce the yield), the daily production of the plant, sized for the most unfavorable month is 603.57 MWh / day, which implies an annual production of 220.3 GWh.

Since Hyperloop is in development phases, there are no objective data on the power the technology may require. However, based on the hypothesis that the energy savings associated with the lower aerodynamic drag would be approximately equal to the energy needed to generate the low pressure conditions in the tubes, it is considered that the power would be similar to that of current high-speed trains.

The associated power of the French TGV is between 6.500 kW and 12.000 kW depending on the model. 10.000 kW will be used to perform the calculations on the estimated route. The distance that separates both stations is approximately 450 km and taking into account an average speed of 700 km / h the route could be made in 39 minutes with an approximate consumption of 6,5 MWh. This means that, in the worst case, the designed photovoltaic generator could withstand 93 trips a day.

The study described here can be scalable to the adjacent site so that energy generation is increased and the impact of Hyperloop on the electricity grid is further reduced or in order to provide power to the network. Some of the alternatives that are being considered for Hyperloop feeding suggest the installation of panels in the upper part of the tube or even in the tube itself as a wrapper. The following figure illustrates the concept.

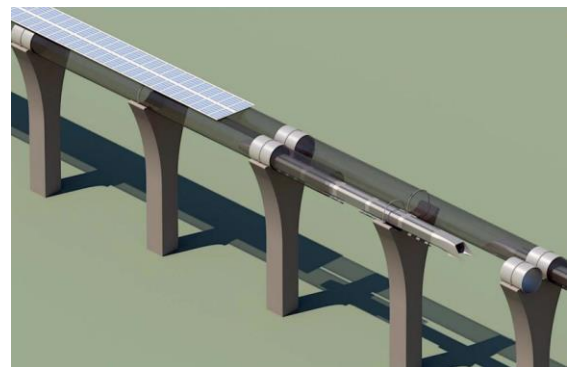


Figure 13. Panels installed in tubes. Source: Google.

The advantage of this type of proposal is that no extra expropriation of land is necessary along the route for the installation of solar parks, however, an irradiation study along the tube path would be required and consider the possibility of installing batteries in areas of the path where there is no access to the network.

The LCOE of the designed facility, estimating the CAPEX values at 600 €/kW and an OPEX of approximately 5 % of the investment, is 0.02486 €/kWh which implies a cost-effective installation compared to the registered 2018 values by IRENA (International Renewable Energy Agency).

#### IV. CONCLUSIONS

Hyperloop is a transportation method that is based on an incipient technology that is under development. Its technology is based on magnetic levitation and electromagnetic propulsion using a linear motor.

Hyperloop is being designed to become the large-scale least polluting transport method in the world. It can be considered to have greater visual impact than other transportation methods, however, its design would reduce noise, operational and maintenance costs and dependence on weather conditions. In addition, thanks to the elimination of the human factor by automating the entire system, Hyperloop will be one of the safest transport methods.

In addition to being more polluting, traditional transport systems are reaching their saturation limits which confirms the need for a new method of fast and emission-free transport. Given current pollution levels and the commitment of governments to the SDGs, Hyperloop is designed to be powered by renewable energy such as photovoltaics.

Following the agreements signed between governments and the different companies, the investment they receive and the associations raised, it can be affirmed that the interest aroused by a technology such as Hyperloop is quite high.

This system is possible thanks to technological developments and the evolution of the industry. In this sense, Hyperloop relies on technologies of the fourth industrial revolution, also known as Industry 4.0. This document describes the usefulness of some of the technologies characteristic of this fourth revolution in the Hyperloop system. Specifically, it have been explained and applied the concepts of Cloud, Edge, Mist Computing and the IoT environments in the communication and control system that manage both the autonomous movement of the capsules and their proper operation and monitoring.

However, Hyperloop will rely on more 4.0 technologies such as virtual reality to improve the

user experience since the capsules are closed to the outside or the augmented reality that will allow operators to perform efficient and fast maintenance of the facilities and capsules. 3D printing could be used to manufacture complex parts and in situ in the maintenance, both of the tubes and of the capsules, or to design the interior of the capsules and even the stations and stops. On the other hand, Blockchain technology would be useful to certify the origin of surplus energy turned into the network as renewable.

For all this, Hyperloop, represents a market opportunity for a large number of existing companies and means creating a blue ocean. While the current airlines or train companies swim in a red ocean competing with each other to increase their market share by reducing their margins or improving the quality of service, Hyperloop is a new method of transportation. It provides the speed of an airplane at the level of the earth's crust while maintaining the comfort of a train thanks to magnetic levitation technology and generating vacuum in the tubes.

#### REFERENCES

- [1] ABERTIS (2018). *ROAD TECH. OBTAINED FROM* [HTTPS://WWW.ABERTIS.COM/ONTHEROAD/THE-FUTURE-OF-MOBILITY/?LANG=EN](https://www.abertis.com/ontheroad/the-future-of-mobility/?lang=en)
- [2] HYPERLOOP ALPHA, (2013) *OBTAINED FROM* [HTTPS://WWW.SPACEX.COM/SITES/SPACEX/FILES/HYPERLOOP\\_ALPHA-20130812.PDF](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)
- [3] BCD ENGINEERING (2011). *MAGLEV WORLDWIDE STATUS AND TECHNICAL REVIEW. OBTAINED FROM* [HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PUBLICATION/236993225\\_MAGLEV\\_-\\_WORLDWIDE\\_STATUS\\_AND\\_TECHNICAL\\_REVIEW](https://www.researchgate.net/publication/236993225_MAGLEV_-_WORLDWIDE_STATUS_AND_TECHNICAL_REVIEW)
- [4] FREIGHT ANALYSIS. *OBTAINED FROM* [HTTPS://EC.EUROPA.EU/EUROSTAT/STATISTICS-EXPLAINED/INDEX.PHP/FREIGHT\\_TRANSPORT\\_STATISTICS#ROAD\\_FREIGHT](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Freight_transport_statistics#Road_freight)
- [5] TRANSPORT ANALYSIS. *OBTAINED FROM* [HTTPS://EC.EUROPA.EU/EUROSTAT/STATISTICS-EXPLAINED/INDEX.PHP/PASSENGER\\_TRANSPORT\\_STATISTICS#AIR\\_PASSENGERS](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Passenger_transport_statistics#Air_passengers)





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (I.C.A.I.)  
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

MEMORIA DESCRIPTIVA

# **LOGÍSTICA DEL FUTURO: HYPERLOOP**

Autor: Catalina Augustin Acedo-Rico

Director: Brígida García Carasusan

Madrid

Curso 2018-2019





## Índice de la memoria

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Índice de la memoria .....                        | 3  |
| Índice de figuras .....                           | 7  |
| Índice de tablas .....                            | 13 |
| PARTE I Memoria.....                              | 15 |
| Capítulo 1 Introducción.....                      | 17 |
| 1.1. Motivación.....                              | 17 |
| 1.2. Objetivos .....                              | 20 |
| 1.3. Metodología de trabajo .....                 | 21 |
| 1.4. Recursos empleados.....                      | 21 |
| Capítulo 2. Estado del arte .....                 | 23 |
| 2.1. Origen del concepto .....                    | 23 |
| SpaceX Hyperloop POD Competition .....            | 24 |
| 2.2. Antecedentes .....                           | 25 |
| 2.3. Tecnología de los transportes actuales ..... | 27 |
| 2.4. Tecnología de Hyperloop .....                | 30 |
| Sistema de levitación .....                       | 31 |
| Sistema de estabilización .....                   | 37 |
| Sistema de propulsión y frenada .....             | 39 |
| Sistema de comunicación y control .....           | 46 |
| Sistema de refrigeración .....                    | 52 |
| 2.5. Comparativa con otras tecnologías .....      | 53 |



---

|                                       |                                                   |           |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 3</b>                     | <b>Análisis del mercado</b>                       | <b>55</b> |
| <b>3.1.</b>                           | <b>Empresas desarrollando la tecnología</b>       | <b>55</b> |
| HARDT                                 |                                                   | 55        |
| ZELEROS                               |                                                   | 61        |
| HYPER POLAND                          |                                                   | 62        |
| HYPERLOOP TRANSPORTATION TECHNOLOGIES |                                                   | 63        |
| VIRGIN HYPERLOOP ONE                  |                                                   | 66        |
| TRANSPOD                              |                                                   | 68        |
| Clasificación TRL                     |                                                   | 72        |
| <b>3.2.</b>                           | <b>Análisis rutas potenciales</b>                 | <b>73</b> |
| Canadá, Toronto-Montreal              |                                                   | 74        |
| EEUU, Cheyenne-Denver-Pueblo          |                                                   | 75        |
| EEUU, Miami-Orlando                   |                                                   | 76        |
| EEUU, Dallas-Laredo-Houston           |                                                   | 77        |
| EEUU, Chicago-Columbus-Pittsburgh     |                                                   | 78        |
| Méjico, Guadalajara-Mexico City       |                                                   | 79        |
| Reino Unido, Edimburgo-Londres        |                                                   | 79        |
| Reino Unido, Edimburgo-Liverpool      |                                                   | 80        |
| India, Bengaluru-Chennai              |                                                   | 81        |
| India, Numbai-Chennai                 |                                                   | 81        |
| <b>Capítulo 4</b>                     | <b>Oportunidades para empresas</b>                | <b>83</b> |
| <b>4.1.</b>                           | <b>Análisis sector reparto</b>                    | <b>83</b> |
| <b>4.2.</b>                           | <b>Análisis sector transporte de personas</b>     | <b>86</b> |
| <b>4.3.</b>                           | <b>Empresas del sector de alta velocidad</b>      | <b>90</b> |
| <b>4.4.</b>                           | <b>Gestor de infraestructuras, servicios y ER</b> | <b>90</b> |

---



---

MEMORIA DESCRIPTIVA

|                                         |                                      |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| Propuesta de suministro energético..... | 91                                   |
| <b>Capítulo 5 Conclusiones .....</b>    | <b>105</b>                           |
| <b>Capítulo 6 Bibliografía .....</b>    | <b>109</b>                           |
| <b>Fin bibliografía .....</b>           | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>PARTE II: ANEXOS .....</b>           | <b>115</b>                           |





## Índice de figuras

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Emisiones de CO2 originadas por el transporte en la UE. Datos más actuales. [4] .....                            | 18 |
| Figura 2. Matriz ascendente centesimal con los atributos clave de un método de transporte. Fuente: Elaboración propia..... | 20 |
| Figura 3. Cronograma metodología de trabajo. Fuente: Elaboración propia. ....                                              | 21 |
| Figura 4. Esquema ruta alpha Hyperloop. Fuente: Hyperloop Alpha. ....                                                      | 23 |
| Figura 5. Hitos importantes en la historia del transporte. Fuente: Elaboración propia. ....                                | 25 |
| Figura 6. Estampa de la empresa estadounidense Pneumatic Dispatch. ....                                                    | 26 |
| Figura 7. Estampa del diseño de Alfred Ely Beach basado en tubos neumáticos..                                              | 26 |
| Figura 8. Fotografía primer vuelo tripulado, hermanos Wright.....                                                          | 27 |
| Figura 9. Imágenes avión supersónico y comercial. [8] .....                                                                | 28 |
| Figura 10. Comparativa trenes de alta velocidad. [28]. ....                                                                | 29 |
| Figura 11. Imagen del tren de levitación magnética japonés Maglev.[41] .....                                               | 29 |
| Figura 12. Diagrama de fuerzas. Fenómeno de adherencia. [3] .....                                                          | 30 |
| Figura 13. Resumen sistema de levitación. Fuente: Elaboración propia. ....                                                 | 31 |
| Figura 14. Esquema de la cápsula de pasajeros. Fuente: Hyperloop Alpha. [25] .                                             | 32 |
| Figura 15. Funcionamiento de un electroimán. Fuente: [18]. ....                                                            | 33 |
| Figura 16. Esquema de suspensión electromagnética, EMS. ....                                                               | 34 |
| Figura 17. Esquema de suspensión electrodinámica, EDS. ....                                                                | 35 |



MEMORIA DESCRIPTIVA

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 18. Identificación de las posibles perturbaciones en un vagón o cápsula. [48]                              |    |
| .....                                                                                                             | 38 |
| Figura 19. Esquema de las vías laterales basadas en electroimanes. Fuente: [10]                                   |    |
| .....                                                                                                             | 38 |
| Figura 20. Vista en detalle del sistema de estabilización activo. Fuente: Gaia Final Design. ....                 | 39 |
| Figura 21. Esquema constructivo de la evolución del motor de inducción convencional al lineal. Fuente: [58]. .... | 40 |
| Figura 22. Esquema funcionamiento sistema de propulsión LSM. Fuente: Coasters and more. ....                      | 40 |
| Figura 23. Configuración Lons Stator y Short Stator. Fuente: BCD Engineering... ..                                | 41 |
| Figura 24. a) Esquema Matriz Halbach [42]. b) Líneas de campo magnético. Fuente: Gaia Final Design. ....          | 42 |
| Figura 25. Esquema del diseño fraccionado de la vía. ....                                                         | 42 |
| Figura 26. Resumen tipos de sistema de propulsión. ....                                                           | 43 |
| Figura 27. Esquema del sistema de parada de emergencia. Fuente: Gaia Final Design. ....                           | 44 |
| Figura 28. Esquema propuesto para el sistema de aceleración y deceleración de Hyperloop. [2].....                 | 45 |
| Figura 29. Esquema arquitectura de sistema de comunicación. Fuente: Elaboración propia. ....                      | 50 |
| Figura 30. Arquitectura de la comunicación interna. Fuente: Elaboración propia. ....                              | 51 |
| Figura 31. Esquema sistema de refrigeración superconductores Maglev. Fuente: [59] .....                           | 52 |



MEMORIA DESCRIPTIVA

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32. Clasificación de los medios de transporte por nivel de contaminación.<br>Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA). [13] ..... | 53 |
| Figura 33. Levitación magnética con electroimanes en parado e imanes<br>permanentes en movimiento. Fuente: HARDT. ....                            | 56 |
| Figura 34. Sistema de propulsión electromagnético. Onda magnética. Fuente:<br>HARDT.....                                                          | 57 |
| Figura 35. Propuesta disposición de los tubos según HARDT. Fuente: HARDT. ...                                                                     | 57 |
| Figura 36. Instalación de placas solares sobre los tubos. Fuente: HARDT.....                                                                      | 58 |
| Figura 37. Rampas y cambio de aguja. Fuente: HARDT. ....                                                                                          | 58 |
| Figura 38. Hyperloop HUB. Fuente: HARDT. ....                                                                                                     | 59 |
| Figura 39. Interior de las cápsulas. Fuente: HARDT. ....                                                                                          | 59 |
| Figura 40. Imágenes del sistema real de levitación y propulsión. Fuente: HARDT.<br>.....                                                          | 60 |
| Figura 41. Imágenes del interior del tubo de las pruebas reales. Fuente: HARDT.<br>.....                                                          | 60 |
| Figura 42. Diseño conceptual propuesta ZELEROS. Fuente: ZELEROS. ....                                                                             | 61 |
| Figura 43. Imagen equipo universitario de Hyper Poland con su prototipo. Fuente:<br>Hyper Poland. ....                                            | 62 |
| Figura 44. Posible mapa de red Hyperloop. Fuente: Hyper Poland.....                                                                               | 63 |
| Figura 45. Diseño conceptual propuesta Hyperloop Transport Technologies.<br>Fuente: HTT. ....                                                     | 64 |
| Figura 46. Diseño estación HTT hecha por AN.ONYMUS. Fuente: HTT. ....                                                                             | 65 |
| Figura 47. Imágenes del DevLoop desierto de Nevada. Fuente: New York Times.<br>.....                                                              | 67 |
| Figura 48. Diseño cápsula VH1 proyecto Numbai - Pune.....                                                                                         | 68 |



MEMORIA DESCRIPTIVA

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 49. Diseño conceptual cápsulas de Transpod exterior e interior. Fuente: Transpod.....                                                                      | 69 |
| Figura 50. Diseño conceptual tubos de Transpod. Fuente: Transpod. ....                                                                                            | 70 |
| Figura 51. Diseño estación con conexión intermodal. Fuente: Transpod.....                                                                                         | 70 |
| Figura 52. Esquema de la red de transporte de mercancías. Fuente: Transpod. .                                                                                     | 71 |
| Figura 53. Clasificación de las empresas desarrolladoras en función de su TRL. Fuente: Elaboración propia. ....                                                   | 72 |
| Figura 54. Redes ferroviarias existentes a nivel mundial en función de la velocidad. Fuente: OpenRailwayMap.....                                                  | 73 |
| Figura 55. Propuestas ganadoras de la Hyperloop One Global Challenge Fuente: Virgin Hyperloop One.....                                                            | 74 |
| Figura 56. Propuesta HyperCan, Canadá. Fuente: Virgin Hyperloop One. ....                                                                                         | 75 |
| Figura 57. Propuesta Rocky Mountain Hyperloop, EEUU. Fuente: Virgin Hyperloop One. ....                                                                           | 76 |
| Figura 58. Propuesta Florida Hyperloop, EEUU. Fuente: Virgin Hyperloop One. .                                                                                     | 77 |
| Figura 59. Propuesta Texas Triangle, EEUU. Fuente: Virgin Hyperloop One. ....                                                                                     | 78 |
| Figura 60. Propuesta Midwest Connect, EEUU. Fuente: Virgin Hyperloop One...                                                                                       | 78 |
| Figura 61. Propuesta Mexloop, Méjico. Fuente: Virgin Hyperloop One.....                                                                                           | 79 |
| Figura 62. Propuesta HypED, Reino Unido. Fuente: Virgin Hyperloop One.....                                                                                        | 80 |
| Figura 63. Propuesta Northern Arc, Reino Unido. Fuente: Virgin Hyperloop One. ....                                                                                | 80 |
| Figura 64. Propuesta AECOM, India. Fuente: Virgin Hyperloop One.....                                                                                              | 81 |
| Figura 65. Propuesta Hyperloop India, India. Fuente: Virgin Hyperloop One. ....                                                                                   | 82 |
| Figura 66. Porcentaje de reparto dentro de la UE asociado a carreteras, trenes o vías navegables respecto al total de tkm en función del país. Fuente: Eurostat.. | 84 |



MEMORIA DESCRIPTIVA

|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 67. Porcentaje de transportes por carreteras dedicados por cada país al ámbito nacional e internacional. Fuente: Eurostat.....                                    | 85  |
| Figura 68. Porcentaje de transporte dentro de la UE asociado a coches privados, autobús o similar o trenes respecto al total en función del país. Fuente: Eurostat. .... | 86  |
| Figura 69. Proporción de pasajeros que salen o llegan de vuelos nacionales e internacionales. Fuente: Eurostat. ....                                                     | 88  |
| Figura 70. Contaminación de medios de transporte. Emisiones de CO <sub>2</sub> g/km/persona. Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente, El País. ....                    | 89  |
| Figura 71. Solar planta PV, Getafe. Fuente: Google Earth. ....                                                                                                           | 92  |
| Figura 71. Solar planta PV, Getafe. Fuente: Google Earth. ....                                                                                                           | 92  |
| Figura 72. Solar planta PV, vista en planta. Área y perímetro. Fuente: Google Earth. ....                                                                                | 93  |
| Figura 73. Parámetros de diseño PV: pendientes y azimut. ....                                                                                                            | 94  |
| Figura 74. Situación del emplazamiento, España, respecto al Ecuador y al Meridiano de Greenwich. [39]. ....                                                              | 95  |
| Figura 75. Parámetros para el diseño de instalación Grid Connected. Fuente: PVGIS Comisión Europea. ....                                                                 | 96  |
| Figura 76. Extracción de datos PV. Fuente: PVGIS Comisión Europea.....                                                                                                   | 96  |
| Figura 77. Histórico de irradiación solar en el emplazamiento. Fuente: PVGIS Comisión Europea. ....                                                                      | 97  |
| Figura 78 Distribución de los paneles fotovoltaicos en el sola. Vista en planta y estimación de la vista en perfil. Fuente: Elaboración propia.....                      | 99  |
| Figura 79. Vista en perfil disposición de las placas solares. Fuente: Elaboración propia. ....                                                                           | 100 |



---

MEMORIA DESCRIPTIVA

|                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 80. Alternativa para instalación de paneles sobre los tubos Hyperloop. [65]                                                                               |     |
| .....                                                                                                                                                            | 101 |
| Figura 81. Evolución del promedio ponderado global del valor del LCOE para PV. [38]                                                                              |     |
| .....                                                                                                                                                            | 103 |
| Figura 82. Población mundial proyectada hasta 2.100. Fuente: División de Población del Departamento de Asunto Económicos y Sociales de las Naciones Unidas. [49] |     |
| .....                                                                                                                                                            | 106 |



## Índice de tablas

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1. Amenazas de un sistema IoT y mecanismos de seguridad. Fuente: Elaboración propia. ....                                           | 48  |
| Tabla 2. Empresas desarrolladoras de la tecnología Hyperloop en función de su origen. Fuente: Elaboración propia.//años .....             | 55  |
| Tabla 3. Rutas de interés propuestas por la empresa Transpod. Fuente: Elaboración Propia. Datos: Transpod. ....                           | 71  |
| Tabla 4. Ranking de los aeropuertos más transitados de la UE. Fuente: Elaboración propia. Datos: Eurostat. ....                           | 87  |
| Tabla 5. Irradiación horizontal normal y optimizada para inclinación 34°. Fuente: Elaboración propia. Datos: PVGIS Comisión Europea. .... | 97  |
| Tabla 6. Especificaciones técnicas paneles solares. ....                                                                                  | 98  |
| Tabla 7. Valores de CAPEX de distintas energías renovables. Fuente: Fraunhofer. [23] .....                                                | 102 |





# PARTE I Memoria





## Capítulo 1 Introducción

Con motivo de la finalización del máster universitario de Ingeniería Industrial y el máster en Industria Conectada, los alumnos realizan un proyecto en el que aúnan los conocimientos adquiridos durante el curso de los másteres. El tema escogido es el análisis, la evolución y las implicaciones de la tecnología Hyperloop.

El alcance del proyecto contempla el estado del arte de la tecnología y los sectores que puede revolucionar, entre ellos, el transporte de personas y el transporte de mercancías. Adicionalmente se recabará información sobre las principales empresas que están desarrollando la tecnología, el estado actual, así como las oportunidades y retos para los distintos sectores que conforman el ecosistema de Hyperloop. Desde el punto de vista concreto de una empresa de gestión de infraestructuras y energías renovables, se va a realizar una propuesta para llevar a cabo la alimentación del sistema mediante la utilización de energía fotovoltaica.

### 1.1. Motivación

---

**El incremento del tráfico provoca pérdidas económicas en la productividad, accidentes y contaminación atmosférica.** El alto nivel de congestión de las carreteras ya es un factor que afecta a la salud pública. Según el informe *Road Tech* publicado por **Abertis** en colaboración con la Unidad de Inteligencia Economista (EIU, por sus siglas en inglés) se espera que el número de vehículos se cuadruplique para 2050 llegando a los 4 mil millones. Actualmente el 54% de la población vive en grandes ciudades siendo el transporte urbano privado responsable del 22% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Si se cumplen las expectativas, para 2050, estos valores podrían aumentar hasta el 66% de la población viviendo en las ciudades y causando el 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. [1]

El Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés) calcula que al año se pierden de media 36 horas en atascos y 75 horas planificando rutas lo cual se traduce en una pérdida de productividad de 1,4 mil millones de dólares anuales, con expectativas de incrementarse en un 6% para 2030. La Figura 1 muestra el porcentaje que supone cada tipo de vehículo respecto al global del transporte en la UE.



Figura 1. Emisiones de CO2 originadas por el transporte en la UE. Datos más actuales. Fuente: [4]

En cuanto a la **salud pública**, el 80% de la población está expuesta a niveles de contaminación superiores a los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés). Esto ha causado sólo en la UE 450.000 muertes prematuras en 2013 debidas principalmente a ataques al corazón y enfermedades respiratorias. Incurriendo en un costo para las economías de la región de 1,4 mil millones de dólares anuales.

A estas pérdidas hay que sumarles las debidas a los accidentes en carretera que ascienden a 1,25 millones al año, es decir, 2 muertes por minuto, además de los 35 millones de accidentes con lesiones. Esto ha supuesto un costo del 3% del GDP en los países desarrollados y un 5% del GDP en los países menos desarrollados.

Una de las principales preocupaciones, por lo tanto, es la reducción de los gases nocivos que producen la contaminación y que están afectando a la salud de los ecosistemas. En 2007, los dirigentes de la UE establecen una serie de medidas conocidas como **20-20-20** en relación a la estrategia de Europa sobre clima y energía para **2020**. Estos objetivos son:

- **20%** de reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, en relación con los niveles de 1990.
- **20%** de generación con energías renovables en la UE.<sup>1</sup>
- **20%** de mejora de la eficiencia energética. [19]

<sup>1</sup> Se realizan revisiones a objetivos más ambiciosos. Por ejemplo, inicialmente para 2030 se estableció un 27% de energías renovables, sin embargo, en junio 2018, se ha establecido un objetivo de 32% y una propuesta de revisión de dichos objetivos en 2023. [55]



## MEMORIA DESCRIPTIVA

El transporte es uno de los principales causantes de la contaminación en la actualidad con un 22% por lo que la búsqueda de métodos de transporte alternativos a los vehículos propulsados con combustibles fósiles es uno de los temas en que más se está invirtiendo en los últimos años.

Los OEM's<sup>2</sup> están diseñando y comercializando ya los primeros modelos de vehículo híbrido y eléctrico además de considerar la sustitución total de los vehículos de combustión de su portfolio en los próximos años. Sin embargo, aunque se está investigando la manera de hacer frente al llamado *range anxiety*<sup>3</sup> la realidad es que las baterías continúan ofreciendo una capacidad limitada. No obstante, se están logrando avances en este sentido y algunas marcas como Nissan Leaf se encuentran investigando para aumentar la capacidad de las baterías.

Las empresas de gran tamaño y reconocidas en el sector movilidad y energía se están asociando o adquiriendo empresas de desarrollo de baterías para mejorar la capacidad de las baterías o buscar alternativas como el *battery swapping* o los supercargadores, gracias a los cuales se consigue aproximar el tiempo de recarga al tiempo que se tarda en repostar un vehículo de combustión.

Los vehículos eléctricos por sus características en el ámbito de sostenibilidad están teniendo éxito en la implementación de nuevos modelos de negocio de *carsharing* como los conocidos **Car2Go**, **Zity**, **Emov**, o en el caso de ciclomotores, *motosharing* y *scootersharing* como **eCooltra**, **Flash** o la empresa del sector de las energías renovables, **Acciona Mobility**. Estos modelos de movilidad compartida liberan a los clientes de la responsabilidad respecto al mantenimiento y recarga del vehículo convirtiéndose en alternativas idóneas para la circulación en trayectos cortos en ciudades. Permiten, además, obviar las restricciones que ciudades como Madrid han ido implantando los últimos años para reducir los niveles de contaminación y la congestión del tráfico en las ciudades a partir de distintivos ambientales y limitación del tráfico en zona centro.

La conclusión que se obtiene de la conducta de los ciudadanos es que, aunque existe concienciación respecto al problema medioambiental, el precio de mercado de los vehículos eléctricos junto a las limitaciones que plantean de cara a trayectos largos, no permite o no convence para su uso como método de transporte entre ciudades. Esto incluye tanto particulares como empresas de transporte de personas y de mercancías lo cual supone una oportunidad de negocio para un método de transporte como Hyperloop y para las empresas que por él apuesten.

La matriz ascendente centesimal que se muestra a continuación muestra los resultados de una encuesta realizada a los ciudadanos en relación a las

---

<sup>2</sup> Original Equipment Manufacturer.

<sup>3</sup> Expresión utilizada para hacer referencia a la preocupación por la autonomía de los vehículos eléctricos.



## MEMORIA DESCRIPTIVA

características que priorizan a la hora de elegir un método de transporte.<sup>4</sup> Estas matrices sirven para obtener la importancia relativa de una serie de atributos respecto a una base. Se ha escogido como atributo base la característica principal asociada al sistema Hyperloop: la velocidad.

| Atributo                        | 1-2  | 1-3  | 1-4  | 1-5  | 1-6  | 1-7  | 1-8  | 1-9  | 1-10 | 1-11 | 1-12 | Factor | Capacidad | Orden |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|-----------|-------|
| 1. Rápido                       | 45%  | 41%  | 37%  | 54%  | 27%  | 37%  | 35%  | 46%  | 39%  | 40%  | 45%  | 1,000  | 0,0557    | 11    |
| 2. Ticket Barato                | 55%  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 1,222  | 0,0681    | 8     |
| 3. Mantenim. Barato             |      | 59%  |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 1,439  | 0,0802    | 7     |
| 4. Ecológico                    |      |      | 63%  |      |      |      |      |      |      |      |      | 1,703  | 0,0949    | 3     |
| 5. Diseño agradable             |      |      |      | 46%  |      |      |      |      |      |      |      | 0,852  | 0,0473    | 12    |
| 6. Seguro                       |      |      |      |      | 73%  |      |      |      |      |      |      | 2,704  | 0,1507    | 1     |
| 7. Comodidad del usuario        |      |      |      |      |      | 63%  |      |      |      |      |      | 1,703  | 0,0949    | 4     |
| 8. Disponibilidad de destinos   |      |      |      |      |      |      | 65%  |      |      |      |      | 1,857  | 0,1035    | 2     |
| 9. Flexibilidad tipo mercancías |      |      |      |      |      |      |      | 54%  |      |      |      | 1,174  | 0,0654    | 10    |
| 10. Regularidad del servicio    |      |      |      |      |      |      |      |      | 61%  |      |      | 1,664  | 0,0872    | 5     |
| 11. Independencia cond.ext.     |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 60%  |      | 1,500  | 0,0836    | 6     |
| 12. Controles seg. Cortos       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 55%  | 1,222  | 0,0681    | 9     |
| Totales                         | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 17,940 | 1,000     |       |

Figura 2. Matriz ascendente centesimal con los atributos clave de un método de transporte. Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos se puede concluir que la velocidad no es una prioridad para los usuarios cuando se compara con el resto de los atributos contemplados, excepto el diseño. Los atributos más valorados son la seguridad del método de transporte, la disponibilidad de los destinos y su carácter ecológico, todas ellas características alcanzables para un sistema como Hyperloop.

Esto quiere decir, que la suposición de la necesidad de un método de transporte más veloz en sí mismo no es correcta, a no ser que se tengan en cuenta los otros aspectos valorados por los usuarios: la seguridad, la disponibilidad de destinos, la comodidad para el usuario o el carácter ecológico del método de transporte. Por lo tanto, si se desea apostar por un método de transporte, esta matriz muestra las características que harán del sistema una apuesta segura. Hyperloop, puede ser considerado como un método de transporte que, tal y como se está planteando, ofrecería las cuatro características principales ofreciendo además la ventaja adicional de la velocidad.

## 1.2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es analizar la tecnología Hyperloop desde el concepto propuesto por primera vez en agosto de 2013 por la empresa SpaceX hasta las oportunidades que dicha tecnología puede plantear y su viabilidad.

1. Análisis del origen del concepto.
2. Análisis de las alternativas tecnológicas para la implementación.
3. Análisis del mercado.
  - a. Empresas desarrolladoras.

<sup>4</sup> Datos obtenidos mediante la realización de encuestas.



- b. Oportunidades en el sector reparto.
- c. Oportunidades en el sector transporte.
- 4. Oportunidades para empresas.
  - a. Caso concreto: gestor de infraestructuras, servicios y energías renovables.
  - b. Cálculos propuesta de suministro energético a partir de producción renovable en rutas Hyperloop.

### 1.3. Metodología de trabajo

El trabajo será llevado a cabo por Catalina Augustin Acedo-Rico la cual atenderá a reuniones semanales con la directora para realizar un seguimiento en términos de contenido, organización y espacio temporal.

El proyecto va a ser dirigido por Brígida García Carasusan, ingeniero industrial por la Universidad de Málaga y Máster en Ingeniería y gestión de Energías Renovables por la Universidad de Barcelona, miembro del Observatorio Tecnológico y Competitivo del Departamento de Innovación de Acciona y una de las integrantes del grupo Gaia de la Universidad de Alcalá en la primera edición del *SpaceX Hyperloop POD Competition*.

La metodología propuesta tiene como finalidad la consecución de los objetivos expuestos anteriormente en el plazo que se muestra en el cronograma a continuación.

| Objetivo                      | Abril |   |   |   | Mayo |   |   |   | Junio |   |   |   |
|-------------------------------|-------|---|---|---|------|---|---|---|-------|---|---|---|
|                               | 1     | 2 | 3 | 4 | 1    | 2 | 3 | 4 | 1     | 2 | 3 | 4 |
| Investigación                 |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Selección del tema            |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Anexo B                       |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Origen concepto               |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Alternativas tecnológicas     |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Empresas desarrolladoras      |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Sector reparto                |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Sector transporte             |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Oportunidad empresas          |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Propuesta y cálculos          |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Análisis viabilidad económica |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |
| Presentación TFM              |       |   |   |   |      |   |   |   |       |   |   |   |

Figura 3. Cronograma metodología de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

### 1.4. Recursos empleados

Para la realización del proyecto se van a utilizar diversas plataformas que se pueden clasificar de la siguiente manera:



---

MEMORIA DESCRIPTIVA

---

- Plataformas para la búsqueda de información de empresas:
  - **CBInsights:** plataforma de análisis de datos sobre empresas, startups, venture capital y noticias.
  - **Tracxn:** plataforma de datos que rastrea en más de 10 millones de empresas a nivel mundial.
- Plataformas para búsqueda y análisis de propiedad intelectual:
  - **Espacenet:** base pública de patentes
  - **Derwent:** base de datos privada para el análisis de patentes.
- Plataformas para obtener información de cara a la propuesta de alimentación del sistema con energías renovables:
  - **RETScreen:** base de datos de la NASA para realizar el estudio del emplazamiento fotovoltaico según los datos de radiación solar.
  - **PVGIS:** base de datos de la UE para realizar el estudio del emplazamiento de los paneles fotovoltaicos.
  - **OpenRailWayMap:** herramienta para la consulta de las rutas ferroviarias.

Herramientas para el desarrollo del Trabajo de Fin de Máster:

- Word
- Excel
- PowerPoint
- One Note



## Capítulo 2. Estado del arte

En esta sección se introduce el concepto de Hyperloop y sus orígenes. Asimismo, se hace una comparativa de esta tecnología con sus principales competidores en términos de innovación, características y capacidades.

### 2.1. Origen del concepto

El concepto de Hyperloop surge por primera vez en el documento *Hyperloop Alpha* publicado por la empresa SpaceX en 2013. En este documento, Hyperloop es definido como un quinto método de transporte, es decir, una nueva alternativa a los aviones, coches, trenes y barcos. Hyperloop consiste en el transporte de mercancías y personas mediante tubos en condiciones de baja presión, contruidos sobre pilares de hormigón, que permiten la circulación de cápsulas que levitan a una velocidad de hasta 1.200 km/h. Por lo que conceptualmente puede considerarse un híbrido entre tren y avión. [25]

Hyperloop Alpha propone una ruta que se extiende desde Los Ángeles hasta el área de la Bahía de San Francisco en 35 minutos, batiendo en tiempo y precio al resto de medios de transporte.



Figura 4. Esquema ruta alpha Hyperloop. Fuente: Hyperloop Alpha.

Sin embargo, no es la primera vez que se considera un sistema similar. En 1910, Robert Goddard, ingeniero estadounidense considerado uno de los creadores del primer cohete ya había planteado un sistema cuyo fundamento se basaba en el vacío de los tubos y la levitación magnética.

Elon Musk, físico y empresario fundador de las empresas Tesla y Space X<sup>5</sup> ha sido uno de los principales precursores de Hyperloop en los últimos años. Junto a su empresa SpaceX descartan la viabilidad técnica y económica de generar un

<sup>5</sup> Tesla, empresa estadounidense de fabricación de vehículos eléctricos de alta gama y productos complementarios como baterías. Space X, empresa estadounidense privada del sector aeroespacial.



vacío en un sistema como el mencionado y plantea la utilización de tubos a baja presión en lugar de al vacío, bautizando el concepto como Hyperloop.

## SpaceX Hyperloop POD Competition

Para fomentar y acelerar el proceso de diseño e implantación de Hyperloop, la empresa SpaceX anunció el 15 de junio de 2015 el patrocinio de una competición llamada *SpaceX Hyperloop POD Competition*, de ahora en adelante SXHPC, en la cual invitaban a grupos universitarios y no universitarios a nivel mundial a proponer diseños para las cápsulas de este sistema. SpaceX preparó un documento llamado *SpaceX Hyperloop Test-Track Specification* en el cual determinaban las características estructurales básicas del tubo por donde se desplaza el *pod* o cápsula de pasajeros de modo que los grupos tuviesen unas bases a las que ajustarse, pero suficiente libertad para proponer diferentes alternativas en el diseño en cuanto a los subsistemas de propulsión, levitación, estructura del pod, estabilización y comunicación. Esta primera edición de la competición estuvo dividida en tres fases y dos categorías, **solo diseño o diseño y construcción**. En sucesivas ediciones se ha eliminado la opción de solo diseño. A continuación, se describen las tres fases asociadas a la categoría diseño y construcción, estructura que se ha mantenido en posteriores ediciones. [60]

### 1. FASE I: Presentación de diseños

La primera fase de la competición tuvo lugar en septiembre de 2015. Esta fase contó con la participación de más de 1.000 grupos de los cuales solo 115 fueron seleccionados para la siguiente fase.

### 2. FASE II: Design Weekend

La segunda fase tuvo lugar en enero de 2016 en la universidad de Texas, A&M. En esta fase los 115 seleccionados tenían la oportunidad de presentar de manera presencial sus diseños tanto a los jueces de la competición, ingenieros de Space X, como a posibles patrocinadores que financiaran la construcción de los prototipos para los 30 seleccionados que pasaran a la última fase.

### 3. FASE III: Competition Weekend

Los 30 finalistas de la segunda fase pudieron probar sus modelos construidos a escala en la competición que tuvo lugar en enero de 2017 en Hawthorne, California.

El primer premio fue para Delft Hyperloop de la Technical University de Delft. Sin embargo, WARR Hyperloop de la Universidad Técnica de Munich ganó los máximos honores alcanzando la velocidad máxima en la primera edición y superando consecutivamente su marca en ediciones posteriores hasta lograr una velocidad de 323 km/h en la pista de prueba de 1 milla de longitud. La pista de prueba que se utiliza en esta competición no está presurizada.

## 2.2. Antecedentes

Como ya se ha mencionado, la idea de transportar mercancías y personas en tubos modificando la presión de los mismos para reducir el rozamiento y así aumentar eficiencia y velocidad no es original de Elon Musk y su empresa SpaceX. En 1910 el ingeniero estadounidense Robert Goddard, considerado uno de los creadores del primer cohete, ya había planteado un sistema cuyo fundamento se basaba en el vacío casi absoluto de los tubos y la levitación magnética. [56]

La Figura 5 muestra un eje cronológico con una selección de los principales hitos en la historia relacionados con la evolución de la tecnología que ha favorecido al transporte de mercancías y de personas.

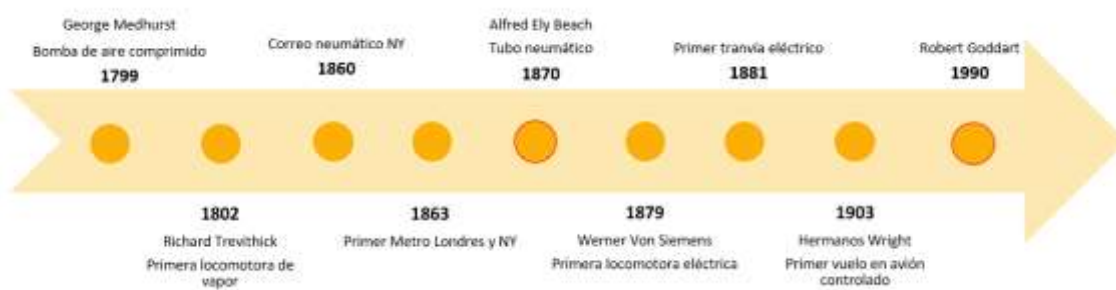


Figura 5. Hitos importantes en la historia del transporte. Fuente: Elaboración propia.

Una analogía comúnmente utilizada para la explicación del concepto de Hyperloop es la de los tubos neumáticos que se utilizaban para realizar envíos rápidos de mercancías ligeras, paquetes o cartas, en ciudades como Nueva York en la época de 1860. Actualmente algunos establecimientos, como por ejemplo supermercados, siguen utilizando estos tubos. Sin embargo, el principio de funcionamiento de estos tubos no consiste en un sistema de propulsión eléctrico combinado con un sistema de levitación magnética como Hyperloop, sino en utilizar aire. Este sistema es posible gracias a los sucesivos desarrollos que se han ido realizando a partir de la primera bomba de viento para comprimir aire desarrollada y patentada por George Medhurst en 1799. [24]

En 1861, la Pneumatic Dispatch Company con intención de crear un sistema lo suficientemente grande para transportar paquetes de mayor tamaño o mayor cantidad de paquetes, terminó por construir un sistema lo suficientemente grande como para mover a una persona. Aunque el sistema no se utilizó para este fin, el 10 de octubre de 1865, en la inauguración de la nueva estación de Holborn el Duque de Buckingham y algunos de los directores de la compañía, fueron impulsados a través del tubo hasta Euston en un viaje de 5 minutos de duración lo que supuso el primer viaje de una persona a través de un tubo neumático. La Figura 6 muestra una estampa del sistema de transporte de mercancías de las empresa.

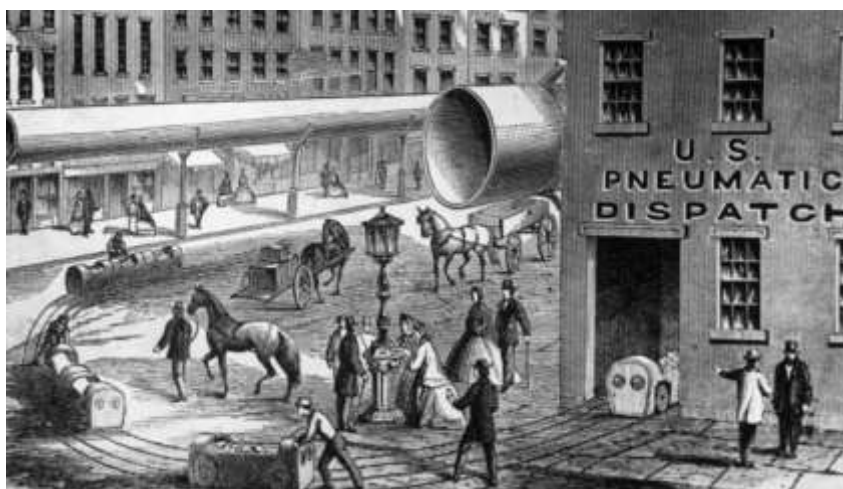


Figura 6. Estampa de la empresa estadounidense *Pneumatic Dispatch*.

En 1870 Alfred Ely Beach, hijo del fundador de la famosa revista de divulgación científica *Scientific American*, quien trabajó como editor y abogado de patentes, diseñó un sistema para escalar la tecnología de los tubos neumáticos y así permitir transportar un vagón con capacidad para 12 pasajeros entre las estaciones de Warren Street y Broadway. La Figura 7 muestra una estampa del diseño de Alfred Ely Beach siendo presentado en la feria del *American Institute* de 1867. [64]

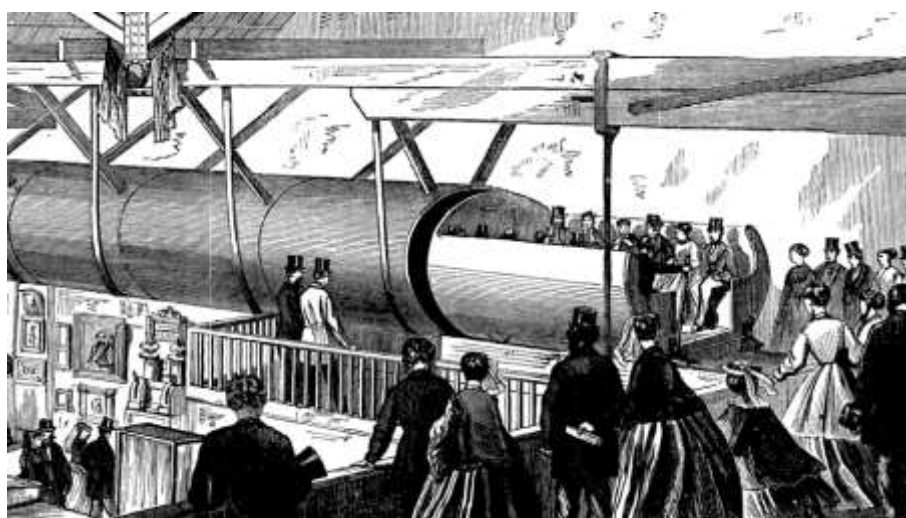


Figura 7. Estampa del diseño de Alfred Ely Beach basado en tubos neumáticos.

En paralelo al desarrollo de los sistemas neumáticos, Richard Trevithick centró sus esfuerzos en el desarrollo de la primera locomotora de vapor que data de 1802. Las locomotoras de vapor se reservaban para su uso en minas de carbón hasta que George Stephenson diseñó la primera locomotora que prestó servicio público para el transporte de cargas en 1814. Gracias a estos desarrollos en 1863 surgieron los primeros métodos de transporte de personas en las ciudades de Londres y Nueva York que funcionaban con locomotoras de vapor. [53] [50]

No obstante, todos estos sistemas quedaron en desuso cuando en 1879 Werner Von Siemens presentó la primera locomotora eléctrica que permitió la construcción de un tren que consistía en una locomotora y tres coches que eran impulsados por un motor de 2,2 kW y que permitió el transporte de pasajeros en una vía circular de 300 metros de largo a una velocidad máxima de 13 km/h. La evolución al primer tranvía eléctrico también vino de la mano de Werner Von Siemens en Berlín en 1881. [53][51]

Dado que Hyperloop es considerado un híbrido entre el tren y el avión también es importante destacar los hitos relacionados con la historia de la aviación como el primer vuelo tripulado realizado por los hermanos Wright en 1903 tal y como se muestra en la Figura 8. [52]



*Figura 8. Fotografía primer vuelo tripulado, hermanos Wright.*

## 2.3. Tecnología de los transportes actuales

La innovación, en términos disruptivos, de los sistemas de transporte con los que se compara a Hyperloop, avión y/o tren, se ha estancado en los últimos años a pesar de los esfuerzos de Japón y China que han continuado investigando y desarrollando tecnologías como la levitación magnética en el sector ferroviario.

El principio de funcionamiento de la tecnología Hyperloop es la levitación con la que se suprime el efecto de rozamiento debido al contacto de las ruedas con la vía y la reducción de la densidad del aire en los tubos a baja presión para poder realizar un transporte rápido y de bajo consumo en velocidad de crucero. Al contrario que los aviones, Hyperloop no tiene que ascender para encontrar dichas condiciones de operación si no que propone establecer las condiciones de baja presión a nivel de corteza terrestre.

## MEMORIA DESCRIPTIVA

En términos de velocidad, existen distintos modelos de avión que cubren un amplio rango de velocidades. Los aviones supersónicos pueden alcanzar hasta los 3.500 km/h. No obstante, no se realizan vuelos comerciales en este tipo de aviones debido a su alto coste de producción y su corto alcance. La velocidad de los aviones de las compañías aeronáuticas dedicadas al transporte tanto de personas como de mercancías se encuentra en torno a 1.040 km/h. La principal ventaja de los aviones, además de la velocidad, es que no necesitan infraestructura que conecte los puntos de partida e inicio de trayecto, simplemente se necesitan aeropuertos en origen y destino. Sin embargo, al contrario que un tren, un vuelo comercial obliga a los pasajeros a tener que realizar controles de seguridad que requieren la presencia de los pasajeros en los aeropuertos con un mínimo de una o dos horas de antelación. Otro de los inconvenientes asociados a un viaje en avión es la restricción de equipaje, no sólo en cuanto a la prohibición de volar con ciertos objetos, sino a la cantidad de equipaje con la que se desea viajar. Adicionalmente, la frecuencia de servicios de avión conectando dos puntos no es comparable a la del tren. La Figura 9 muestra unas imágenes de estos dos tipos de avión. [8]



Figura 9. Imágenes avión supersónico y comercial. Fuente: [8]

Por lo tanto, si bien el tren alcanza velocidades inferiores que un avión, existe un número considerable de usuarios que prefiere invertir el tiempo que perdería en los trámites del aeropuerto en trabajar o relajarse durante un trayecto en tren. Al igual que con el avión existen distintos tipos de trenes que contemplan un amplio rango de tecnologías y velocidades.

Según la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC), se considera tren de alta velocidad aquel que alcanza una velocidad igual o superior a los 200 km/h en líneas ya existentes y 250 km/h en líneas específicamente diseñadas para ello. Los primeros trenes de alta velocidad en Europa surgen en los años 60, siendo España e Italia los países pioneros y uniéndose en décadas posteriores Alemania y Francia. El primer tren comercial de alta velocidad en el mundo fue inaugurado en Italia en el año 1939, el ElettroTreno ETR 200. Sin embargo, se considera a los japoneses como los verdaderos pioneros del tren de alta velocidad gracias al modelo Shinkansen de la década de los 60. El atractivo de este tipo de transporte propició las primeras investigaciones de la aplicación de la tecnología de levitación a los trenes, la cual comenzó en Japón en 1962. [35]

La Figura 10 muestra una comparativa de los diseños y velocidades máximas operativas de los trenes más rápidos del mercado. El modelo francés de alta

MEMORIA DESCRIPTIVA

velocidad TGV (*Train à Grande Vitesse*) obtuvo el récord mundial de velocidad de un tren sobre raíles en 2009 alcanzando los 575 km/h.

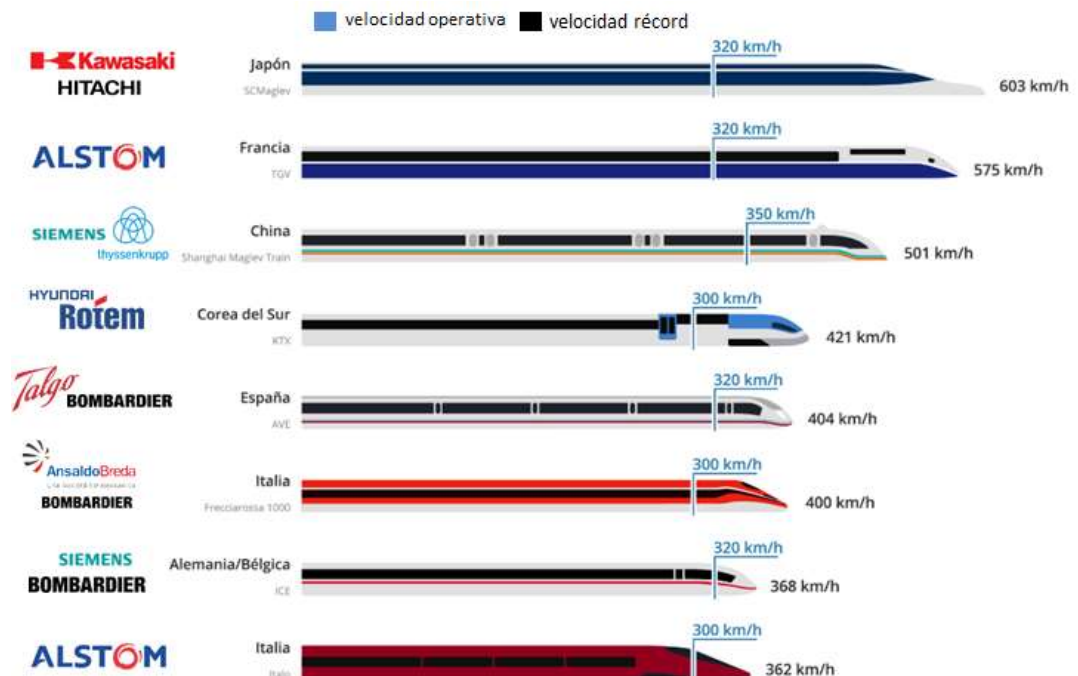


Figura 10. Comparativa trenes de alta velocidad. Fuente: GoEuro. [28].

No obstante, el récord mundial de velocidad en el ámbito de los trenes lo ostenta el modelo japonés Maglev con 603 km/h. Este tren, mostrado en la Figura 11, recibe su nombre de la tecnología que lo conforma, la levitación magnética. Su línea tiene una distancia total de 30 km, siendo capaz de completarla en aproximadamente 7 minutos y medio. El sistema de transporte Hyperloop se presenta como una versión mejorada del tren de levitación magnética.



Figura 11. Imagen del tren de levitación magnética japonés Maglev. Fuente: [41]

La razón por la cual se consiguen velocidades superiores con un sistema de levitación magnética se debe a que el desplazamiento no lleva asociado un aumento de la resistencia a medida que se aumenta la velocidad. Es cierto que la levitación magnética también causa resistencia debido al campo magnético, conocida como **drag force**, sin embargo, una de sus principales ventajas es que, a mayor velocidad de desplazamiento de la cápsula o vagón, menor será la resistencia magnética sobre la misma, lo que favorece alcanzar velocidades superiores.

La Figura 12 muestra el diagrama de fuerzas sobre una rueda en un sistema ferroviario. Al aumentar el par motor crecen las fuerzas del contacto de la rueda con el suelo hasta alcanzarse lo que se conoce como el **límite de adherencia**. Es decir, los sistemas que utilizan ruedas tienen restringida la velocidad por este límite pues si se supera las ruedas comenzarían a deslizar sobre los raíles. Adicionalmente, el desplazamiento en un sistema con ruedas lleva asociado un aumento de la resistencia a medida que se aumenta la velocidad lo cual se opone al concepto de diseño de Hyperloop y su objetivo de conseguir velocidades de hasta 1.000 km/h.



Figura 12. Diagrama de fuerzas. Fenómeno de adherencia. Fuente: [3]

## 2.4. Tecnología de Hyperloop

La tecnología de Hyperloop se compone de varios sistemas: levitación, estabilización, propulsión, comunicación, refrigeración y otros sistemas relacionados con la seguridad. Estos sistemas permiten conseguir la levitación y el movimiento de las cápsulas, también conocidas como vainas, vagones o pods, dentro de los tubos de vacío. A continuación se detalla la tecnología detrás de cada uno de estos sistemas.

## Sistema de levitación

Este sistema es uno de los más importantes pues gracias a él se consigue eliminar el rozamiento existente en los trenes convencionales debido al contacto de las ruedas con los raíles. De manera genérica existen dos alternativas para conseguir levitación: (i) mediante la utilización de aire y (ii) levitación basada en el principio de magnetismo. La siguiente figura muestra un resumen de las alternativas que se van a explicar a continuación. [44] [61][62]

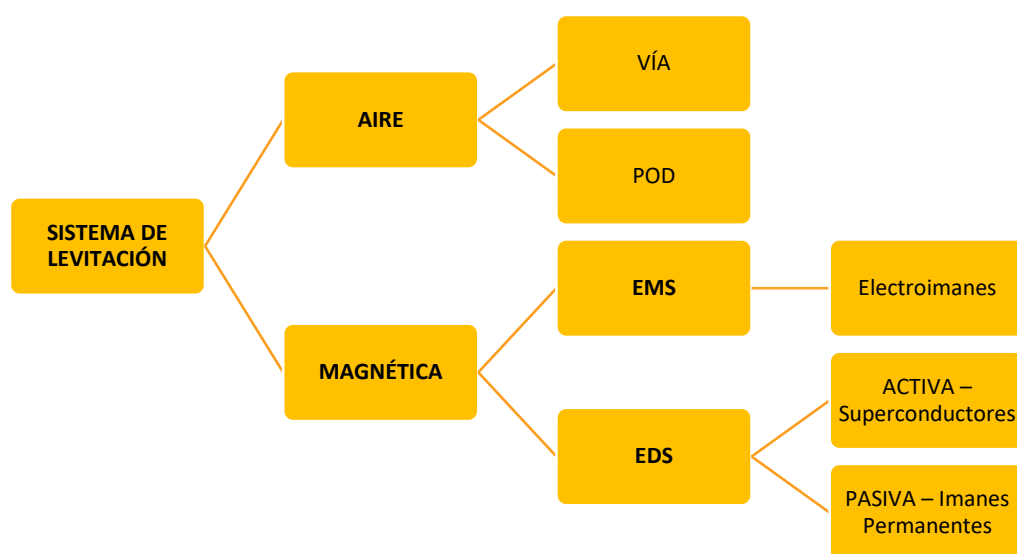


Figura 13. Resumen sistema de levitación. Fuente: Elaboración propia.

### Levitación por aire

Esta alternativa se contradice con el principio básico de Hyperloop de generar vacío en el interior de los tubos. No obstante, a continuación se explican las dos alternativas existentes en el caso de utilizar **levitación por aire** para el sistema Hyperloop, tal y como propone el documento *Hyperloop Alpha* de SpaceX.

La **primera alternativa** sería **expulsar aire comprimido desde la parte inferior de la pista** para empujar el pod y así hacerlo levitar. Este sistema es el que utilizan las mesas de *Air Hockey* de las salas de juegos recreativos. Sin embargo, **esta alternativa no se contempla** por dos razones. En primer lugar, carece de sentido llenar de aire un tubo en el que se está intentando generar vacío para reducir el rozamiento. En segundo lugar, Hyperloop está pensado para conectar puntos situados a grandes distancias por lo que la construcción de un sistema así sería costosa e ineficiente.

La **segunda alternativa** es **expulsar el aire directamente desde la cápsula** lo cual queda descartado por varias razones. En primer lugar, se trata de inyectar aire en un tubo en el que mediante otro mecanismo se pretende generar el vacío y, en segundo lugar, el almacenamiento de aire comprimido en tanques dentro de la vaina no solo podría comprometer la seguridad, sino que limitaría la capacidad del transporte. En esta línea, Elon Musk en el documento Hyperloop Alpha, plantea conceptualmente la instalación de un compresor en la parte delantera de la cápsula, tal y como se muestra en la Figura 14 de forma que se absorba el aire de delante de la cápsula y se derive una parte para permitir la levitación del pod y el sobrante se derivase a la parte trasera para paliar los efectos asociados al **Límite de Kantrowitz**.

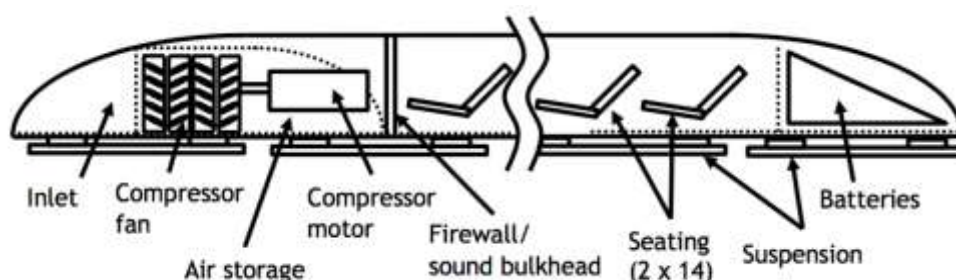


Figura 14. Esquema de la cápsula de pasajeros. Fuente: Hyperloop Alpha. [25]

El límite de Kantrowitz es una restricción de velocidad para una relación dada entre el área de la cápsula y el área del tubo. A medida que el aire en el tubo se mueve hacia y alrededor del área de sección transversal entre la vaina y el tubo, el flujo de aire debe acelerarse debido al **principio de continuidad**. Si la cápsula viaja a través del tubo lo suficientemente rápido, el flujo de aire alrededor de la cápsula alcanza la velocidad del sonido y se ahoga, resultando en una gran resistencia del aire en la cápsula. Para evitar este límite de velocidad existen dos alternativas. La primera es la instalación del mencionado compresor, para lo cual serían necesarios sistemas complementarios que aumentarían la complejidad técnica del diseño de las vainas. La segunda sería aumentar el diámetro del tubo para proporcionar más área de derivación para el aire alrededor de la cápsula, evitando que el flujo se asfixie. Sin embargo, esta solución incrementaría los costos de la infraestructura de Hyperloop. [25][40]

### *Levitación magnética*

La **levitación magnética** se consigue mediante la interacción de campos magnéticos que dan lugar a fuerzas de atracción o de repulsión en función del sistema que se utilice: (i) suspensión electromagnética conocida como EMS, por sus siglas en inglés o (ii) suspensión electrodinámica también conocida como EDS. La principal diferencia entre un sistema EMS y un EDS es que, en el primero, la levitación del tren es producida por la atracción entre los electroimanes colocados en el vehículo y la vía, mientras que en el segundo la levitación se consigue gracias

a las fuerzas de repulsión generadas entre los imanes permanentes o superconductores del vagón y la vía.

La Figura 15 muestra el principio de funcionamiento de un **electroimán**. Mediante una fuente externa se hace pasar una corriente por una bobina de material conductor generando un campo magnético que se orienta según la ley de la mano derecha y que desaparece al quitar la corriente (despreciando la remanencia). La principal ventaja de los electroimanes es que son capaces de hacer levitar las vainas incluso estando paradas. Otra ventaja es la posibilidad de regular la corriente y por tanto obtener un mayor control, no obstante, para conseguirlo es necesaria una fuente de tensión. [18]

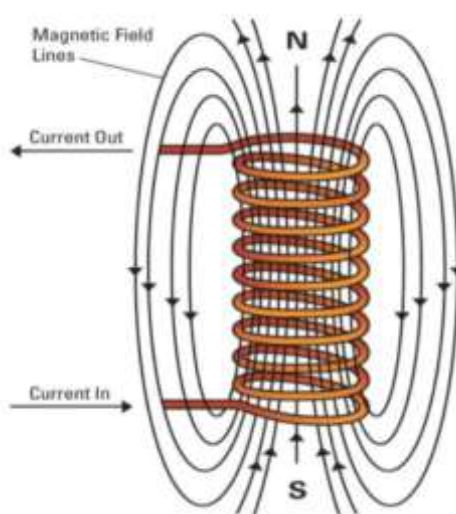


Figura 15. Funcionamiento de un electroimán. Fuente: [18].

Los **imanes permanentes** están hechos de un material magnético que lleva asociado un campo magnético determinado en función de las características del material. Por lo tanto, la ventaja de este sistema es que no depende de fuente externa para generar el campo. Por su parte, el campo magnético asociado es constante *c.p.* por lo que si se quiere actuar sobre él es necesario instalar sistemas adicionales para controlar los efectos del mismo. Actualmente existen en el mercado diferentes materiales que proporcionan campos magnéticos de mayor o menor intensidad en función de sus propiedades. El imán más potente del mercado y que se propone para este uso es el **neodimio**. Este imán genera un campo magnético constante en el tiempo siempre y cuando no se supere una cierta temperatura por lo que no se necesita ningún control electrónico simplificando su uso y mantenimiento. Otra ventaja de los imanes permanentes con respecto a los electroimanes es que crean un campo magnético más potente en comparación con su tamaño, lo cual es importante ya que el espacio disponible en las cápsulas es limitado. [21]

Los **superconductores** son materiales que a baja temperatura presentan superconductividad. En este grupo se encuentran por ejemplo el mercurio, plomo, aluminio o estaño. En cuanto al método de funcionamiento, pueden considerarse un híbrido entre los electroimanes y los superconductores. Al igual que los electroimanes, son un elemento magnético activo, es decir, que necesita ser energizado para funcionar, no obstante, su principio de funcionamiento es la repulsión al igual que los imanes permanentes, lo que explica su aplicación en EDS. Los campos magnéticos que se consiguen con los superconductores son mucho mayores que los de los electroimanes. Sin embargo, necesitan una potente refrigeración puesto que, si se supera una cierta temperatura sus propiedades magnéticas se deterioran. [61]

#### *Suspensión electromagnética, EMS*

La aplicación de **suspensión electromagnética** para la levitación de un tren al funcionar por atracción puede presentar dos configuraciones, la primera mostrada en la Figura 16 en la cual la parte inferior del tren queda por debajo de la guía, y la segunda colocando los electroimanes en la parte superior del tren. La guía por su parte está formada por un material ferromagnético.

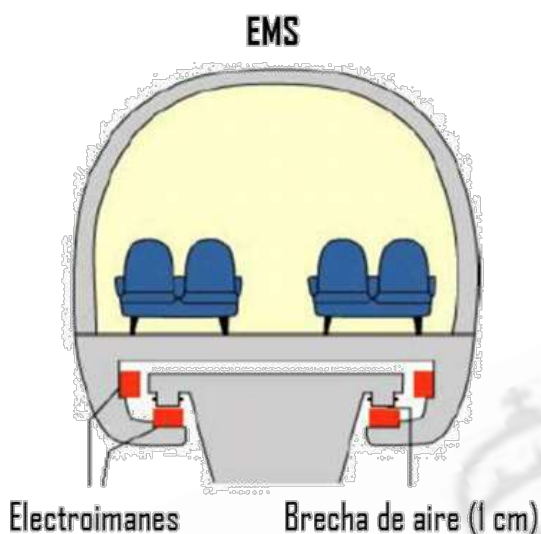


Figura 16. Esquema de suspensión electromagnética, EMS.

Este tipo de suspensión utiliza electroimanes adheridos al tren que son controlados electrónicamente. Al hacer circular la corriente por las bobinas del electroimán, estos se activan generando una fuerza de atracción hacia la vía de tal modo que, al permanecer esta inmóvil, se consigue la levitación del vagón a una distancia de aproximadamente 1 cm de la vía. Además de hacer levitar el tren, este tipo de trenes utilizan electroimanes colocados en los laterales con el mismo funcionamiento que los anteriores pero cuyo cometido es la guía lateral del vagón.

## MEMORIA DESCRIPTIVA

Si bien la principal ventaja de este tipo de sistemas es que, gracias al uso de electroimanes, se puede conseguir levitación incluso en parado, la principal limitación de la EMS es su inestabilidad. Si los electroimanes se acercan a la vía la fuerza de atracción crece por lo que, aunque el sistema de control de la corriente pueda contrarrestar este hecho, existe un alto riesgo de vibraciones o incluso de contacto entre el tren y la vía.

Además, este sistema necesita un alto mantenimiento pues exige que las vías tengan una alineación milimétrica y con poca tolerancia que puede verse comprometida por condiciones ambientales como, por ejemplo, terremotos. Esta tolerancia no puede ampliarse si no es a costa de incrementar notablemente la necesidad de energía y por lo tanto los costes de operación del sistema.

*Suspensión electrodinámica, EDS*

La **suspensión electrodinámica** se basa en el llamado **Efecto Meissner**, es decir, en la capacidad de algunos materiales de rechazar cualquier campo magnético que intente penetrar en ellos. Para conseguir la levitación del pod se pueden emplear tanto imanes permanentes, para conseguir un campo magnético de forma pasiva, como superconductores, para conseguir un campo magnético más controlado en el caso de disponer de alimentación externa.

La Figura 17 muestra un posible esquema de situación de los distintos elementos que intervienen en la levitación. Se instalan los imanes permanentes o superconductores en el pod y unas bobinas o planchas de material ferromagnético en las vías.

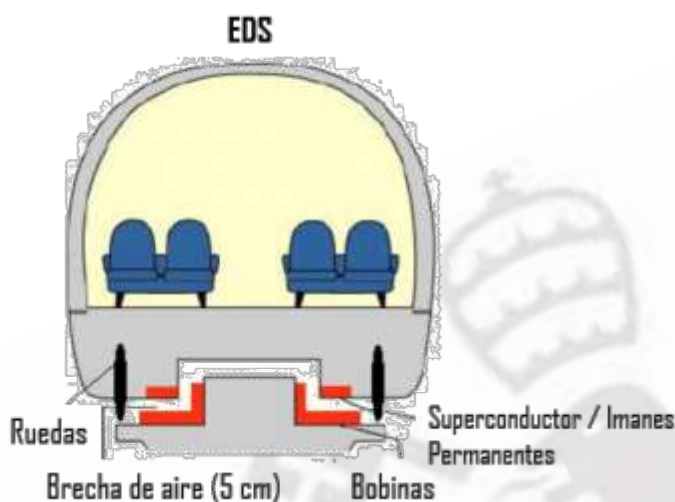


Figura 17. Esquema de suspensión electrodinámica, EDS.

En el caso de utilizar **imanes permanentes**, es necesaria una velocidad inicial en el pod para que la levitación tenga lugar, ya que el principio de funcionamiento se basa en el fenómeno de inducción regido por la **Ley de Faraday**.



$$\varepsilon = - \frac{\delta \Phi}{\delta t}$$

Donde  $\varepsilon$  es la tensión y  $\Phi$  es el flujo magnético.

El movimiento de los imanes induce corrientes en las bobinas de la vía las cuales se comportan entonces como electroimanes generando un campo magnético. Este campo magnético interactúa con los imanes permanentes montados en el vagón produciendo la levitación gracias a la capacidad de estos de rechazar las líneas de campo magnético que tratan de entrar en ellos. Este sistema permite que, por encima de una velocidad mínima, a medida que se aumenta la velocidad, el tren levite a una altura y con una fuerza de levitación constante conocida como *lift force*. A velocidad constante, la energía que demanda el pod se limita a la necesaria para vencer la resistencia del aire y la resistencia electromagnética conocida como *drag force* que se genera por el uso de los imanes permanentes. La ventaja de utilizar imanes permanentes para la EDS es que es un sistema pasivo, es decir, no necesita alimentación externa para generar el campo magnético del pod, solo se necesita el movimiento relativo del vagón con respecto a la vía para despegar.

Debido a la dependencia de movimiento relativo entre el vagón y la vía este sistema implica la necesidad de incorporar ruedas que soporten el vagón tanto en parado como en las velocidades inferiores a la velocidad de despegue. Éstas ruedas no suponen ningún tipo de fricción cuando el tren viaja a velocidad de crucero pues levitan con él.

Por su parte, el funcionamiento del sistema de levitación cuando se utilizan **superconductores** es activo y de repulsión. Es decir, se consigue la levitación por fuerzas de repulsión entre los superconductores y la vía gracias a la electrificación del material superconductor para conseguir generar el campo. Una desventaja derivada de la utilización de superconductores es la dependencia energética puesto que además de necesitar activar los superconductores es necesario disponer de un potente sistema de refrigeración para evitar que estos alcancen temperaturas que comprometan la operabilidad del sistema. **Esta es la tecnología instalada en el tren japonés Maglev.**

Una de los aspectos positivos de la utilización del sistema EDS es que permite una distancia de elevación mayor que EMS (entorno a 5 cm) lo que consigue que el rango de tolerancia sea superior al de EMS convirtiéndolo en un sistema más robusto.

La principal desventaja de utilizar EDS es el campo magnético sobre la cabina de pasajeros. Si se expone al ser humano a un valor superior a 10 Gauss ( $10^{-3}$  Teslas) de manera continuada podría causar enfermedades como el cáncer. Para asegurarse de que el campo magnético está por debajo de ese valor, es necesario realizar **aislamiento magnético** de los superconductores o imanes permanentes. Para ello, existen revestimientos magnéticos con materiales específicos, por



## MEMORIA DESCRIPTIVA

ejemplo, el **mu-metal**, que gracias a su alta permeabilidad proporciona una ruta de baja resistencia para el flujo magnético actuando por lo tanto como un escudo que asegurarían la protección de los pasajeros en la cabina. Esto contrasta con el sistema EMS, en el cual el campo magnético se concentra en el espacio entre el vagón y la vía. Fuera de esta brecha, la intensidad del campo magnético disminuye de tal manera que en la cabina donde viajan los pasajeros, la intensidad es comparable con la del campo magnético terrestre lo que permite obviar la instalación de sistemas de aislamiento magnético adicionales. [46] [47]

Por todo ello, aunque el documento original *Hyperloop Alpha* publicado por SpaceX sugiere que el sistema debería evitar la levitación magnética debido a los altos costes que esta supone, esta ha terminado siendo la tecnología por la que apuestan los desarrolladores de Hyperloop. De las alternativas estudiadas, quedan descartados los sistemas basados en ruedas y los sistemas de levitación con aire. La levitación magnética reduce la fatiga y la vibración producidas por las ruedas en su contacto con los raíles como sucede en los trenes convencionales. Adicionalmente se reduce el ruido y las operaciones de mantenimiento que haría falta para hacer frente al desgaste de ruedas, rodamientos y demás componentes móviles, así como de los raíles.

La elección del tipo de sistema de levitación magnética a utilizar (electroimanes, superconductor o imanes permanentes) así como la cantidad y su disposición en la vaina forman parte de los parámetros de diseño de las distintas empresas desarrolladoras o equipos que se presentan anualmente a la SXHPC. Estos parámetros se obtienen mediante el planteamiento de ecuaciones de magnetismo y se resuelven utilizando softwares matemáticos y de diseño que permiten calcular y comprobar las hipótesis en un proceso iterativo.

## Sistema de estabilización

[44] Este sistema está muy ligado al sistema de levitación pues se utilizan los mismos principios para estabilizar los vagones que para hacerlos levitar. La Figura 18 muestra los tipos de movimiento que pueden experimentar las cápsulas conocidos como cabeceo, alabeo y guiñada (del inglés *pitch*, *roll* y *yaw* respectivamente).

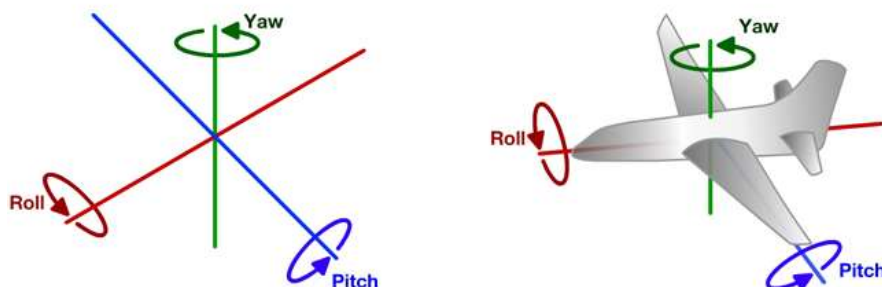


Figura 18. Identificación de las posibles perturbaciones en un vagón o cápsula. Fuente: Touring Machine Company. [48]

Si la levitación se realiza mediante un sistema activo, es decir, en el **caso de la EMS o de la EDS con superconductores**, la estabilización del vagón también ha de realizarse mediante un sistema activo basado en electroimanes o superconductores que funcionen a modo de guías para garantizar que los vagones se mantienen centrados en la vía. Este sistema es el que utiliza por ejemplo el tren Maglev como puede verse en la imagen del apartado Tecnología de los transportes actuales. La Figura 19, muestra un esquema simplificado para mayor claridad.

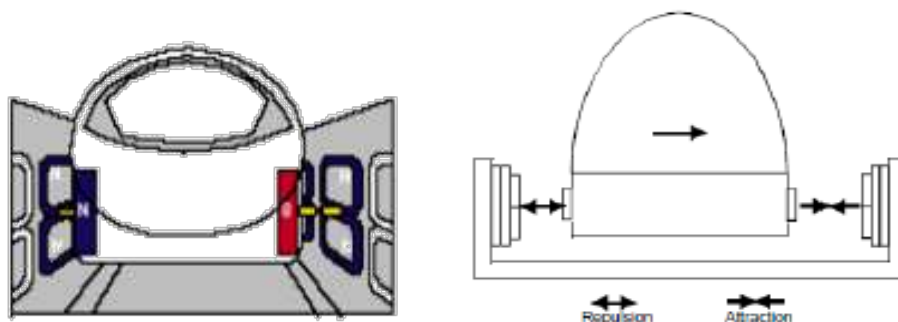


Figura 19. Esquema de las vías laterales basadas en electroimanes. Fuente: [10]

Por su parte, aquellos sistemas que utilizan levitación pasiva, **EDS con imanes permanentes**, permiten prescindir de un sistema activo en dos de las tres perturbaciones mostradas en la Figura 19. Los imanes permanentes en sí mismos forman el sistema pasivo y se encargan de compensar los movimientos de *pitch* y *roll*. Por ejemplo, cuando se produce movimiento de cabeceo o *pitch* hacia delante los imanes responsables de la levitación actúan a modo de sistema de estabilización pasiva. El pack de imanes que se encuentra en la parte delantera del vagón se acercaría a la vía, y gracias a las propiedades de los imanes permanentes, provocaría un aumento de la fuerza repulsiva sobre la vía al tiempo que la fuerza de repulsión en el pack de imanes de la parte posterior del vagón se reduciría, devolviendo el vagón a su situación inicial. De esta manera la vaina se auto estabiliza evitando que se perciban perturbaciones dentro del vehículo.

Por otro lado, para controlar el movimiento de *yaw* o guiñada se ha de instalar un sistema de estabilización activa basado en electroimanes o superconductores

colocados en el vagón a la altura de las vías. Este sistema sería análogo al que se utiliza en el caso de EMS. Si se produce una descompensación de la alineación del vagón con respecto al raíl en lo que respecta a este tipo de movimiento, el sistema de control activaría los electroimanes para generar un campo magnético paralelo al suelo a la altura de los rieles y así separarlos o juntarlos según proceda. Este sistema estaría formado por dos pares de electroimanes instalados en la parte delantera del pod y otro par en la parte trasera. La Figura 20, muestra una imagen de la parte inferior del pod donde se puede ver resaltado en rojo uno de estos pares de electroimanes.

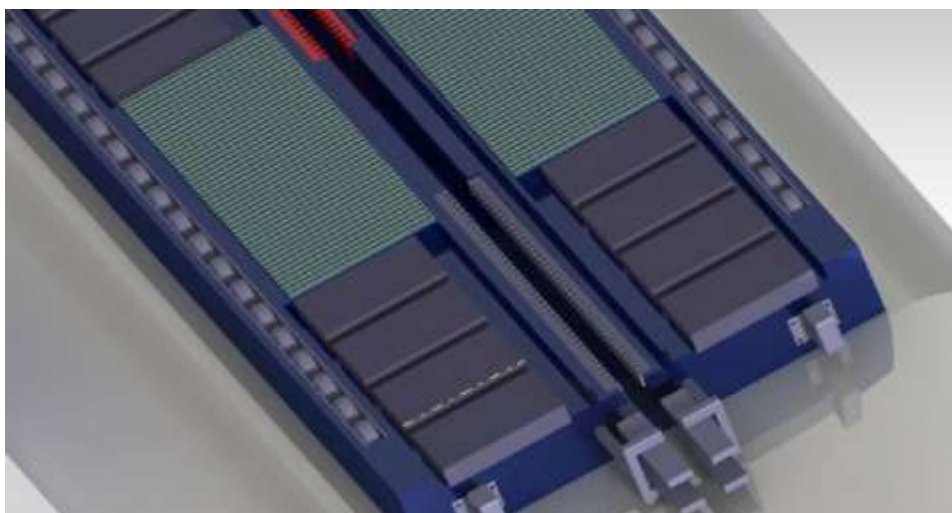


Figura 20. Vista en detalle del sistema de estabilización activo. Fuente: Gaia Final Design.

## Sistema de propulsión y frenada

[10] La propulsión en el sistema Hyperloop se logra mediante el uso de un **motor lineal**. En términos constructivos el motor lineal deriva de un motor rotativo convencional el cual es cortado y desenrollado tal y como muestra la Figura 21. Al igual que el motor rotativo, consta de una parte fija y una parte móvil, que son las vías y el pod respectivamente. Sin embargo, el movimiento que produce este tipo de motor no es de rotación si no de traslación lineal. En función de las características constructivas y de electrificación tanto de la vía como del pod se pueden distinguir dos tipos de motor lineal: **LIM (Linear Induction Motor)** y **LSM (Linear Synchronous Motor)**. El primero se utiliza en los trenes de baja o media velocidad y el segundo en trenes de alta velocidad por lo que este apartado se va a centrar en la explicación del motor LSM y sus variantes.

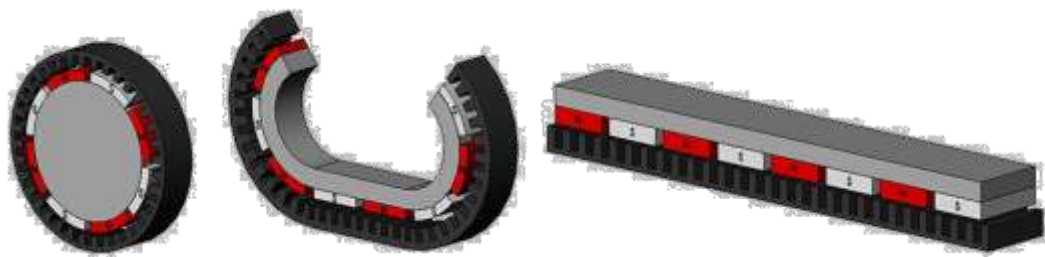


Figura 21. Esquema constructivo de la evolución del motor de inducción convencional al lineal. Fuente: Motion Control [58].

El principio de funcionamiento del **LSM** es el siguiente. El estator es un circuito de bobinas sobre la vía por el cual circula una corriente alterna trifásica controlada. El campo magnético generado por la corriente al circular por las bobinas de la vía también es conocido como **onda magnética** puesto que se mueve linealmente a lo largo de esta. Al interactuar con el rotor instalado en el pod (electroimanes, superconductores o imanes permanentes según proceda) crea una sucesión de polos norte y sur que empujan o tiran del vehículo hacia delante. La siguiente figura muestra un esquema del movimiento de la onda en la vía y la sincronización de la cápsula con el movimiento de dicha onda. La aceleración de las vainas se consigue mediante la regulación de la frecuencia de la corriente que circula por las bobinas del estator de forma que la onda viaje a mayor o menor velocidad a través de la vía.

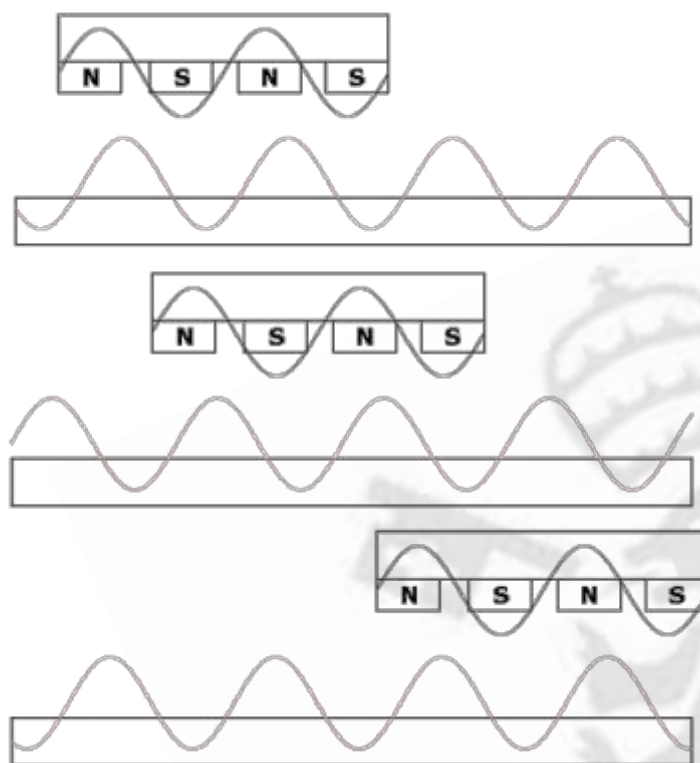


Figura 22. Esquema funcionamiento sistema de propulsión LSM. Fuente: Coasters and more.

La principal ventaja de electrificar la vía es que permite aumentar la autonomía del sistema. Dadas las propiedades de estos motores, es posible utilizar el mismo sistema de propulsión como sistema de frenada. Para ello, basta con invertir la polaridad de las corrientes que circulan por las bobinas del estator.

Existen **dos variantes** de este tipo de motor: *Long Stator* y *Short Stator*. En el **Long Stator**, el estator se encuentra en toda la longitud de la vía arrastrando el pod tal y como se ha explicado anteriormente. Este es el tipo de motor que se encuentra en los trenes de levitación magnética actuales como el Transrapid alemán o el Maglev japonés. En el caso del **Short Stator** se dispone el estator en tramos de manera estratégica a lo largo de la vía tal y como muestra la siguiente figura.

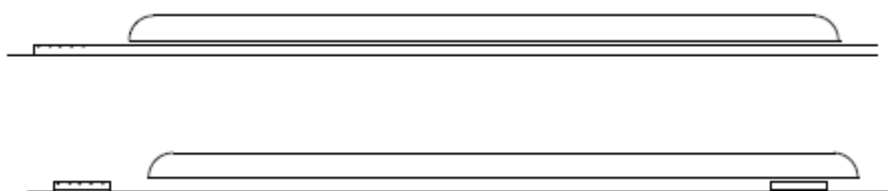


Figura 23. Configuración Long Stator y Short Stator. Fuente: BCD Engineering.

El **short stator** aprovecha las características del sistema **Inductrack** para evitar energizar toda la vía. Inductrack es un sistema de EDS pasiva basado en la tecnología utilizada para levitar volantes. El sistema se caracteriza por utilizar una disposición específica de imanes permanentes conocida como **matriz de Halbach**. La Figura 24 muestra esta disposición y las líneas de campo conseguidas. Esta configuración de los imanes permanentes permite que el pod, además de levitar conseguida una cierta velocidad, tenga una tendencia de movimiento hacia delante. Esta tendencia es la que permite evitar instalar estator a lo largo de toda la vía.

El principio de funcionamiento es el siguiente, la instalación de los imanes permanentes en el pod en la configuración de Hallbach Array permite que la cápsula tenga tendencia a deslizarse sola, es decir, el sistema estaría diseñado para impulsar o decelerar la cápsula en ciertos tramos, al igual que se hacía en el LSM, sin embargo, habría tramos del trayecto en los que no sería necesario pues los imanes permanentes mantendrían el movimiento durante una distancia determinado.

Una ventaja adicional de este tipo de configuración es que permite aumentar a casi el doble el campo magnético a un lado de la matriz y al tiempo que se reduce el campo en el lado contrario hasta casi cancelarlo por completo. Esta distribución que se consigue rotando la posición de unos imanes frente a otros es idónea para el caso de estudio pues se consigue más campo para elevar el vagón al tiempo que

MEMORIA DESCRIPTIVA

se proporciona un método de protección adicional al escudo magnético para proteger a los pasajeros en el lado opuesto. [29] [43]

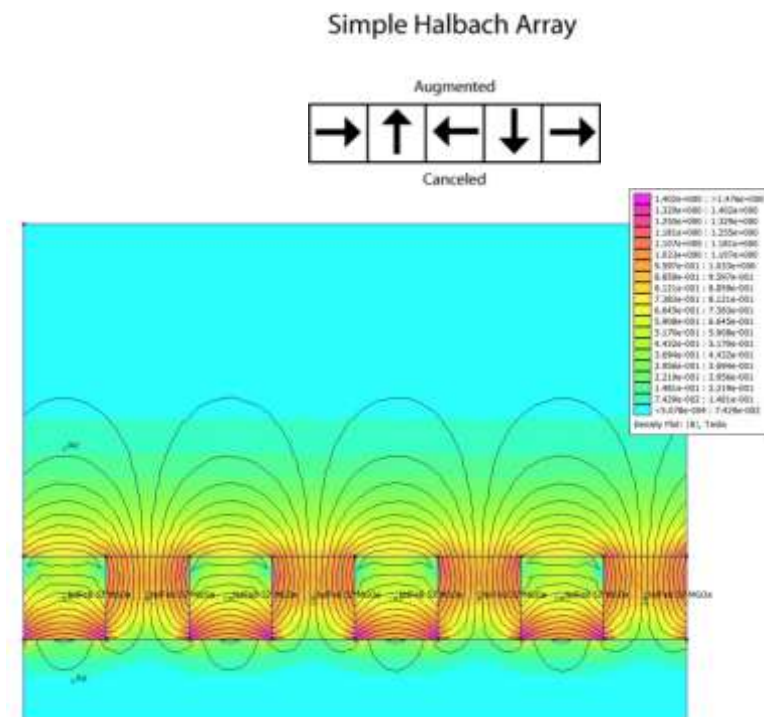


Figura 24. a) Esquema Matriz Halbach [42]. b) Líneas de campo magnético. Fuente: Gaia Final Design.

En términos de eficiencia el Short Stator se impone por lo que resulta de especial interés para una tecnología como Hyperloop en la que el vacío de los tubos favorecería la inercia del pod. Sin embargo, es posible la optimización del consumo del motor Long Stator mediante el diseño de un **sistema de vías fraccionado**, es decir, dividiendo las vías en tramos y asociando cada uno de estos a un sistema de alimentación independiente o a la propia red a través de interruptores gestionados por el sistema de control. De esta forma se evita tener que energizar toda la vía, manteniendo activos únicamente los tramos en los que se encuentren las cápsulas circulando en cada momento. La Figura 25 ilustra esta idea.



Figura 25. Esquema del diseño fraccionado de la vía.

Es importante comentar que en este apartado se han explicado los principios de funcionamiento básicos de ambos tipos de motor, sin embargo, cada empresa realiza modificaciones y protege sus creaciones dándole a sus sistemas nombres distintos, que al fin y al cabo se basan en los aquí descritos. La siguiente figura muestra un resumen de lo expuesto en este apartado.

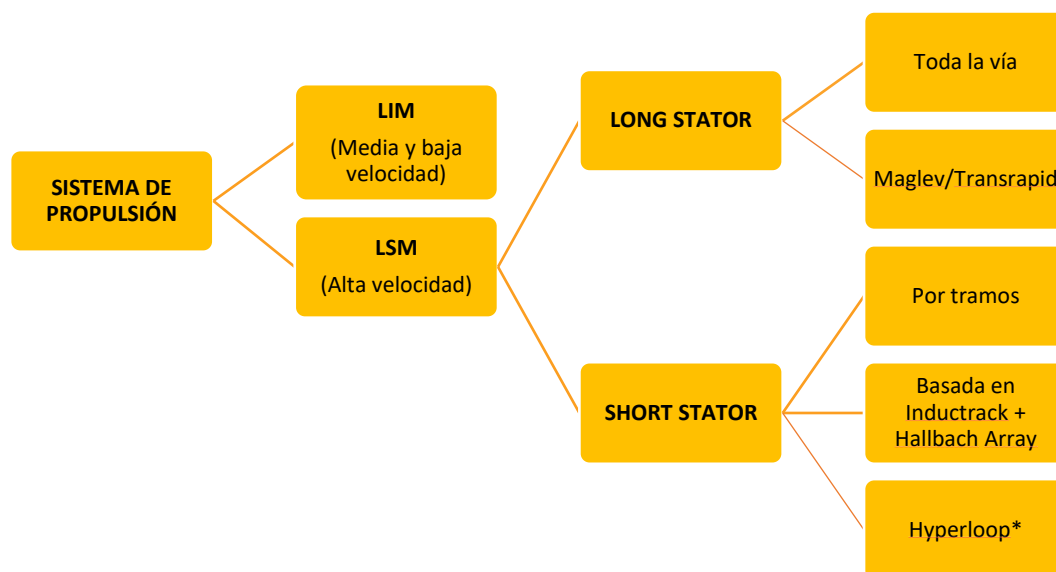


Figura 26. Resumen tipos de sistema de propulsión.

### Sistemas de seguridad

#### Sistema de parada de emergencia

Dado que Hyperloop está pensado para realizar el transporte a velocidades de hasta 1.000 km/h, es de vital importancia que se integren sistemas y planes de contingencia como por ejemplo el de parada de emergencia.

Como ya se ha adelantado el sistema de propulsión puede funcionar como sistema de frenada gracias a la inversión de la polaridad de las corrientes. Sin embargo, es necesaria la inclusión de un **sistema adicional de frenada** por si la inversión de la polaridad de la corriente de la vía no proporcionase la suficiente deceleración a las cápsulas, por fallo o a causa de alguna situación crítica que así lo requiera. De entre las distintas alternativas existentes para el diseño de este sistema, se va a explicar una alternativa consistente en la integración de zapatas de carbono. Estas zapatas se encuentran adheridas a la vaina que se utilizan a modo de freno y que deben ser diseñadas en función de las características del tubo por el que vayan a circular las vainas.

Como puede verse en la Figura 27 el sistema se compone de pastillas de carbono. Los frenos funcionan de la misma manera que los de una bicicleta, tienen

## MEMORIA DESCRIPTIVA

solo dos estados, abierto o cerrado. Cuando se active el sistema las zapatas entran en contacto con el riel para decelerar las cápsulas. La deceleración asociada a este tipo de sistema es bastante grande por lo que es importante decir que está orientado a cubrir alguna anomalía como pérdida de comunicación, pérdida crítica de altura de levitación... Existiría la posibilidad de instalar un compresor para poder proporcionar al sistema una deceleración gradual.

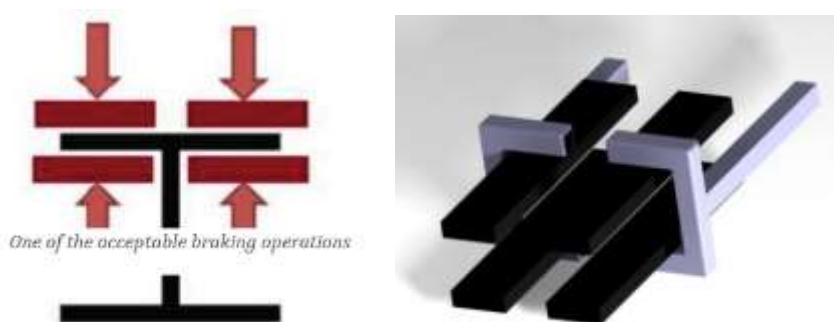


Figura 27. Esquema del sistema de parada de emergencia. Fuente: Gaia Final Design.

### SAI

El diseño debe contemplar la posibilidad de accionar dicho sistema de frenada de emergencia tanto de manera remota desde la central de operación del sistema Hyperloop como de manera manual dentro de las propias cápsulas en caso de la emergencia suponga la pérdida del control de la cápsula desde el sistema central. La integración de un **SAI** (Sistema de Alimentación Ininterrumpida) resulta imprescindible para poder proporcionar la energía necesaria para la activación de sistemas críticos dentro de la vaina como, por ejemplo, el sistema de frenada de emergencia.

### Sistema para despresurizar

La Figura 28 muestra una propuesta de un circuito de Hyperloop donde se puede ver que las paradas pueden construirse y programarse en función de la demanda y establecer las salidas (deceleración) y entradas (aceleración). El diseño del tubo debe contemplar una sección, o varias, separadas por compuertas automáticas durante las cuales se reducen gradualmente las condiciones de vacío hasta alcanzar la condición de presión atmosférica correspondiente a las paradas. Es decir, un sistema semejante a las salas de despresurización de las estaciones espaciales que funcionan de nexo entre el espacio, en condiciones absolutas de vacío y el interior presurizado de las estaciones.

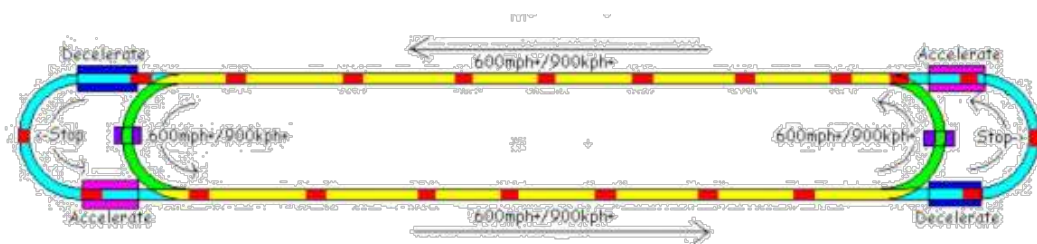


Figura 28. Esquema propuesto para el sistema de aceleración y deceleración de Hyperloop. [2]

#### FAQ's relacionadas con la seguridad

El sistema Hyperloop es intrínsecamente más seguro que el resto de métodos de transporte en algunos aspectos. Por ejemplo, en comparación con un tren convencional, al circular Hyperloop dentro de tubos, no existen cruces de nivel. Esto elimina la posibilidad tanto de atropello de personas, animales o coches como la posibilidad de que algún obstáculo en la vía lleve al sistema a colisionar.

Por otro lado, al ser un sistema inteligente, monitorizado y totalmente autónomo, no existen errores relacionados con el factor humano, el cual es el principal responsable de los accidentes en carretera. Un elemento común a todas las empresas desarrollando la tecnología es su énfasis en la seguridad. El objetivo es diseñar un sistema de transporte más seguro que los existentes y para ello disponen de equipos y personal dedicado a profundizar en este aspecto y desarrollar protocolos de seguridad.

#### ¿Es peligroso viajar a esas velocidades?

No. Dado que el sistema Hyperloop acelera y desacelera lentamente y no realiza giros bruscos, no se nota la velocidad en absoluto. Es comparable a un avión que vuela a velocidades de más de 800 km/h.

#### ¿Cuál es el radio de curvatura del sistema?

El sistema no está preparado para realizar giros bruscos, sino giros amplios. Según Ismaeel Babur, uno de los ingenieros civiles de la compañía Hyperloop One, el tren necesitaría viajar aproximadamente 9 km para girar 90 grados.

#### ¿Qué sucede en caso de despresurización repentina de los tubos?

No sería una situación grave, ni peligrosa para el ser humano. El sistema seguiría funcionando como un tren de levitación magnética normal, con mayor resistencia debido a la existencia de columnas de aire. Las consecuencias directas serían una ralentización del sistema y un mayor consumo de energía para vencer la presión de aire adicional. Adicionalmente, las cápsulas estarán construidas para soportar posibles cambios repentinos de presión de manera segura.

Además, el sistema estará monitorizado en todo momento por sensores que identificarán cualquier fuga o mal funcionamiento de la infraestructura y permitirá



## MEMORIA DESCRIPTIVA

realizar tareas de **mantenimiento predictivo** para evitar que estas situaciones lleguen a darse. El tubo dispondrá de salidas al exterior para casos de extrema emergencia o mantenimiento, para lo cual se presurizaría la sección en cuestión de la vía.

*¿Qué sucede en caso de despresurización de la cabina?*

Al igual que en los aviones las cápsulas irán dotadas de un conjunto completo de sistemas de soporte vital.

*¿Qué sucede en caso de que algún pasajero sufra alguna incidencia médica: infartos...?*

Las cápsulas contarán material de primeros auxilios como desfibriladores o inyecciones de insulina de emergencia, de modo que se pueda hacer frente a las necesidades inmediatas de los pasajeros. Por otro lado, dada la velocidad a la que está previsto que circulen las cápsulas se considera conveniente que se termine recorrido o continúen el trayecto hasta la siguiente estación donde un equipo médico pueda estar esperando al accidentado, pues sería cuestión de minutos.

## Sistema de comunicación y control

Cada uno de los sistemas que componen Hyperloop han sido diseñados teniendo en cuenta que todos han de ser coordinados por un sistema mayor, el **sistema de comunicación** y control. Este sistema permite que todos los demás trabajen de manera conjunta y armonicen la operación y funcionamiento de un sistema tan disruptivo y complicado como este. Teniendo en cuenta que las velocidades a las que se van a mover las cápsulas son muy altas, este sistema debe ser muy potente y fiable para evitar catástrofes. Para ello, Hyperloop aprovecha los beneficios de las **tecnologías** que caracterizan **la cuarta revolución industrial: IoT, Big Data y Machine Learning**.

En lugar de seleccionar un único tipo computación para el sistema IoT (Cloud, Fog, Mist, Edge Computing), **se implementa un sistema híbrido** que optimiza y distribuye el almacenamiento y la capacidad de procesamiento en función de las necesidades. En el caso de un sistema como Hyperloop, autónomo y realmente veloz, la implementación de un sistema híbrido permite que las cápsulas tengan la capacidad suficiente para tomar decisiones por su cuenta en una fracción de segundo y, al mismo tiempo, permite implementar herramientas de Big Data y Machine Learning en la nube con la combinación de los datos disponibles de todas las cápsulas y demás información relevante para la optimización del funcionamiento del sistema. De esta manera se consigue mejorar tanto el rendimiento de las cápsulas y tubos como el del sistema en conjunto.

A continuación se explican los puntos fuertes y débiles de los distintos tipos de computación seleccionados y su área de implementación, así como los beneficios derivados de la combinación de ambos sistemas.



### *Edge and Mist Computing*

Consiste en la instalación de sistemas inteligentes con capacidad de computación lo más cerca posible de las fuentes generadoras de datos y de los actuadores. A este respecto se pueden distinguir dos variantes:

- **Edge Computing:** implementar sensores inteligentes con capacidad de computación integrada.
- **Mist Computing:** en ausencia de sensores inteligentes instalar la capacidad de computación en un dispositivo independiente pero cercano a los sensores y actuadores.

El objetivo de este tipo de sistema es poder reducir al máximo el proceso de toma de decisión y la latencia entre la detección de un evento por parte de los sensores y la ejecución de las instrucciones necesarias por parte de los actuadores. Por ello, este tipo de sistema será necesario en aquellas tareas consideradas críticas tanto para la seguridad como para el buen funcionamiento de Hyperloop.

Otra de las ventajas asociadas a la implementación de sistemas inteligentes a bajo nivel es la posibilidad de filtrar y limpiar los datos brutos recogidos por los sensores antes de que estos sean enviados a la nube. Esto es importante puesto que Hyperloop estará compuesto por millones de dispositivos que generan miles de millones de datos por segundo. Enviar los datos en bruto a la nube requeriría un ancho de banda inmenso y muy costoso y aumentarían la latencia del sistema. Adicionalmente, como el objetivo final es combinar la información del sistema Hyperloop con otros datos de interés como meteorología o los horarios de los transportes de última milla, entre otros, para conseguir un sistema inteligente, conectado y capaz de optimizar los desplazamientos de los usuarios, el número de datos a enviar y procesar siempre estaría en aumento.

Los **principales inconvenientes** asociados a este tipo de sistema son el precio de los sensores inteligentes y su capacidad para operar en condiciones difíciles. Adicionalmente, aunque se va a realizar mantenimiento predictivo de todo el sistema, la reparación o sustitución de estos dispositivos debe llevarse a cabo por personal especializado que en consecuencia tendrá que realizar su trabajo *in situ*.

### *Cloud Computing*

Por su parte, se instalarían procesadores sobre bastidores en entornos controlados y con acceso seguro para soportar el procesamiento de datos de la nube. La capacidad de aumentar o reducir el número de servidores en los que se basa la nube confiere al sistema la flexibilidad necesaria para hacer frente a la escalabilidad del sistema Hyperloop a medida que se extienda la implementación a distintos lugares del mundo.

Este servicio **se utilizará para las tareas menos críticas**, es decir, para el análisis conjunto de toda la información relevante para la optimización y toma de decisiones a gran escala de Hyperloop. Esto se debe principalmente a dos razones: (i) la considerable latencia que lleva asociada este tipo de computación puesto que



## MEMORIA DESCRIPTIVA

estos centros se sitúan en zonas donde los costos son bajos, es decir, alejadas de la población; (ii) la vulnerabilidad de los datos.

Aunque los servidores físicos se encontrarán protegidos en centros de datos Tier IV mediante sistemas de monitorización 24/7, puntos de acceso con control biométrico y patrullas de seguridad armadas, los hackers pueden acceder a los datos por alternativas virtuales. Durante la transferencia de datos entre los dispositivos finales los hackers podrían alterar o manipular la información. Algunos de los ataques más conocidos así como los mecanismos de seguridad para combatirlos se recogen en la Tabla 1.

| Mecanismo de seguridad | Privacidad de datos | Autenticación de emisor | Integridad de la información | Detección de intrusos | Protección de identidad |
|------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| <b>Amenaza</b>         |                     |                         |                              |                       |                         |
| <b>Captura</b>         |                     |                         |                              |                       |                         |
| Sistemas físicos       | x                   |                         | x                            |                       | x                       |
| <b>Alteración</b>      |                     |                         |                              |                       |                         |
| DoS                    |                     | X                       |                              | x                     |                         |
| <b>Manipulación</b>    |                     |                         |                              |                       |                         |
| Masquerading           | x                   | X                       | x                            |                       | x                       |
| Replay Attack          |                     | X                       | x                            | x                     |                         |
| Man-in-the-middle      |                     | X                       | x                            | x                     |                         |

Tabla 1. Amenazas de un sistema IoT y mecanismos de seguridad. Fuente: Elaboración propia.

El ataque más conocido en cuanto a la **alteración de la información** es el **DoS (Denial of Service)**. Este ataque consiste en alterar una entidad del sistema para que no funcione de manera adecuada o que funcione de tal manera que impida a las demás entidades realizar sus propias funciones. Para evitar este tipo de ataques es importante realizar continuas autenticaciones del emisor de los datos y comprobar el sistema de detección de intrusos. De los ataques cuyo objetivo es la **manipulación** de la información se pueden destacar tres: (i) **Masquerading**, el atacante se hace pasar por una entidad diferente con el objetivo de manipular los datos a los que tiene acceso, (ii) **Man-in-the-middle**, el atacante transmite en secreto y altera la comunicación entre dos entidades que creen que se están comunicando directamente entre sí y (iii) **Replay Attack**, el atacante envía mensajes auténticos pero antiguos al receptor.

Por ello, además de evitar exponer a terceros la información que controla el funcionamiento de los sistemas críticos de Hyperloop mediante la implementación de Edge Computing, es necesario asegurar el buen funcionamiento de las



transmisiones de la información a la nube mediante un **sistema de seguridad robusto**. Este sistema debe .

### 1. Firewall Perimetral Avanzado

Utilizar cortafuegos avanzados para realizar una inspección estable de paquetes. Este firewall comprobará la integridad de los paquetes de datos para asegurar la estabilidad del origen, el destino y la integridad del propio paquete, antes de aprobar o rechazar su transmisión. Un ejemplo de firewall perimetral es el de Palo Alto Networks.

### 2. Sistemas de detección de intrusos con registro de eventos

Hay algunos proveedores de cloud computing que ofrecen servicio de monitorización IDS (*Intrusion Detection System*) y actualizan las reglas de seguridad de sus firewalls para contrarrestar las señales de amenaza y las direcciones IP maliciosas, que se detectan para todos los usuarios de cloud computing.

### 3. Firewalls internos para cada aplicación y bases de datos

El uso de un cortafuego perimetral solo bloquea los ataques externos, es decir, de personas ajenas a la operación de Hyperloop. Sin embargo, es necesario establecer cortafuegos internos para restringir el acceso a los datos sensibles y las aplicaciones en función de la jerarquía de los usuarios o aplicaciones. Un ejemplo de intrusión interna es el *hacking social* donde una cuenta de usuario de un empleado puede permitir a los hackers eludir completamente el cortafuego perimetral.

### 4. Cifrado de datos en reposo

La encriptación de datos es uno de los métodos más efectivos para mantener a salvo de usuarios no autorizados los datos más sensibles almacenados en la infraestructura de la nube.

### *Arquitectura del sistema*

Se pueden distinguir dos partes diferenciadas en este sistema: **(i) la comunicación interna** y **(ii) la comunicación externa** las cuales se van a encargar de la monitorización del estado de las cápsulas y los tubos y de integrar y controlar todos los sistemas. La Figura 29 muestra un esquema de la arquitectura de sistema.

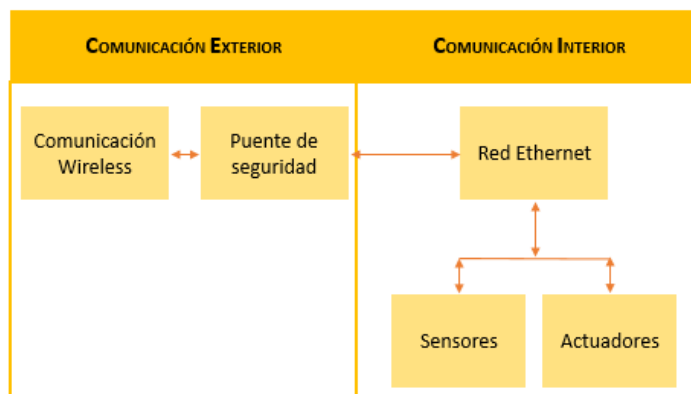


Figura 29. Esquema arquitectura de sistema de comunicación. Fuente: Elaboración propia.

#### Comunicación Interna

La arquitectura del sistema de comunicación interna se estructura de forma que cada sensor o grupo de sensores tiene computación independiente y serán capaces de realizar tareas sencillas y/o críticas con mínima latencia. En el caso de que los sensores no sean inteligentes, una unidad de red permitirá compatibilizarlos con los sensores inteligentes teniendo por lo tanto una combinación de **Edge Computing** y **Mist Computing** gracias a:

- Adaptación de los sensores que son analógicos a digitales con una unidad ADC integrada.
- Realizar los cálculos asociados a los sensores no inteligentes.
- Traducir esos cálculos a paquetes de red y enviarlos a las unidades de computación central.

Para las comunicaciones en el interior de las cápsulas se utilizará el estándar de redes de área local **Ethernet**. Este protocolo permite establecer la conexión por cable de las unidades de red dentro de la cápsula evitando la conexión a internet y reduciendo así la vulnerabilidad a los ataques. La Figura 30 muestra un esquema de la arquitectura del sistema de comunicación en el interior del pod. El ordenador central será quien controle la comunicación del pod con el exterior.

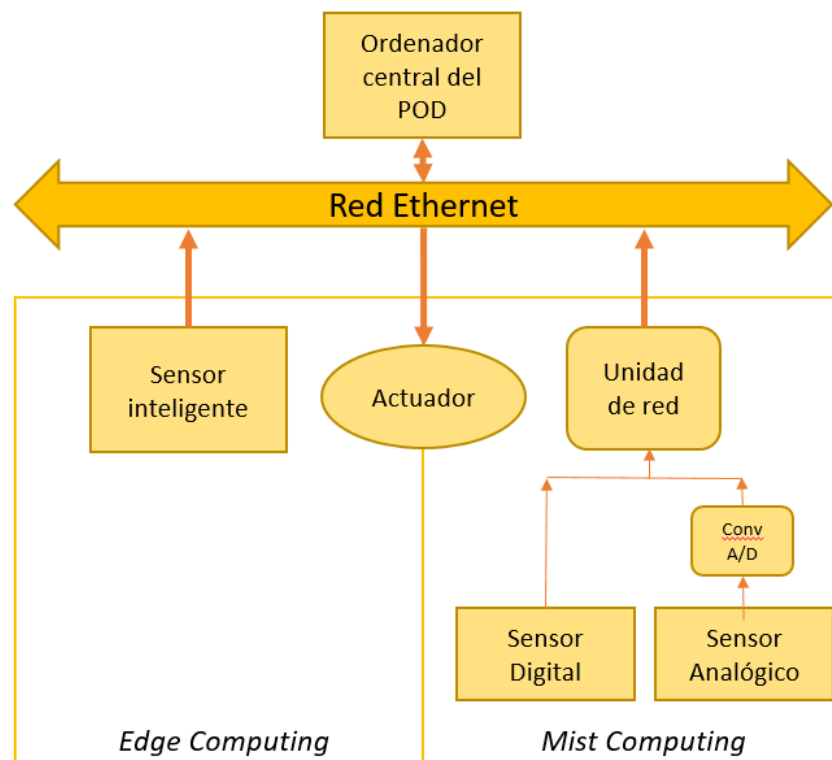


Figura 30. Arquitectura de la comunicación interna. Fuente: Elaboración propia.

#### Comunicación Externa

Para la comunicación entre el pod y el exterior no es conveniente utilizar WIFI puesto que la radiación electromagnética entorpecería la comunicación. Por ello, sería necesario buscar una tecnología más eficiente para la comunicación externa. A continuación se propone una alternativa basada en la **tecnología LIFI**.

Li-Fi es el uso de la porción de luz visible del espectro electromagnético para transmitir información a velocidades muy altas. Esto contrasta con las formas establecidas de comunicación inalámbrica, como la Wi-Fi, que utiliza señales de radiofrecuencia (RF) tradicionales para transmitir datos. Con Li-Fi, los datos se transmiten modulando la intensidad de la luz la cual es recibida por un detector fotosensible y demodulada. Esta modulación se realiza de tal manera que no es perceptible al ojo humano.

La principal ventaja de este tipo de tecnología es que, además de no interferir con la tecnología WIFI, es 10 veces más barata y rápida que esta. Sin embargo, los receptores y emisores de luz necesitan estar relativamente cerca uno del otro para poder tener contacto visual entre ellos.

## Sistema de refrigeración

La refrigeración es un aspecto importante a tener en cuenta en una tecnología como Hyperloop puesto que, entre otras cosas, la ausencia de aire en el interior de los tubos obliga a prescindir casi por completo de la refrigeración por convección.

Por lo tanto, para mantener los sistemas de baterías que soportan el buen funcionamiento de las vainas con todos sus sistemas (presurización, iluminación...) y las propias vainas a una temperatura adecuada es importante disponer de un buen sistema de refrigeración. En el caso de utilizar superconductores este sistema es crítico puesto que la temperatura de estos ha de mantenerse por debajo de un umbral bastante reducido para poder garantizar las propiedades magnéticas de los materiales.

Los japoneses, que han apostado por este tipo de tecnología frente a otras, focalizan la mayor parte de sus esfuerzos en el diseño de sistemas de refrigeración eficaces y eficientes. Han diseñado un sistema que permite la **reutilización del helio** usado como parte de su sistema de criogenización. Recogen el helio evaporado tras su uso y lo enfrían con el refrigerador para devolverlo al estado líquido y que de esa forma se pueda volver a utilizar.

El sistema está instalado en los laterales del pod tal y como muestra la Figura 31 en la cual se muestra además un esquema simplificado del sistema. Cuenta con dos líquidos refrigerantes, nitrógeno para controlar la temperatura de las cubiertas de la vía y helio para refrigerar los superconductores.

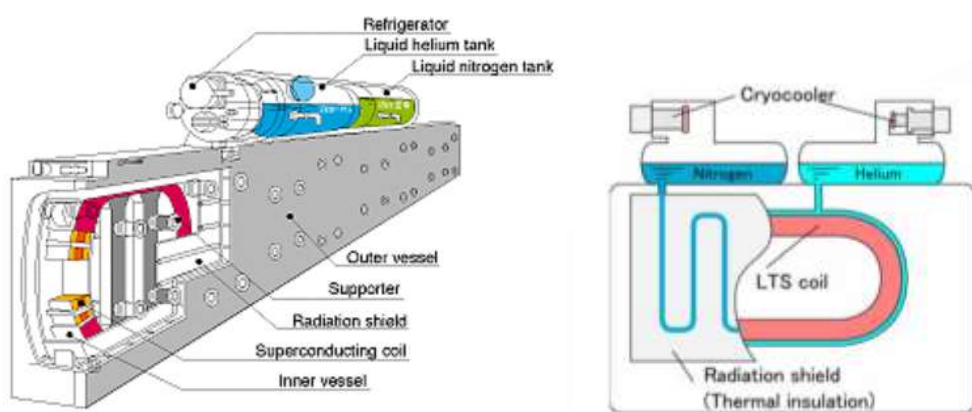


Figura 31. Esquema sistema de refrigeración superconductores Maglev. Fuente: [59]

El interés de los japoneses por utilizar este tipo de tecnología pese a sus inconvenientes puede deberse a dos razones principalmente. La primera es que el material del que se componen los imanes permanentes pertenece a una categoría conocida como tierras raras que, como su propio nombre indica, son escasas y difíciles de encontrar por lo que se trata de un recurso limitado. La segunda es que, desde el descubrimiento de la superconductividad en 1911, se ha producido

## MEMORIA DESCRIPTIVA

un incremento en las investigaciones por parte de la comunidad científica relacionadas con la optimización de las condiciones de funcionamiento de este tipo de materiales.

## 2.5. Comparativa con otras tecnologías

Hyperloop presenta ventajas e inconvenientes con respecto a otros métodos de transporte. En términos de contaminación, al estar diseñado completamente eléctrico y, dado que se apuesta por la alimentación del sistema mediante energías renovables, se considera que será **el método de transporte motorizado con menor impacto medioambiental**. La figura a continuación muestra una clasificación de los distintos medios de transporte en función de su nivel de contaminación medido en gramos de CO<sub>2</sub> por pasajero y kilómetro. Se puede comprobar la ventaja competitiva del sistema Hyperloop en comparación con el avión el cual se sitúa como el medio de transporte más contaminante.



Figura 32. Clasificación de los medios de transporte por nivel de contaminación. Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA). [13]

El **nivel de ruido** asociado a un método de transporte que levita es **mucho menor que el asociado a un método de transporte tradicional** con ruedas o el que tendría un avión. Hyperloop presenta una ventaja adicional en este sentido al circular en el interior de tubos.



## MEMORIA DESCRIPTIVA

Por su parte, los tubos representan un **mayor impacto visual** que el de las infraestructuras asociadas a trenes o aviones. Adicionalmente, **permitirían la circulación de las cápsulas incluso en condiciones meteorológicas adversas**. Los diseños de los tubos se plantean mayormente sobre pilones. Esto además de **reducir la necesidad de expropiación de terrenos** a lo largo de la ruta en comparación con la infraestructura de un tren convencional, idealmente **permitiría la circulación de personas, animales, u otros métodos de transporte por debajo**. Sin embargo, estas son cuestiones que quedarán en manos de la regulación y estandarización por parte de los gobiernos.

Gracias a la ausencia de sistemas mecánicos como ruedas y a circular en el interior de tubos, **Hyperloop permite minimizar las necesidades y el costo de operación y mantenimiento**. Adicionalmente, permite alcanzar velocidades mayores que los trenes convencionales convirtiéndolo en el **sistema de transporte terrestre más veloz**.

Dado el estado de la tecnología, no se puede realizar una comparación cuantitativa de la inversión en infraestructura que requiere la tecnología pues está ligada a las características de las rutas (necesidad de túneles...). Las empresas estiman que **la inversión en infraestructura será similar a la que supondría una línea de un tren de alta velocidad convencional**.

Gracias a su sistema de comunicación y control, apoyado en las tecnologías propias de la Cuarta Revolución Industrial, el sistema Hyperloop estará completamente automatizado lo que le permitirá prescindir del factor humano (responsable de la mayor parte de los accidentes) convirtiéndolo en **uno de los sistemas de transporte más seguros**.



## Capítulo 3 Análisis del mercado

En este capítulo se realiza el análisis de las empresas desarrolladoras de la tecnología. Adicionalmente se dedica un apartado para mostrar las rutas potenciales que están siendo consideradas en el mundo.

### 3.1. Empresas desarrollando la tecnología

A raíz de la primera y las sucesivas ediciones de la SXHPC surgen la mayoría de las empresas que actualmente se encuentran desarrollando la tecnología. A continuación se muestran tanto estas empresas como las empresas que surgieron antes de la competición.

| SpaceX Hyperloop POD Competition                                                    |                      | Sector privado                                                                       |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
|  | 2015<br>Países Bajos |  | 2013<br>EEUU   |
|  | 2016<br>España       |  | 2014<br>EEUU   |
|  | 2017<br>Polonia      |  | 2015<br>Canadá |

Tabla 2. Empresas desarrolladoras de la tecnología Hyperloop en función de su origen. Fuente: Elaboración propia.//años

#### HARDT

##### *Empresa*

Esta empresa fue fundada en 2015 por los estudiantes de la Universidad de Delft, Tim Houter, Marinus van der Meijs, Mars Geuze y Sascha Iamme, ganadores en la primera edición de la SXHPC. Su objetivo es diseñar un sistema de transporte que permita la conexión de zonas rurales inaccesibles con ciudades superpobladas para todos, de manera rápida y totalmente libre de emisiones.

Actualmente cuenta con 24 empleados a tiempo completo que trabajan en el desarrollo de la tecnología. Su sede se encuentra en su ciudad de origen donde

## MEMORIA DESCRIPTIVA

además disponen de un centro de pruebas de baja velocidad desde 2017 y que destaca por ser la primera instalación de pruebas de Hyperloop en Europa.

### *Tecnología*

Su sistema de levitación y propulsión también es 100% eléctrico. Adicionalmente, contemplan la frenada regenerativa, es decir, aprovechar la energía recuperada en la frenada de las cápsulas cuando se acerquen a las estaciones. Aunque también confirman que las velocidades pico del sistema Hyperloop se encontrarán en torno a los 1.000 km/h afirman que la velocidad óptima vendrá definida por las características de la ruta para lo cual han diseñado su tecnología para contemplar dicha escalabilidad.

Para la levitación magnética utilizan electroimanes (EMS) que sitúan en la parte superior del pod. Estos electroimanes se utilizan para posicionar, estabilizar y levitar la cápsula mediante atracción a las vías de acero que se encuentran en la parte superior del tubo. Las imágenes de la Figura 33 muestran el concepto.



*Figura 33. Levitación magnética con electroimanes en parado e imanes permanentes en movimiento.*

*Fuente: HARDT.*

## MEMORIA DESCRIPTIVA

Su sistema de propulsión también se basa en el principio de electromagnetismo. Hardt utiliza un LSM en formato Long Stator. La Figura 34 muestra el concepto de la onda magnética que impulsa la vaina a lo largo de la vía resaltando en azul las “bobinas activas”.

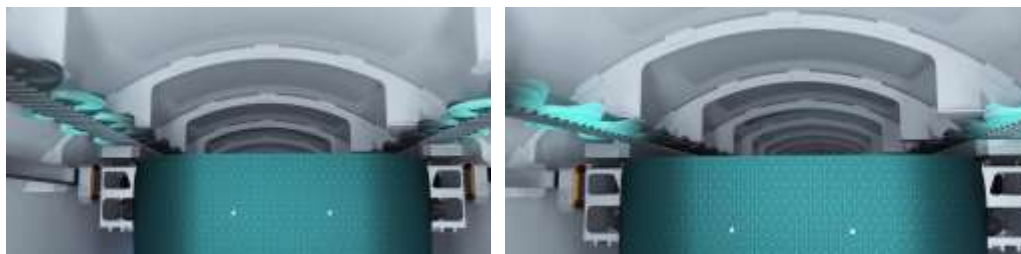


Figura 34. Sistema de propulsión electromagnético. Onda magnética. Fuente: HARDT.

Según las especificaciones de diseño, los tubos se encuentran a una presión de 1 mbar lo que permite reducir la resistencia del aire. Como consecuencia de la utilización conjunta del sistema de levitación magnética, el motor eléctrico lineal y las características de vacío de los tubos, el sistema consume poca energía en velocidad de crucero.

En cuanto a la disposición de los tubos contemplan dos alternativas: tubos subterráneos o tubos montados sobre pilones en la superficie terrestre. Las imágenes de la Figura 35 muestran los diseños para ambos conceptos.



Figura 35. Propuesta disposición de los tubos según HARDT. Fuente: HARDT.

En el caso de que los tubos sean exteriores la idea de la empresa es reducir el impacto utilizando terrenos ya ocupados por autopistas. La ventaja de este diseño es el aprovechamiento de la energía solar a partir de placas. En cualquier caso, los tubos confieren independencia de las condiciones climatológicas al sistema de transporte por lo cual, idealmente, estarían exentos de sufrir retrasos o cancelaciones por este motivo a diferencia de otros métodos de transporte actuales. Afirman haber logrado un sistema que requiere menos energía por pasajero que cualquier automóvil, avión o tren.



Figura 36. Instalación de placas solares sobre los tubos. Fuente: HARDT.

Como parte de su propuesta contemplan la realización de paradas intermedias entre los extremos de una ruta a partir de rampas de aceleración/deceleración similares a las existentes en las autopistas que permiten la incorporación y salida de las cápsulas a las vías. Para ello, han desarrollado y protegido un dispositivo de cambio de agujas, similar al de los trenes, utilizando los principios de electromagnetismo. En la siguiente figura se muestra una imagen en planta de su concepto de rampas y una imagen explicativa de su concepto de cambio de aguja. En esta última se aprecia cómo mediante la activación de los electroimanes de uno de los laterales de la cápsula y la desactivación de los otros se consigue la desviación del pod.



Figura 37. Rampas y cambio de aguja. Fuente: HARDT.

Además del diseño del método de transporte en sí, HARDT dispone de un diseño conceptual de una estación Hyperloop, conocida como **Hyperloop HUB**. De diseño futurista y modular, HARDT optimiza los tiempos de espera separando a los pasajeros que embarcan de los pasajeros que abandonan el transporte. Adicionalmente, la plataforma contempla integración multimodal para que los pasajeros puedan seleccionar otros medios de transporte para poder realizar los desplazamientos de última milla dentro de las ciudades. Ver Figura 38.



Figura 38. Hyperloop HUB. Fuente: HARDT.

En lo que se refiere a la experiencia de usuario, HARDT propone un diseño para el interior de las cápsulas que considera, entre otras cosas, el uso de una claraboya en la cual se reproduzcan las condiciones de luz y clima de la ubicación actual de la vaina, así como un sistema de presentación de información básica de posición y tiempos acerca del viaje para los pasajeros. La Figura 39 muestra un ejemplo.



Figura 39. Interior de las cápsulas. Fuente: HARDT.

### Hitos

A principios de **2019 realizaron una demostración** de ámbito privado de los sistemas de levitación, propulsión y cambio de aguja **a baja velocidad** en Ámsterdam, Países Bajos. Durante dicha prueba demostraron el funcionamiento no solo de los distintos subsistemas si no también el control remoto del sistema

---

MEMORIA DESCRIPTIVA

completo desde la centralita. A continuación, se muestra algunas instantáneas del video de las pruebas **de baja velocidad** reales de la compañía.



*Figura 40. Imágenes del sistema real de levitación y propulsión. Fuente: HARDT.*



*Figura 41. Imágenes del interior del tubo de las pruebas reales. Fuente: HARDT.*

Se han asociado con Tata Steel, una de las principales compañías siderúrgicas mundiales, con una capacidad anual de acero de 27,5 millones de toneladas y casi 74.000 empleados en los cinco continentes.

### *Visión*

Esperan tener una ruta piloto en 4 ó 6 años para iniciar posteriormente la implantación comercial de la tecnología. Su visión es poder conectar las capitales europeas mediante este nuevo método de transporte. Sin embargo, no consideran Hyperloop como una alternativa a los viajes en tren sino más bien como una alternativa a los trayectos cortos de avión por su alto nivel de contaminación.

En su página web, por el momento, no disponen de información sobre el número de personas que se podría transportar en sus cápsulas. Además afirman que, aunque se espera que el precio de los billetes sean competitivos con los

precios asociados a los métodos de desplazamiento actuales, es pronto para afirmarlo pues el precio depende en parte de la infraestructura y esta depende de la ruta.

## ZELEROS

### *Empresa*

Fundada en 2016 por tres de los integrantes del grupo universitario que compitió en la primera edición de HSXPC en 2015, Hyperloop UPV Makers de la Universidad Politécnica de Valencia. El grupo español obtuvo 2 premios en la categoría de solo diseño de dicha edición: el Premio al Mejor Diseño Conceptual y el Premio al Mejor Sistema de Propulsión.

La empresa con sede en Valencia cuenta con 14 empleados y según distintas fuentes, hasta el momento ha conseguido su financiación principalmente de aceleradoras.

### *Tecnología*

Su solución contempla sistemas de levitación magnética y propulsión aerodinámica. Sin embargo, hasta el momento no han realizado ninguna prueba de su modelo conceptual mostrado en la Figura 42. Todo el diseño gira en torno al objetivo de conseguir una infraestructura pasiva de modo que se puedan reducir los costos de instalación y mantenimiento. En su propuesta contemplan alcanzar los 1.100 km/h con sus cápsulas con capacidad para transportar hasta 50 personas con una frecuencia de salida cada 2 minutos. Al igual que sus competidores la alimentación del sistema la propone con energías renovables con lo que prevé que el sistema suponga un ahorro de 140.000 toneladas de CO<sub>2</sub> por ruta y año.



Figura 42. Diseño conceptual propuesta ZELEROS. Fuente: ZELEROS.

### Hitos

En junio de 2018 la start up accedió a la iniciativa *International Hyperloop Consortium* junto con **Transpod**, **Hardt** y **Hyper Poland** para definir y normalizar la metodología y el marco de regulación de esta tecnología. Esta asociación está abierta a todos los ejecutivos de la industria, institutos de investigación, organismos reguladores y gobiernos que estén dispuestos a comprometerse con las obligaciones, incluyendo discusiones, investigaciones, prácticas y políticas. El objetivo final es asegurar que la tecnología que desarrollan **garantice interoperabilidad**, es decir, evitar que sus diseños limiten el alcance de sus vainas como pasa con las vías ferroviarias y su diferencia de ancho de vía entre Francia y España.

En febrero de 2019 anunció la intención de construir un tubo de casi 2 km de longitud en el parque empresarial de Sagunto, Valencia, para realizar las pruebas técnicas de sus prototipos a escala 1:3. Se prevé que la construcción de comienzo a finales de 2019 y finalice a principios de 2020. [37]

## HYPER POLAND

### Empresa

Esta empresa con sede en Varsovia, Polonia, surge a raíz de la segunda edición de la SpaceX Hyperloop Pod Competition. Su equipo cuenta con más de 20 ingenieros además de personas dedicadas al desarrollo del modelo de negocio. La siguiente figura muestra una imagen del diseño conceptual de la vaina de esta empresa.



Figura 43. Imagen equipo universitario de Hyper Poland con su prototipo. Fuente: Hyper Poland.

### Tecnología

Sus esfuerzos se centran tanto en el diseño de las cápsulas y como el de los tubos así como el estudio de la aerodinámica asociada, la suspensión magnética y los motores lineales como método de propulsión. Aunque no disponen de información detallada del desarrollo de su tecnología en su página web, como método de suspensión proponen tanto la levitación magnética como la utilización

de cojinetes de aire. Al igual que el resto de los equipos, su propuesta es completamente eléctrica.

### *Visión*

La siguiente figura muestra un mapa con un ejemplo de una posible red de Hyperloop en las principales ciudades del norte de Europa. [32]



Figura 44. Posible mapa de red Hyperloop. Fuente: Hyper Poland.

## HYPERLOOP TRANSPORTATION TECHNOLOGIES

### *Empresa*

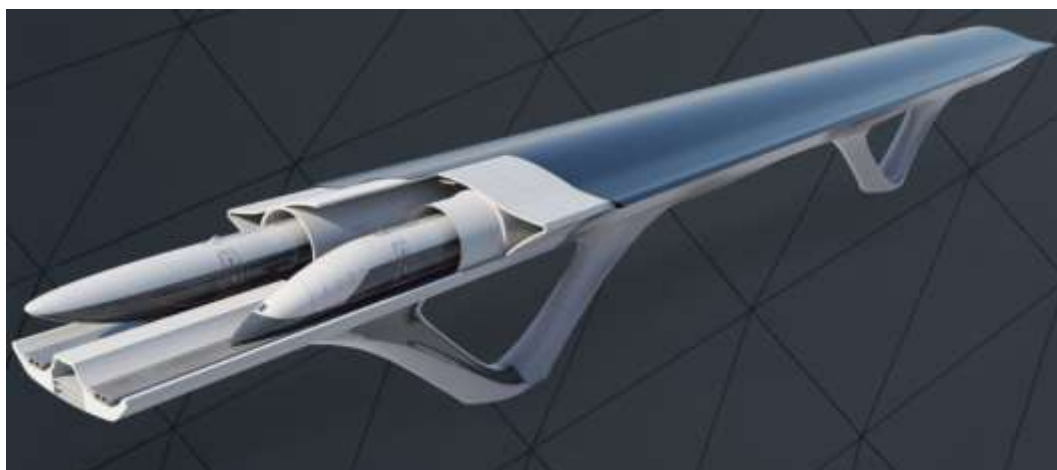
Hyperloop Transport Technologies, también conocida como HTT, es la primera empresa que se formó para el desarrollo de la tecnología Hyperloop. La empresa estadounidense opera desde 2013 aunque su presencia en Europa se sitúa a partir de la apertura de su Centro de Investigación y Desarrollo en Toulouse, Francia, en 2017. Actualmente tiene su sede en Los Ángeles y 25 empleados, sin embargo, cuenta con más de 800 colaboradores en los 6 continentes de distintas empresas.

Además de la creación de asociaciones corporativas y universitarias, HTT cuenta con varios centros de innovación en los que han desarrollado la tecnología detrás de sus 39 patentes. Se encuentran en un estado de desarrollo bastante avanzado y disponen de 10 acuerdos gubernamentales que se encuentran en avanzadas fases de negociación. Según la información disponible en su página web la empresa ha recibido hasta el momento financiación cercana a los \$40 millones por parte de diferentes inversores y premios.

### *Tecnología*

Su propuesta, mostrada en la Figura 45, se basa en propulsión electromagnética y levitación magnética pasiva (basado en Inductrack). Sus cápsulas tienen una longitud de 30 metros y pueden llevar de 28 a 40 pasajeros, lo que unido a la extravagante propuesta de realizar salidas de cápsulas cada 40 segundos y asumiendo una velocidad de en torno a 1.223 km/h les permite estimar una capacidad de 164.000 pasajeros al día en una línea con la máxima eficiencia.

El diseño de la estructura del sistema de transporte lo están realizando en colaboración con MAS Architects. Esta empresa contempla construir tubos con materiales como acero, hormigón y fibra de carbono. Para la generación de las condiciones de vacío dentro de los tubos han establecido una colaboración con la empresa líder del mercado en sistemas y soluciones de bombas de vacío, Leybold. Las columnas por su parte, serán construidas con hormigón armados y, además de un sistema para monitorizar el estado de las mismas de cara a realizar mantenimiento predictivo, esta empresa ha tenido en cuenta el diseño de unos cojinetes de asilamiento sísmico para permitir la instalación de este sistema en zonas con riesgo de sufrir terremotos. Adicionalmente, plantean el uso de las columnas como un posible sistema de almacenamiento de energía basado en baterías de alta densidad.



*Figura 45. Diseño conceptual propuesta Hyperloop Transport Technologies. Fuente: HTT.*

En cuanto al diseño de las cápsulas, al igual que sus competidores, proponen un diseño futurista en el interior con ventanas virtuales para asegurar el confort y entretenimiento de los usuarios. Entre los desarrollos tecnológicos de esta empresa destaca un nuevo material llamado Vibranium diseñado para formar parte de la cubierta de las cápsulas. El material basado en fibra de carbono que lleva sensores integrados, es más resistente y ligero que el aluminio o el acero y



---

**MEMORIA DESCRIPTIVA**

permite monitorizar información crítica para el funcionamiento como la temperatura, estabilidad e integridad.

En colaboración con la firma de diseño AN.ONYMUS han propuesto un diseño de estación que se muestra en la Figura 46. Está pensada para gestionar 3.600 pasajeros por hora ofreciendo la integración del tránsito con el entorno local de una manera enérgicamente eficiente.



*Figura 46. Diseño estación HTT hecha por AN.ONYMUS. Fuente: HTT.*

**Hitos**

Aunque la compañía lleva operando y realizando acuerdos y colaboraciones desde su fundación, abril de 2018 es una fecha destacable en su historia pues, además de abrir el Global Innovation Center for Logistics XO Square en Brazil, dieron comienzo a la construcción de un tubo a escala real de 320 metros de longitud en su Centro de Investigación y Desarrollo de Toulouse y firmaron un acuerdo para desarrollar una ruta comercial entre Abu Dhabi y Dubai.

Junto con la empresa alemana TÜV SÜV presentaron en mayo de 2019 lo que se puede entender como la primera propuesta de marco regulatorio para la tecnología Hyperloop. La construcción del primer sistema a escala real de la compañía fue terminada en junio de 2019 y presentada al Departamento de Transporte de los Estados Unidos (USDOT, por sus siglas en inglés).

**Visión**

HTT, a pesar de ser la empresa más longeva, no es la más avanzada. En su página web adelantan que esperan poder realizar las primeras pruebas en 2020. [31]



## VIRGIN HYPERLOOP ONE

### *Empresa*

Esta empresa privada fue creada en 2014 cuenta con aproximadamente 300 empleados a tiempo completo distribuidos entre su Campus de Innovación en Los Ángeles, California, el Apex Test & Safety Site in North Las Vegas, Nevada y las oficinas de Londres y Dubai.

En su página web afirman haber recibido una financiación de \$295 millones por parte de DP World, Caspian VC Partners, Virgin Group, Sherpa Capital, Abu Dhabi Capital Group, SNCF, GE Ventures, Formation 8, 137 Ventures, WTI entre otros.

### *Tecnología*

VH1 es claramente la empresa más avanzada a nivel tecnológico. Su sistema de propulsión se basa en un motor eléctrico lineal formato short stator y levitación magnética. La empresa defiende la eficiencia del sistema Hyperloop frente a otros sistemas como el Maglev debido, entre otras cosas, al concepto de vía fraccionada que se ha explicado anteriormente. Además, defienden que el origen de la energía para alimentar el sistema a lo largo de los diferentes puntos de la ruta sea de origen renovable, 100% libre de carbono. Al igual que el resto de sus competidores Virgin Hyperloop One hace énfasis en la prioridad que dan a la seguridad de su sistema. Contemplan varios sistemas de frenada y la capacidad de presurizar los tubos para poder evacuar a los usuarios en caso de emergencia.

Otra virtud que asocian a Hyperloop es que los costes de capital y de explotación, aunque varían mucho en función de la ruta y la aplicación (pasajeros, carga), afirma podría suponer en torno a dos tercios de los del ferrocarril de alta velocidad. Sin embargo, no se aventuran a estimar precio para los tickets.

### *Hitos*

Entre los hechos asociados a esta compañía cabe destacar el lanzamiento del ya mencionado **Global Challenge** en mayo de 2016 en el cual los equipos participantes proponían posibles. Este mes también supuso el cambio de nombre de la empresa de Virgin Hyperloop One a Hyperloop One.

En noviembre de 2016 comenzaron la construcción de la primera pista de prueba de Hyperloop a gran escala en Apex, Nevada, la cual recibe el nombre de DevLoop (Development Loop). En dicha pista se realizó la **primera prueba a gran escala del mundo en mayo de 2017**. La Figura 47 muestra imágenes de esta pista



## MEMORIA DESCRIPTIVA

situada en el desierto a 56 km al norte del Strip de Las Vegas. El tubo de Virgin de 500 metros de largo y 3,3 metros de altura.



Figura 47. Imágenes del DevLoop desierto de Nevada. Fuente: New York Times.

Tras varios eventos relacionados con la visión de América, Europa e India para la evaluación de las distintas propuestas de los semifinalistas del *Global Challenge*, en **septiembre de 2017 se revelan los 10 finalistas** de la competición los cuales se explican más en detalle en apartados posteriores.

El año 2018 supuso una importante evolución para la empresa pues en abril realizó **la primera y única prueba de alta velocidad hasta el momento**, alcanzando los 387 km/h. En septiembre Hyperloop One firma Acuerdo Marco con las autoridades indias para la construcción de una ruta Numbai-Pune. Según informes de prensa esta empresa tiene pensado construirse a finales de 2019. La distancia que separa ambas ciudades es de 150 km que actualmente pueden hacerse en coche o tren tardando respectivamente tres y dos horas y media, Hyperloop One pretende reducirlo a 25 minutos. Se va a realizar una primera fase de prueba de 15 km en Numbai en la cual se espera que la empresa invierta \$500 millones. Se estima que el proyecto con conexión Pune se complete para 2023. La siguiente imagen muestra una cápsula diseñada por Hyperloop One para este proyecto. [33]



Figura 48. Diseño cápsula VH1 proyecto Numbai - Pune.

En **agosto de 2018** la empresa firma un **acuerdo con ADIF** el administrador de infraestructuras ferroviarias español para la abrir la primera **instalación de desarrollo europea de la firma en las afueras de la ciudad de Málaga**.

### Visión

Las fechas que estima la compañía para el funcionamiento comercial de la tecnología son a partir de 2025. Afirman que la evolución de este tipo de transporte está ligada tanto a la regulación como al interés que la tecnología despierta en los gobiernos. En ese sentido, y dados los acuerdos que ya está firmando y los proyectos que está comenzando, la compañía se muestra optimista en cuanto a la evolución temporal de este nuevo medio de transporte.

Hyperloop One se ha asociado con uno de sus mayores inversores, DP World, creando la marca global para sistemas de carga habilitados por Hyperloop, **DP World CargoSpeed**. DP World es una filial de Dubai World, una compañía de inversión que administra y supervisa una cartera de negocios y proyectos para el gobierno de Dubái a través de una amplia gama de proyectos que promuevan Dubai como un centro para el comercio. Está presidido por el Sultán Ahmed bin Sulayem quien tras las numerosas inversiones en Hyperloop One y tras la creación de la mencionada marca ha terminado convirtiéndose en el presidente de junta de Hyperloop One. [36]

## TRANSPOD

### Empresa

Transpod es la empresa del ámbito privado más reciente. Fue fundada por Sebastien Gendron en Canadá en 2015. Actualmente cuenta con oficinas en Canadá, Francia e Italia. A lo largo de su trayectoria se ha asociado con IKOS

---

MEMORIA DESCRIPTIVA

---

(principal firma de consultoría especializada en el sector ferroviario, 2017), Liebherr-Aerospace, para la producción de las vainas.

### *Tecnología*

La Figura 50 muestra una imagen del diseño conceptual de la empresa para sus cápsulas. Estas cápsulas funcionan con propulsión magnética accionada eléctricamente por un motor lineal por lo que también proponen un diseño de transporte libre de emisiones de carbono y que se plantea como alternativa para la reducción del tráfico en las carreteras. Aunque afirma la utilización de un sistema de levitación, en su página web no da detalles sobre dicho sistema.

A diferencia de sus competidores Transpod plantea la instalación de un compresor en la parte delantera de la vaina, tal y como se proponía en el documento *Hyperloop Alpha*, de forma que se parte de la masa de aire se desvíe desde la parte delantera del pod hacia la trasera reduciendo así la resistencia del aire.



Figura 49. Diseño conceptual cápsulas de Transpod exterior e interior. Fuente: Transpod.

La Figura 50 muestra el diseño conceptual de los tubos de la empresa. Como puede comprobarse, al igual que las otras empresas desarrollando la tecnología, plantean **la instalación de paneles solares** sobre los tubos para generar *in situ* toda o parte de la electricidad necesaria para hacer funcionar sus sistemas. En los videos promocionales los tubos son traslúcidos por lo que se deduce que realmente la empresa no tiene definido el material a utilizar en la construcción de la infraestructura.



Figura 50. Diseño conceptual tubos de Transpod. Fuente: Transpod.

En cuanto a la propuesta de la marca acerca de las estaciones Hyperloop, la empresa también tiene en cuenta la necesidad de conectar Hyperloop con otros sistemas de transporte que permitan a los pasajeros realizar los desplazamientos de última milla (ver Figura 51). La empresa contempla un tiempo entre salidas de las cápsulas consecutivas de una misma estación de 80 segundos.



Figura 51. Diseño estación con conexión intermodal. Fuente: Transpod.

Cabe destacar la empresa realizó y publicó en 2017 un **Estudio Inicial de Costes de la Tecnología** llegando a la conclusión de que **costaría aproximadamente lo mismo** que un tren de alta velocidad. [20]

### Visión

Afirman estar trabajando para conseguir que los precios de los tickets sean similares o inferiores a los precios de los trenes de alta velocidad. Por ejemplo,

MEMORIA DESCRIPTIVA

estiman 100 dólares canadienses por un viaje Toronto - Montreal en el que hay que cubrir 541 km y que actualmente se puede hacer en cinco horas y media en coche, 6 horas en tren o algo más de una hora en avión.

Al igual que el resto de empresas, Transpod contempla la utilización de su sistema para el transporte de mercancías además de para el transporte de personas. La Figura 52 muestra un **esquema de la red de transporte de mercancías** que la empresa tiene en mente y que resume bastante bien los distintos agentes implicados y los flujos de las mercancías que en general conforman el transporte con Hyperloop. Afirman tener un sistema para la gestión de palets automática y carga de los contenedores en los camiones de manera rápida y automática.

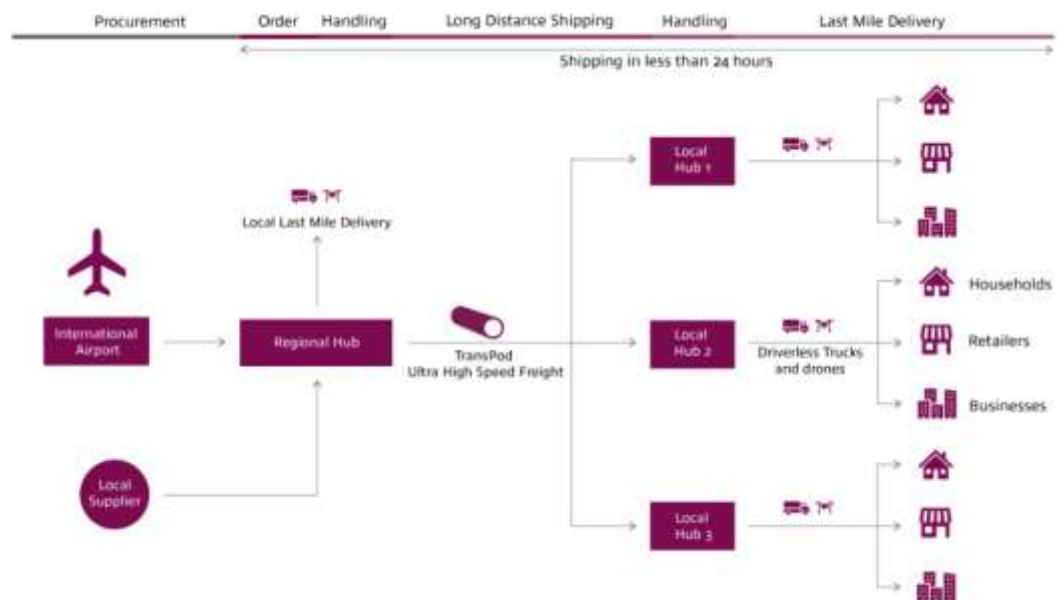


Figura 52. Esquema de la red de transporte de mercancías. Fuente: Transpod.

Por su parte, Transpod tiene su propia propuesta de posibles rutas para la construcción del sistema Hyperloop. Las posibilidades se recogen en la Tabla 3. [34]

|                |                                                     |        |                                                                                                                                                                                    |
|----------------|-----------------------------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Canadá         | Calgary – Edmonton<br>Toronto – Ottawa – Montreal   | EEUU   | Chicago – Detroit – Toronto<br>NY – Boston<br>Washington DC – Filadelfia – NY<br>Vancouver – Seattle – Portland – SF<br>Orlando – Miami<br>Dallas – Austin – San Antonio – Houston |
| México         | Ciudad de México – León – Guadalajara               |        |                                                                                                                                                                                    |
| Asia y Oceanía | Arabia Saudí<br>Bangkok – Kuala Lumpur<br>Australia | Europa | Reino Unido<br>París – Toulouse<br>Burdeos – Toulouse – Montpellier<br>París – Frankfurt                                                                                           |

Tabla 3. Rutas de interés propuestas por la empresa Transpod. Fuente: Elaboración Propia. Datos: Transpod.

## Clasificación TRL

Los niveles de madurez de la tecnología, también conocidos como TRL por sus siglas en inglés (*Technology Readiness Level*) fueron desarrollados inicialmente por la NASA para poder clasificar el estado de sus proyectos, sin embargo, su uso se ha extendido a proyectos tecnológicos. La siguiente figura muestra una breve descripción de estos niveles y la clasificación de las empresas en ellos. Los **primeros niveles** se reservan para la descripción de aquellos proyectos que se encuentren en **un estado conceptual**. Los niveles **TRL 4 y 5** se utilizan para designar proyectos que se ya encuentran en estado de **desarrollo de prototipos**. Los niveles **TRL 6 y 7** son asignados a aquellos proyectos que se encuentran en estado de **validación**. Por último, **los niveles superiores** se reservan para aquellos proyectos que se encuentren en la **fase de producción**. [63]

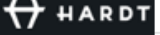
|   |                                                                                                                   |   |                                                                                                                                                                                |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | <b>INVESTIGACIÓN BÁSICA</b><br>Se puede describir las necesidades del concepto pero no se tienen pruebas          | 1 |                                                                                             |
| 2 | <b>FORMULACIÓN DE LA TECNOLOGÍA</b><br>Se han formulado los conceptos y la aplicación                             | 2 |                                                                                            |
| 3 | <b>NECESIDAD DE VALIDACIÓN</b><br>Primeras muestras de interés por parte de los stakeholders                      | 3 |                                                                                           |
| 4 | <b>PROTIPO A PEQUEÑA ESCALA</b><br>Construido a escala de laboratorio                                             | 4 |                                                                                                                                                                                |
| 5 | <b>PROTIPO A GRAN ESCALA</b><br>Probado en un entorno relevante                                                   | 5 | <br> |
| 6 | <b>PROTOTIPO DEL SISTEMA</b><br>Probado en un entorno relevante cercano a las condiciones de desempeño real       | 6 |                                                                                                                                                                                |
| 7 | <b>DEMOSTRACIÓN DEL SISTEMA</b><br>Operar en un entorno cercano a las condiciones de desempeño real               | 7 |                                                                                           |
| 8 | <b>PRIMER SISTEMA COMERCIAL</b><br>Todos los procesos técnicos y sistemas funcionan de cara a la comercialización | 8 |                                                                                                                                                                                |
| 9 | <b>APLICACIÓN COMERCIAL COMPLETA</b><br>Sistema listo para ser comercializado a todos los consumidores            | 9 |                                                                                                                                                                                |

Figura 53. Clasificación de las empresas desarrolladoras en función de su TRL. Fuente: Elaboración propia.

Conocidas las características asociadas a cada uno de los TRL y teniendo en cuenta la información pública acerca de las empresas analizadas se puede realizar una clasificación de las mismas tal y como se ha mostrado en la imagen anterior.

### 3.2. Análisis rutas potenciales

Como se ha expuesto a lo largo del documento, no solo existe un interés por parte de la población en una mayor oferta de conexiones entre ciudades a partir de medios de transporte sostenibles, también las empresas tienen una mayor concienciación con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible). Es por ello, que estudiar las posibles rutas para implantar la tecnología Hyperloop además de estudiar su viabilidad es uno de los puntos clave asociados al desarrollo de la tecnología.

A continuación, se va a realizar un análisis mundial de los mercados potenciales para la implementación de esta tecnología. La Figura 54 muestra las redes ferroviarias existentes en función de su rango de velocidad.

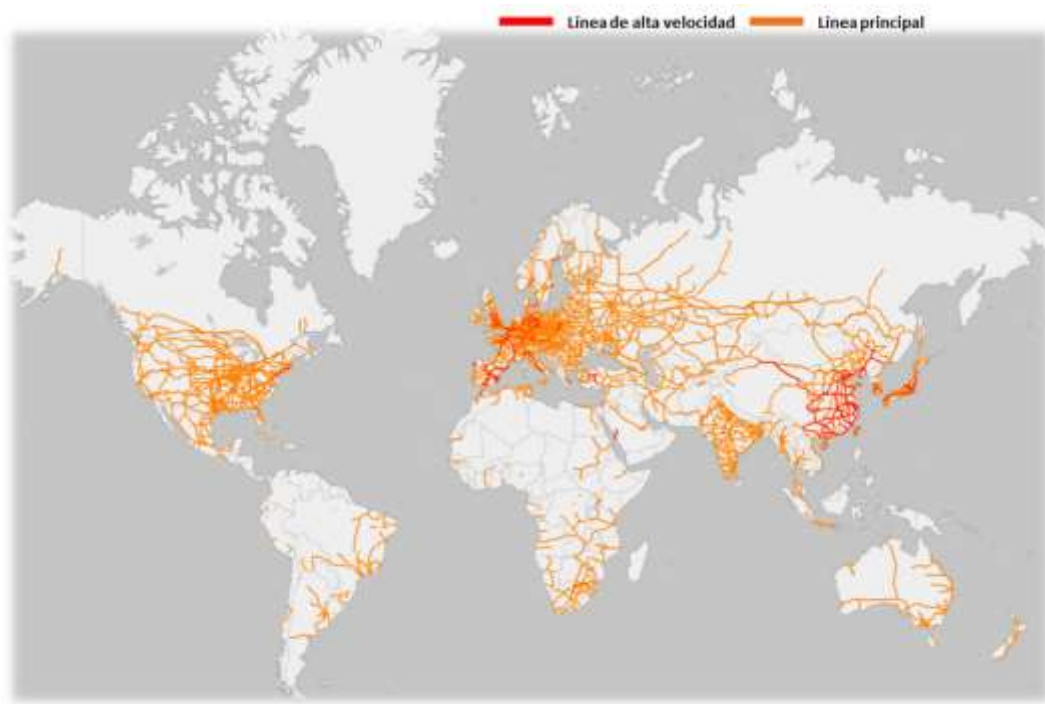


Figura 54. Redes ferroviarias existentes a nivel mundial en función de la velocidad. Fuente: OpenRailwayMap

Se aprecia que tanto en el oeste de Europa como en el este de Asia existen líneas de alta velocidad que limitarían el alcance de la implantación de la tecnología Hyperloop. Por lo tanto, los potenciales mercados se sitúan en países donde no se dispone de líneas de alta velocidad o incluso donde todavía no exista ninguna línea ferroviaria. El mercado es amplio y con mucho potencial en todo el continente americano, África, el centro de la placa euroasiática y Oceanía. Sin embargo, la instalación de la tecnología requiere de considerables medios económicos por lo que los mercados con verdadero potencial entre los mencionados son Middle East, Canadá, Australia y EEUU. Hyperloop permitiría la



## MEMORIA DESCRIPTIVA

conexión de puntos a largas distancias en un tiempo mucho menor que cualquiera de los transportes terrestres y con mayor comodidad que el transporte aéreo.

Hyperloop Transportation Technologies está preparándose para implantar una ruta entre Dubai y Abu Dhabi en 2022. Sin embargo, no parece probable que esta sea la fecha real puesto que no ha realizado demostraciones de su tecnología. Como se ha mencionado anteriormente, parece más plausible la estimación de la empresa Virgin Hyperloop One, considerada como la más avanzada tecnológicamente, de disponer de un primer sistema comercial para 2025 entre Numbai y Pune en 2025. A este respecto, la empresa estadounidense Virgin Hyperloop One, lanzó en mayo de 2016 el mencionado **Hyperloop One Global Challenge**, una competición que invitaba a la realización de propuestas integrales para la construcción de redes Hyperloop que conecten ciudades y regiones de todo el mundo. De los más de 2.600 equipos inscritos se seleccionaron 10 propuestas tal y como muestra la siguiente figura y cuyas conexiones se muestra a continuación. [26]

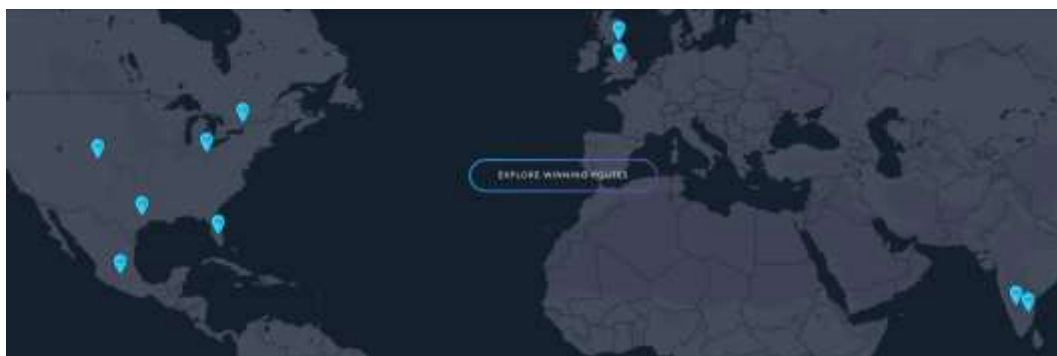
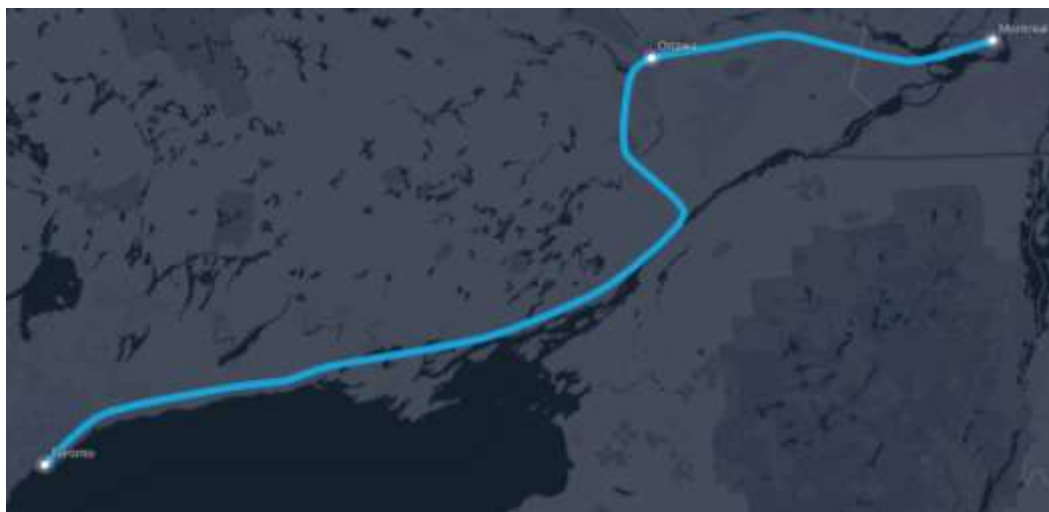


Figura 55. Propuestas ganadoras de la Hyperloop One Global Challenge Fuente: Virgin Hyperloop One.

## Canadá, Toronto-Montreal

La propuesta del equipo HyperCan, dirigido por AECOM Canadá<sup>6</sup>, conectaría Montreal, Ottawa y Toronto tal y como muestra la Figura 56.

<sup>6</sup> Filial canadiense de la empresa multinacional de ingeniería AECOM.



*Figura 56. Propuesta HyperCan, Canadá. Fuente: Virgin Hyperloop One.*

Esta región se ha mantenido como la más densamente poblada de la historia canadiense moderna y la cuarta más poblada de América del Norte con más de 13 millones de personas viviendo en una región de 640 km de largo. Esta ruta se plantea como la alternativa a las 5 horas en viaje en coche por las autopistas 401 y 417 consideradas como las más concurridas de todo Canadá para desplazarse desde Toronto a Montreal y viceversa.

Los beneficios de Hyperloop son bastante claros, según las velocidades proyectadas, la conexión Ottawa y Toronto, que actualmente lleva alrededor de 3 horas en automóvil, podría reducirse a 27 minutos. Mientras que un viaje de Montreal a Ottawa pasaría de 2 horas a 12 minutos lo que implicaría una conexión de tan solo 39 minutos entre Toronto y Montreal.

La propuesta del equipo HyperCan argumentaba la alimentación del sistema con energía 100% renovable y libre de emisiones lo que le permitiría beneficiarse de los \$ 81,2 millones de dólares canadienses que el banco de infraestructura creado por la administración de Trudeau prometió para ser invertidos en infraestructura verde y corredores de transporte. [54]

## EEUU, Cheyenne-Denver-Pueblo

La propuesta del equipo Rocky Mountain Hyperloop que une Cheyenne con Denver y Pueblo tal y como muestra la Figura 57, tiene una estimación de coste inicial de en torno a \$24 mil millones. Sin embargo, se estima que genere alrededor de \$2 mil millones de beneficios al año a partir de los 45 millones de viajes anuales que ofrecería la instalación. Esta propuesta que se caracteriza por ser una de las más ramificadas y por lo tanto más ambiciosas y complicadas, también cuenta con el apoyo de ingenieros estadounidenses de AECOM.

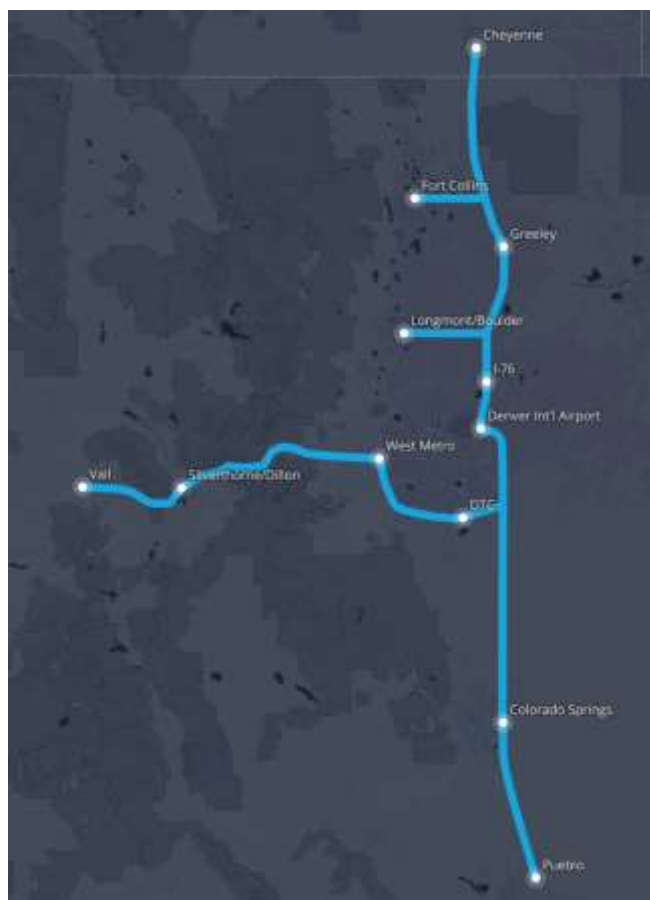


Figura 57. Propuesta Rocky Mountain Hyperloop, EEUU. Fuente: Virgin Hyperloop One.

## EEUU, Miami-Orlando

La propuesta del equipo Florida Hyperloop que, tal y como muestra la siguiente figura, estudia la conexión de los aeropuertos de Orlando y Miami con el objetivo de conectar los dos centros turísticos del estado aligerando a su vez el transporte de mercancías entre dichos puntos. Esta propuesta cuenta con la posibilidad de realizar una conexión más amplia con los estados al norte en un futuro.

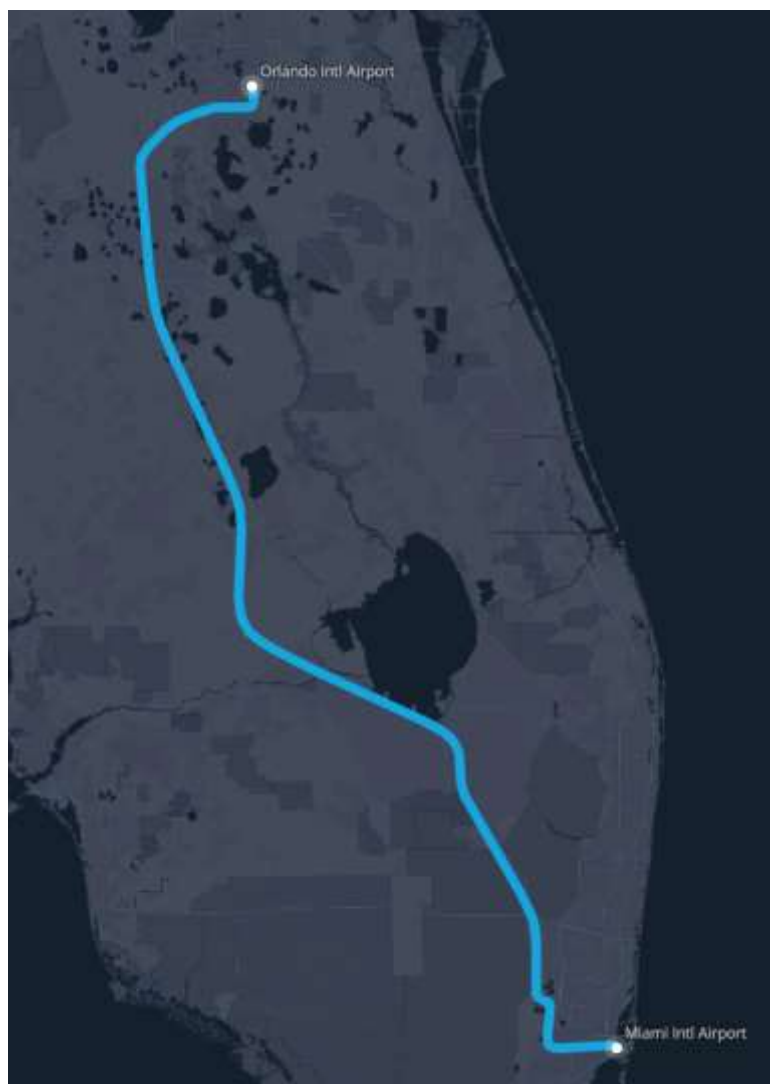


Figura 58. Propuesta Florida Hyperloop, EEUU. Fuente: Virgin Hyperloop One.

## EEUU, Dallas-Laredo-Houston

La propuesta realizada por el equipo Texas Triangle busca conectar los centros económicos más importantes del estado de Texas. Utilizando este método de transporte el estado busca reducir su huella de carbono y el tráfico de conexión de dichas ciudades.

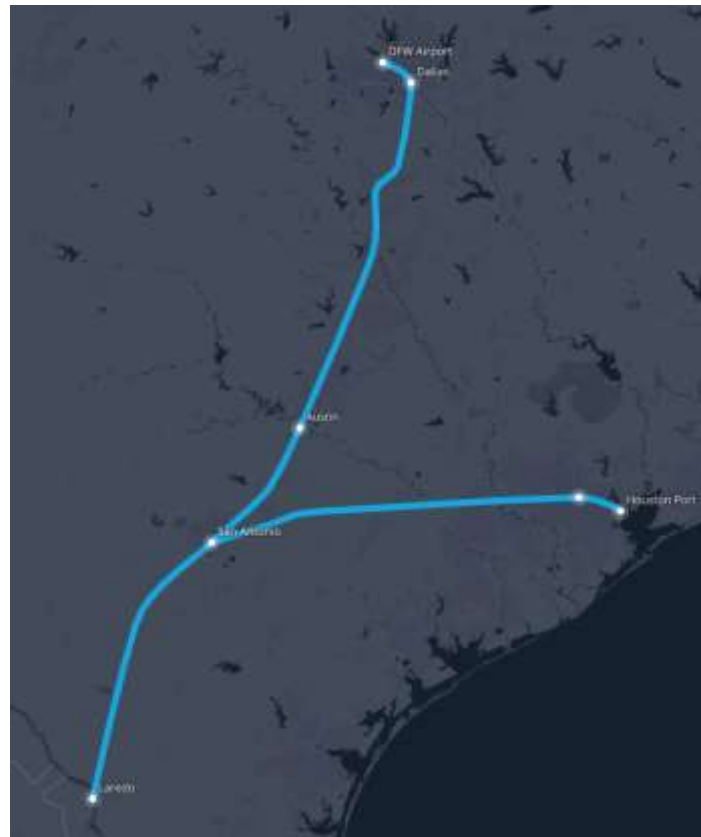


Figura 59. Propuesta Texas Triangle, EEUU. Fuente: Virgin Hyperloop One.

## EEUU, Chicago-Columbus-Pittsburgh

El equipo Midwest Connect realiza otra de las propuestas ganadoras de EEUU. Esta propuesta tiene especial potencial tanto para el transporte de pasajeros como de mercancía dado que actualmente no existen conexiones de trenes de carga o pasajeros entre las ciudades propuestas.



Figura 60. Propuesta Midwest Connect, EEUU. Fuente: Virgin Hyperloop One.

## Méjico, Guadalajara-Mexico City

La propuesta del equipo mejicano Mexloop persigue las sinergias económicas de las ciudades de Ciudad de México, Querétaro, León y Guadalajara, realizando una renovación importante de la infraestructura con la que actualmente cuenta el país.

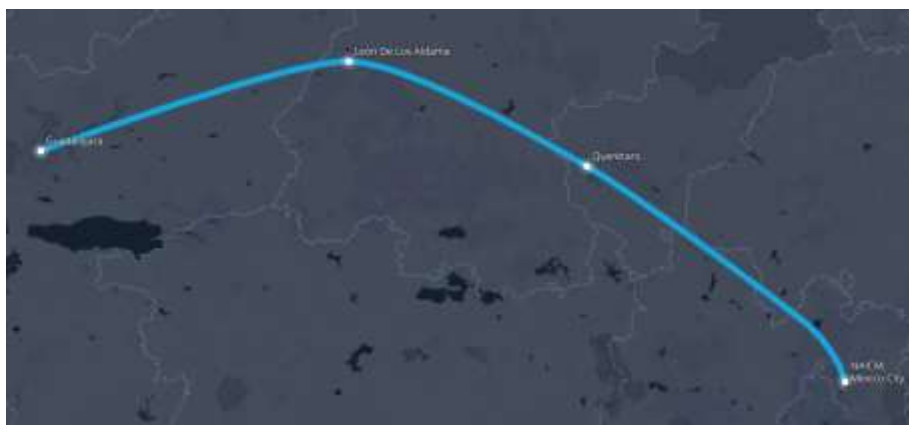


Figura 61. Propuesta Mexloop, Méjico. Fuente: Virgin Hyperloop One.

## Reino Unido, Edimburgo-Londres

La propuesta del equipo escocés HypED se centra en la conexión de la capital escocesa con la ciudad de Londres busca reducir las desigualdades socioeconómicas del país. Sin embargo, como puede verse en la Figura 54, aunque es interesante esta propuesta compite con algunas líneas de alta velocidad ya instauradas en el país lo que podría limitar su implantación.



Figura 62. Propuesta HypED, Reino Unido. Fuente: Virgin Hyperloop One.

## Reino Unido, Edimburgo-Liverpool

Por su parte, el equipo de Northern Arc, plantea la siguiente ruta también en Reino Unido. Su propuesta se centra en la unión de las ciudades de Glasgow, Edimburgo, Newcastle, Leeds, Manchester y Liverpool.



Figura 63. Propuesta Northern Arc, Reino Unido. Fuente: Virgin Hyperloop One.



## India, Bengaluru-Chennai

El equipo de Aecom India, supo identificar el potencial de un método de transporte como Hyperloop en un país como India, realizando una propuesta para unir Bengaluru y Chennai dos de las regiones económicas con mayor crecimiento del país.

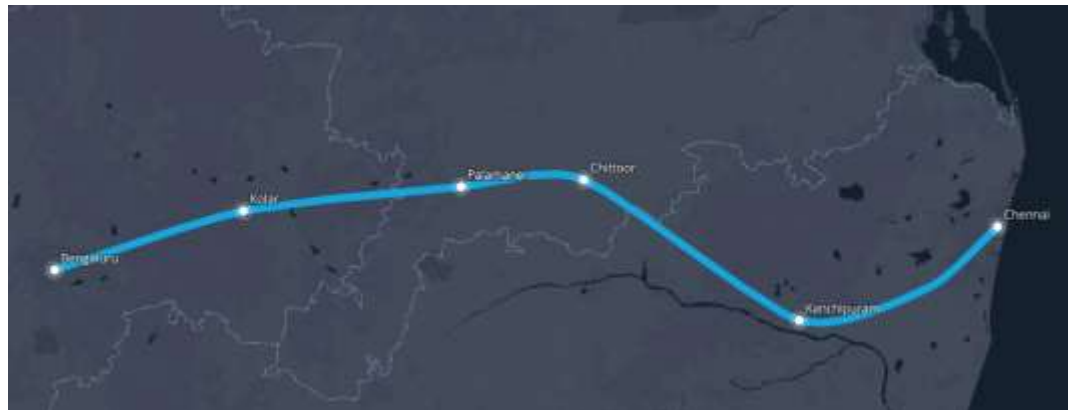


Figura 64. Propuesta AECOM, India. Fuente: Virgin Hyperloop One.

## India, Numbai-Chennai

Por su parte el equipo de Hyperloop India plantea una ruta más ambiciosa. Tal y como se muestra en la siguiente figura, la idea de este equipo es conectar Mumbai y Chennai permitiendo así una conexión terrestre entre el Mar de Omán y el Golfo de Bengala.

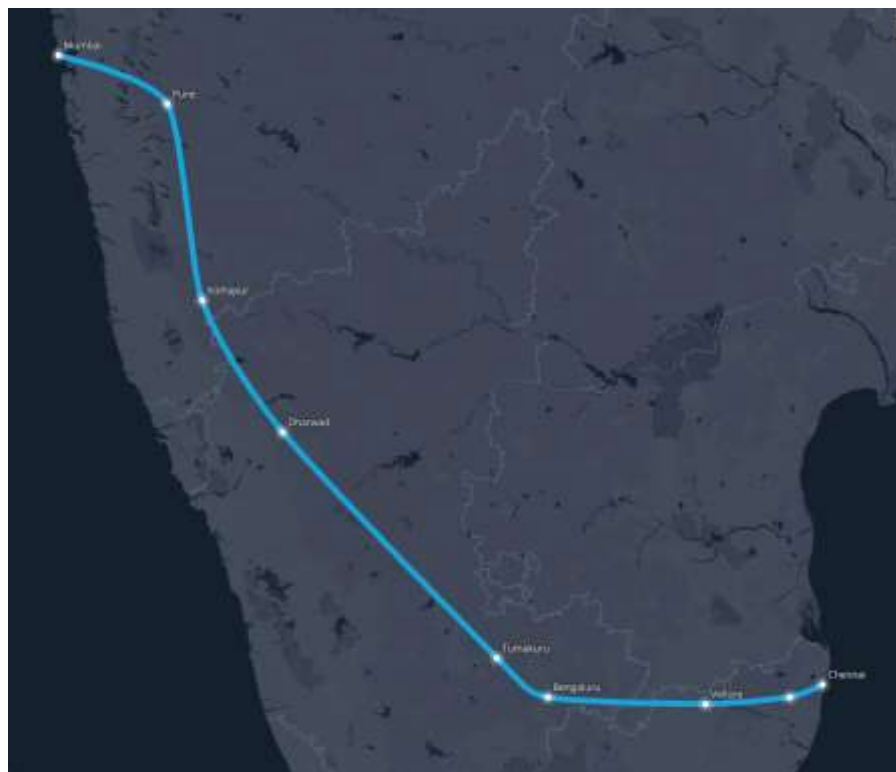


Figura 65. Propuesta Hyperloop India, India. Fuente: Virgin Hyperloop One.



## Capítulo 4 Oportunidades para empresas

En este apartado se va a analizar la oportunidad que esta tecnología representa para el sector del transporte de personas y mercancías. Según la consultora *Allied Market Research*, se espera que el mercado de la tecnología Hyperloop esté valorado en 1.350 millones de dólares en 2022 y que alcance los 6.340 millones de dólares en 2026, lo que implica una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR, por sus siglas en inglés) del 47,20% entre 2022 y 2026.

$$CAGR = \frac{Valor_{final}^{\frac{1}{años}}}{Valor_{inicial}}$$

Para la realización de este análisis se ha tomado Europa como mercado de referencia con el objetivo de perfilar la situación actual de los medios de transporte de mercancías y personas. Se han tomado los datos públicos de la , Eurostat, oficina estadística de la Comisión Europea. El análisis comprende desde el transporte por carretera, hasta por ferrocarril, pasando por aéreo, marítimo y de navegación en zonas de interior. Como se verá a continuación, España es uno de los países más representativos por lo que además de ser resaltado en el análisis ha sido seleccionado para la realización de una propuesta de ruta. La propuesta contempla el diseño cualitativo de una planta fotovoltaica como parte de la alimentación del sistema.

### 4.1. Análisis sector reparto

---

[5] En los últimos años se ha producido un desarrollo acelerado del transporte de mercancías en la UE. Esto se debe principalmente al crecimiento del comercio a nivel mundial así como a políticas económicas como la concentración de la producción para obtener economías de escala o la evolución del comercio *just in time* promovido por gigantes como Inditex o Amazon quienes basan por completo o gran parte de su negocio en el sector *e-commerce*. La entrega de mercancías se ha visto forzada a mejorar notablemente en términos de capacidad y calidad en los últimos años. Por el contrario, la evolución del estado de las infraestructuras de transporte ha empeorado en términos de tráfico y congestión lo que afectará al desarrollo del mercado a nivel nacional e internacional.

En 2016 se estimó un total de 2,4 billones de tkm (toneladas-kilómetros)<sup>7</sup>. La Figura 66 muestra la cantidad respecto al total de envíos que fue realizado por carretera agua o tren según los distintos países. El transporte por carretera acumula aproximadamente el 75% del total de envíos, seguido del casi 18% por ferrocarril. La información utilizada para la realización de esta comparativa se ha ajustado de manera que se han tenido en cuenta solo los transportes efectuados en el territorio de cada país. En el caso concreto de España, el porcentaje asociado al transporte de mercancías o *freight* por carretera supera el 90% del total. Por su parte el ferrocarril supuso alrededor del 65% del transporte en los países Bálticos. El mayor porcentaje de transporte por vías navegables dentro de la UE se registró en Ámsterdam con casi el 45%.

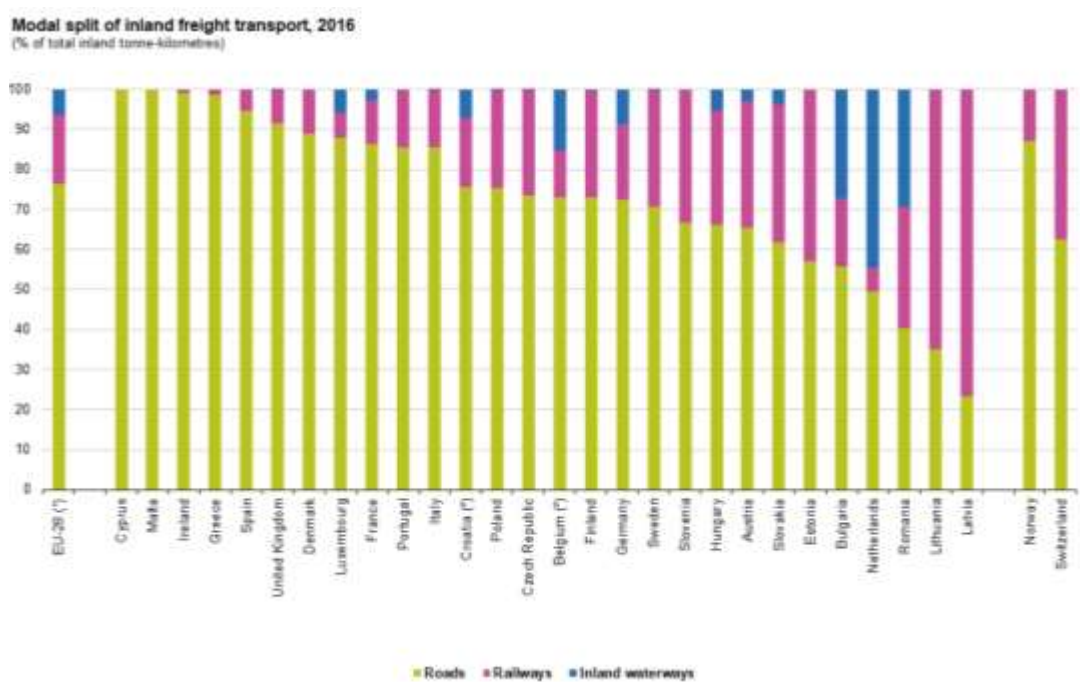


Figura 66. Porcentaje de reparto dentro de la UE asociado a carreteras, trenes o vías navegables respecto al total de tkm en función del país. Fuente: Eurostat.

La Figura 67 muestra la división entre **el transporte por carretera** nacional e internacional desarrollado por los vehículos matriculados en cada uno de los estados. De esta manera, se puede comprobar como los vehículos registrados en Chipre se dedican fundamentalmente el transporte de mercancías por carreteras en el ámbito nacional. Esta gráfica muestra como España se encuentra entre los 10 países que más focalizan el transporte por carretera a nivel nacional.

<sup>7</sup> Unidad de medida del transporte de carga que representa el transporte de una tonelada de mercancías (incluidos el embalaje) a una distancia de un kilómetro. Solo se tiene en cuenta la distancia en el territorio nacional del país declarante para el transporte nacional, internacional y de tránsito. Se basan por lo tanto en el principio de territorialidad en lugar de nacionalidad.

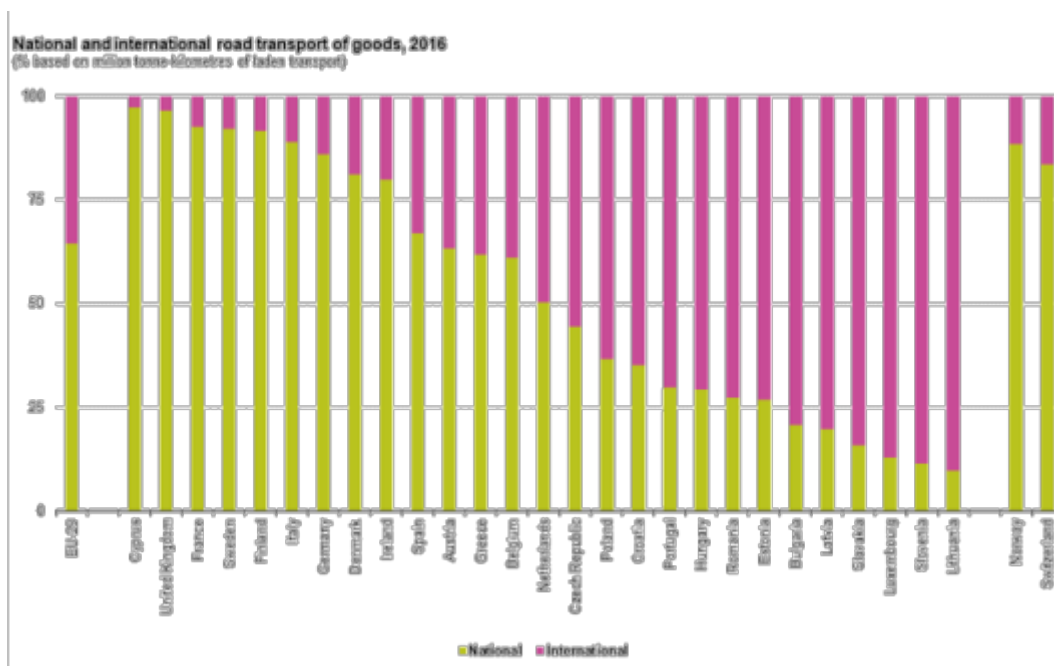


Figura 67. Porcentaje de transportes por carreteras dedicados por cada país al ámbito nacional e internacional. Fuente: Eurostat.

En lo que respecta al **transporte aéreo** se registraron 15,2 millones de toneladas dentro de la UE en 2016. La mayor parte de este transporte se produjo a través de los aeropuertos de Alemania (4,5 millones de toneladas) seguido de Francia y Reino Unido. España por su parte se encuentra en el octavo lugar con más de medio millón de toneladas.

El **transporte marítimo** registró un total de 3.900 millones de toneladas de mercancía transportada, cantidad que se ha mantenido más o menos constante en la última década. Países Bajos, Reino Unido, España e Italia acumulan casi la mitad del transporte marítimo en 2016.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), en los próximos 30 años, el transporte de mercancías internacional se espera que crezca en un 400%. Si además se tiene en cuenta el crecimiento de los mercados online y las exigencias *just in time* por parte de empresas y personas, se justifican las investigaciones, inversiones y esfuerzos por parte de las empresas anteriormente expuestas por conseguir desarrollar un método de transporte rápido y ecológico.

## 4.2. Análisis sector transporte de personas

[6] La información relativa al transporte de pasajeros dentro de la UE distingue también entre el transporte en ferrocarril, aéreo, marítimo y carretera siendo este último el más popular. El uso intensivo de vehículos ha provocado que un total de 280 ciudades de distintos países de la UE hayan implantado restricciones al tráfico en algunas zonas de sus ciudades en función de los niveles de contaminación que se registren. España sólo dispone de restricciones en Madrid donde se ha instaurado una zona de bajas emisiones recientemente denominada Zona Centro. Según el borrador del Plan Nacional de Energía y Clima que el Ministerio de Transición Ecológica español presentó en febrero de 2019, España prevé alcanzar una economía neutra en carbono para 2050 como parte de su estrategia para cumplir con el acuerdo de París contra el cambio climático. Para ello, se plantea replicar la estrategia seguida en Madrid en todas aquellas ciudades con más de 50.000 habitantes a partir de 2023. Alemania por su parte, es pionera en este tipo de medidas pues dispone de 50 urbes con restricciones algunas de las cuales se remontan a 2008. [17]

La Figura 68 muestra el porcentaje del **transporte terrestre** que cada país realiza mediante el uso de vehículos de pasajeros privados, autobuses o trenes. **En España el transporte en coche representa más del 80% del total del transporte**, siendo, siendo el 20% restante repartido entre autobuses y trenes siendo este el transporte menos utilizado.

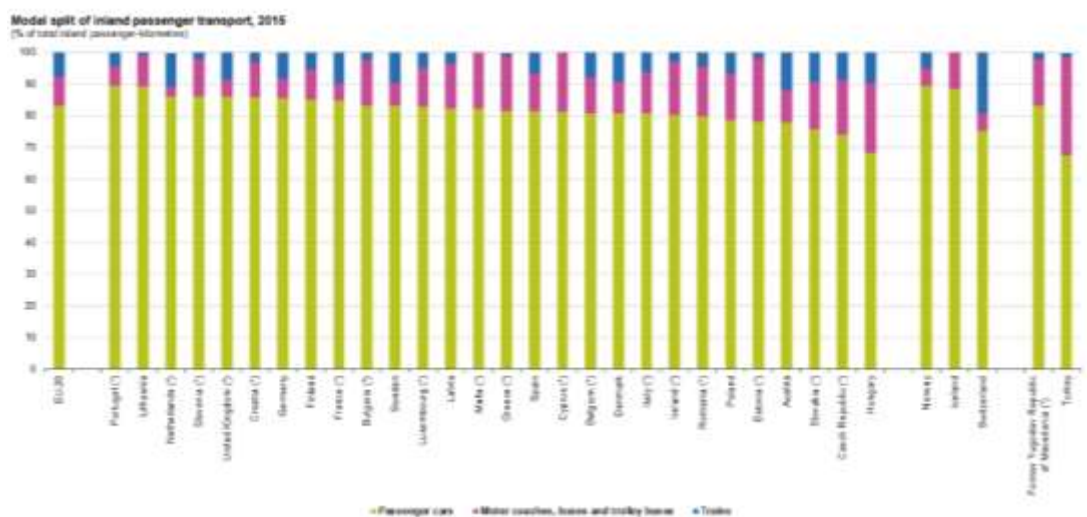


Figura 68. Porcentaje de transporte dentro de la UE asociado a coches privados, autobús o similar o trenes respecto al total en función del país. Fuente: Eurostat.

De todos los países de la UE es Portugal el que tiene mayor presencia de turismos. Por su parte los países como Austria o los Países Bajos o Suiza presentan la mayor proporción de uso de tren de la UE respecto a los otros métodos de



## MEMORIA DESCRIPTIVA

transporte terrestres disponibles en el país. En 2016 se registraron 401 mil millones de pasajeros en las redes ferroviarias de la UE. Alemania, Francia, Reino Unido e Italia acumularon más del 70% de los viajes en tren de toda la UE.

En cuanto al **transporte aéreo**, la Tabla 4 muestra el nivel de ocupación, medido en número de pasajeros que llegan o salen, de los aeropuertos más transitados de la UE. Cabe destacar la ocupación del aeropuerto londinense Heathrow que ostenta el puesto de mayor ocupación desde 1993.

| PAÍS                                                                                | AEROPUERTO                    | PASAJEROS   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------|
|    | Heathrow, Londres             | 76 millones |
|    | Charles de Gaulle, París      | 66 millones |
|    | Schiphol, Ámsterdam           | 64 millones |
|   | Frankfurt                     | 61 millones |
|  | Adolfo Suárez-Barajas, Madrid | 49 millones |

Tabla 4. Ranking de los aeropuertos más transitados de la UE. Fuente: Elaboración propia. Datos: Eurostat.

En la figura a continuación se muestra la proporción de pasajeros que salen o llegan de vuelos nacionales o internacionales desde los principales aeropuertos de la UE. Como puede observarse la gran mayoría de los pasajeros eligen el transporte aéreo como medio de transporte cuando su intención es viajar a otros países, es decir, realizar los trayectos más largos. Sin embargo, España destaca por ser uno de los países con mayor proporción de vuelos nacionales, aproximadamente el 29%, lo que demuestra el interés por desplazarse de manera rápida a pesar del gran impacto que tienen los trayectos cortos sobre el medioambiente.

**Top 15 airports in the EU-28, 2016**

(million passengers carried, embarked and disembarked)

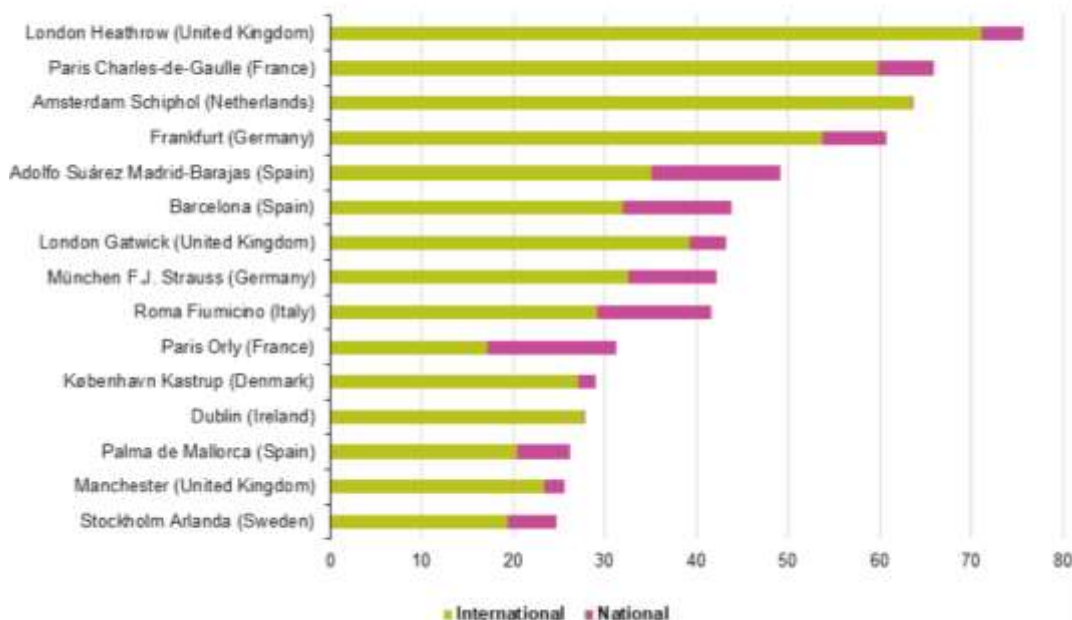


Figura 69. Proporción de pasajeros que salen o llegan de vuelos nacionales e internacionales. Fuente: Eurostat.

Londres Heathrow fue el aeropuerto más ocupado de la UE-28 en términos de número de pasajeros en 2016, con 76 millones de pasajeros que llegan o salen. Heathrow ha ocupado el puesto de aeropuerto más ocupado de la UE desde el inicio de la serie cronológica en 1993. Seguido por el aeropuerto Charles de Gaulle de París (66 millones), el aeropuerto Schiphol de Ámsterdam (64 millones) y el aeropuerto de Frankfurt. (61 millones).

La gran mayoría de los pasajeros que viajan a través de estos cuatro aeropuertos más ocupados viajaban en vuelos internacionales; la participación más baja entre ellos se registró en el aeropuerto de Frankfurt (88.6% internacional), llegando al 100.0% para Amsterdam Schiphol. En contraste, los vuelos nacionales (nacionales) representaron el 28,7% de los 49 millones de pasajeros transportados a través del quinto aeropuerto de pasajeros más ocupado de la UE en 2016, Adolfo Suárez Madrid-Barajas. También hubo proporciones relativamente altas de pasajeros en vuelos nacionales hacia y desde París Orly (45.3% nacional), Roma Fiumicino (30.0%) y aeropuerto de Barcelona (26.9%)

**El incremento del tráfico aéreo está llegando a sus límites de capacidad.** Teniendo en cuenta que se espera que la población sea de aproximadamente 10 mil millones para 2050 se van a necesitar sistemas de transporte alternativos y complementarios a los actuales. **Adicionalmente, el transporte aéreo está considerado como el transporte más contaminante.** Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, por cada kilómetro un pasajero en avión emite 285 gramos de

CO<sub>2</sub>, contra 158 en automóvil y 14 en tren. La Figura 70 muestra una comparativa de los gramos de CO<sub>2</sub> que cada método de transporte representa por kilómetro y por persona y la media de pasajeros transportados.

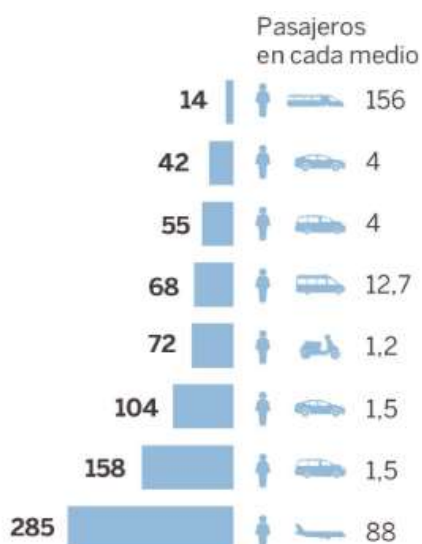


Figura 70. Contaminación de medios de transporte. Emisiones de CO<sub>2</sub> g/km/persona. Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente.

Estas cifras están incrementando la conciencia medioambiental. **Holanda ha anunciado la creación de una tasa ambiental de 7.5€ por pasajero con el objetivo de desincentivar el uso del avión** y mejorar la competitividad de los trenes frente a las compañías aéreas de bajo coste. Por su parte Francia propone la prohibición de los trayectos cortos para los que haya alternativa de tren con trayectos inferiores a un cierto número de horas. En Alemania, se está barajando la posibilidad de limitar el número de vuelos anuales por personas a 3. Si un ciudadano deseara exceder esta imposición debería comprar los derechos de otro ciudadano.

Actualmente los vuelos internos en la UE están obligados a pagar por las emisiones dentro del sistema de comercio de derechos de emisiones europeo. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha acordado crear un sistema mundial de comercio similar al europeo sin embargo no se prevé su aplicación al completo hasta el 2027.

Las emisiones de la aviación representan ahora apenas el 2,5% de todos los gases de efecto invernadero de la actividad del ser humano. Sin embargo, la preocupación reside en que, a diferencia de otros sectores en los que se prevé un descenso de las emisiones gracias a las energías renovables que favorecen alternativas como vehículos eléctricos, en el sector de la aviación no existen incentivos para desarrollar alternativas ecológicas.

Además de iniciativas y regulaciones por parte de los distintos países para limitar el uso del avión como método de transporte, existen movimientos llevados



## MEMORIA DESCRIPTIVA

a cabo por grupos de personas que se comprometen a limitar o suprimir este tipo de transporte de sus vidas. Destacan casos como el de la Orquesta Sinfónica de Helsingborg. Esta orquesta, una de las más importantes de Suecia, se ha comprometido a vetar a partir de 2020 a aquellos músicos/directores que lleguen en avión al país. Por todo ello, Hyperloop se plantea como una oportunidad de mercado ya que se considera la alternativa más atractiva a los aviones debido a su carácter veloz y ecológico.

Las estadísticas demuestran que, de disponer de una alternativa para trayectos medios, el uso del transporte aéreo se vería reducido. En el caso de España la inversión en líneas de alta velocidad provocó una reducción del uso del avión en distancias de menos de 500 km.

### 4.3. Empresas del sector de alta velocidad

---

En la actualidad los fabricantes líderes en alta velocidad son Bombardier (Canadá), Alstom (Francia), Kawasaki Hitachi (Japón), CAF, Talgo (ambas españolas) y Siemens (Alemania). El origen de estos actores coincide con los principales mercados donde se ha desarrollado la alta velocidad en el mundo. Sabiendo que la previsión del valor del mercado de Hyperloop para 2026 es de 6.34 mil millones de dólares, es innegable que el mapa de posicionamiento de actores evolucionará, especialmente a partir de 2023, que es cuando se espera la primera ruta comercial de Hyperloop.

En la actualidad son muchas las empresas desarrollando la tecnología las que se han asociado de alguna forma con los actores tradicionales de la alta velocidad. Las asociaciones son tanto con los fabricantes para el apoyo en el desarrollo de la tecnología, como con los gestores de infraestructuras. Un ejemplo claro es el acuerdo entre la empresa Virgin Hyperloop One y la empresa encargada de la gestión de las infraestructuras ferroviarias ADIF.

### 4.4. Gestor de infraestructuras, servicios y ER

---

Una tecnología como Hyperloop supone una oportunidad de mercado para numerosas empresas, especialmente para un gestor de infraestructuras, servicios y energías renovables.

Por un lado, Hyperloop requiere de una infraestructura considerable para su puesta en marcha y operación. Además, se trata de un servicio cuyo sistema de alimentación es eléctrico en lugar de a base de carburantes por lo que abre **oportunidades a empresas con perfil de implementación y operación de instalaciones de energías renovables como solar fotovoltaica o eólica.**



## Propuesta de suministro energético

En este apartado se van a realizar los cálculos asociados a la **propuesta de alimentación del sistema mediante la utilización de PV**. Para ello, se han analizado posibles rutas de interés en la península ibérica y se ha decidido **conectar Madrid y Málaga**. En concreto se conectarían Getafe, considerado como uno de los centros de operaciones más importantes de Madrid, y Antequera en Málaga.

Esta decisión se basa principalmente en dos razones. La primera es que esta es una ruta que presenta gran cantidad de transporte de mercancías y personas. La segunda es que en agosto de 2018 la empresa estadounidense Virgin Hyperloop One, una de las empresas más avanzadas en el sector, y ADIF, la empresa pública española encargada de administrar las infraestructuras ferroviarias, firmaron un acuerdo para establecer en Málaga un centro de experimentación y desarrollo para este tipo de transporte. Este centro se instalará en una nave de pruebas de 19.000 m<sup>2</sup> que ADIF tiene para la alta velocidad en Antequera. El valor de la instalación será de 432 millones de euros, y su inversión está supeditada a la obtención de 126 millones de euros de ayudas públicas como, por ejemplo, subvenciones de I+D+i o préstamos. [12]

Gracias a la levitación magnética y a la configuración de la matriz Halbach, Hyperloop tiene un consumo energético relativamente constante y reducido a velocidad de crucero. Por lo tanto, el consumo de Hyperloop está asociado principalmente a las etapas de aceleración y deceleración, es decir, la primera y la última. Este estudio se ha centrado en el diseño de una planta de PV para cubrir parte de las necesidades de aceleración y deceleración en Getafe, concretamente en el solar delimitado por la vía Camino Viejo de Toledo y la Carretera del Cementerio, ver Figura 71, siendo escalable tanto para el tramo final situado en Antequera como para instalar estaciones a lo largo de la ruta para la alimentación de las bombas de vacío. Este solar es especialmente interesante tanto por su proximidad a una estación de tren cercanías como a un centro de media tensión.



Figura 71. Solar planta PV, Getafe. Fuente: Google Earth.

Las infraestructuras generadoras a partir de fuentes renovables estarán **interconectadas a la red eléctrica en modo autoconsumo sin almacenamiento** (ver Figura 72) **para evitar el sobrecoste excesivo**, de modo que se asegure la disponibilidad de energía en períodos y horarios de baja irradiación solar.



Figura 72. Esquema instalación. Fuente: Elaboración propia.

Esta instalación basada en energía fotovoltaica se va a diseñar en conexión a la red eléctrica por tres razones. La primera es que de esta forma se evita el sobrecoste excesivo por almacenamiento. La segunda es que, dadas las velocidades a las que se va a realizar el transporte, tanto la aceleración como la deceleración de las cápsulas forman parte de las tareas más críticas del sistema por lo que la red eléctrica representa un sistema de back up en caso de que la instalación no produzca lo suficiente o en caso de que ocurra algún fallo. La tercera razón es que, si se producen excedentes de energía, estos se puedan verter en la

## MEMORIA DESCRIPTIVA

red lo cual fomentaría la atracción de inversores en las instalaciones de PV por empresas como Iberdrola, Endesa...

Para realizar el diseño se necesita información de las **dimensiones del emplazamiento seleccionado** y datos como la **irradiación**. Esta información depende de la ubicación geográfica del emplazamiento. La Figura 73 muestra las dimensiones del solar medidas en planta con la aplicación de Google Earth, se dispone de una superficie de 86.998,35 m<sup>2</sup>, con latitud 40.283 y longitud -3.741.



Figura 73. Solar planta PV, vista en planta. Área y perímetro. Fuente: Google Earth.

A continuación, se explica el método para obtener la información de la irradiación solar en el emplazamiento, así como otros parámetros necesarios para hacer el diseño de la instalación. **Las placas** que se van a instalar son **fijas**, es decir, no se orientan para seguir al sol. Por ello, la instalación requiere de un estudio en el que a partir de las coordenadas del emplazamiento y su irradiación se optimicen tanto la inclinación con respecto al suelo de las placas como su orientación con respecto a los puntos cardinales. Estos parámetros se conocen como **la pendiente** ( $\beta$ ) y **el azimut** ( $\alpha$ ) respectivamente y se muestran en la Figura 74.

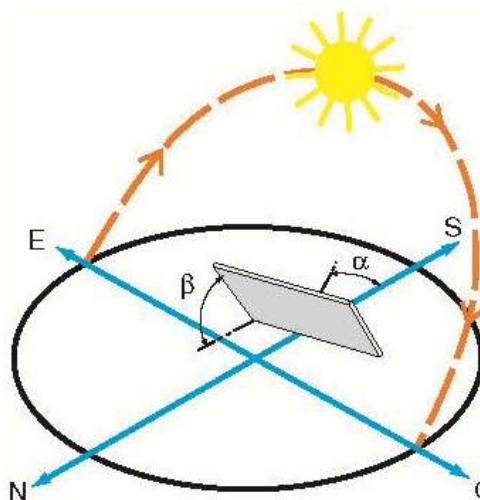


Figura 74. Parámetros de diseño PV: pendientes y azimut.

Para el cálculo de la **pendiente  $\beta$**  se utiliza el **método de la inclinación óptima anual**. Este método permite identificar el ángulo con el que conseguir la mayor radiación solar anual posible sobre un captador solar estático como en el caso de estudio. Se basa en el análisis estadístico de la radiación solar sobre superficies con diferentes inclinaciones situadas en lugares de diferentes latitudes. De este modo la inclinación óptima de los paneles en función de la latitud identificada mediante el programa Google Earth queda como sigue. [45]

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69 * \Phi$$

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69 * 40.28219 = 31.5^{\circ}$$

Donde  $\Phi$  es la latitud del emplazamiento.

El **azimut** es el ángulo en el que se deben orientar las placas solares con respecto a los puntos cardinales, medido respecto al sur, para conseguir maximizar la irradiación solar. En el caso de estar haciendo el diseño para una planta en el hemisferio norte los valores de azimut rondarán valores pequeños en valor absoluto, es decir, estarán orientadas al sur. Por su parte, las plantas situadas en el hemisferio sur tendrán valor de azimut grandes en valor absoluto lo que conlleva orientar los paneles al norte. Además de tener en cuenta la posición respecto al Ecuador se debe tener en cuenta la posición respecto al Meridiano de Greenwich. Dada la posición de España respecto a este meridiano, ver Figura 75, se considera un azimut de  $0^{\circ}$ , es decir, orientación sur.

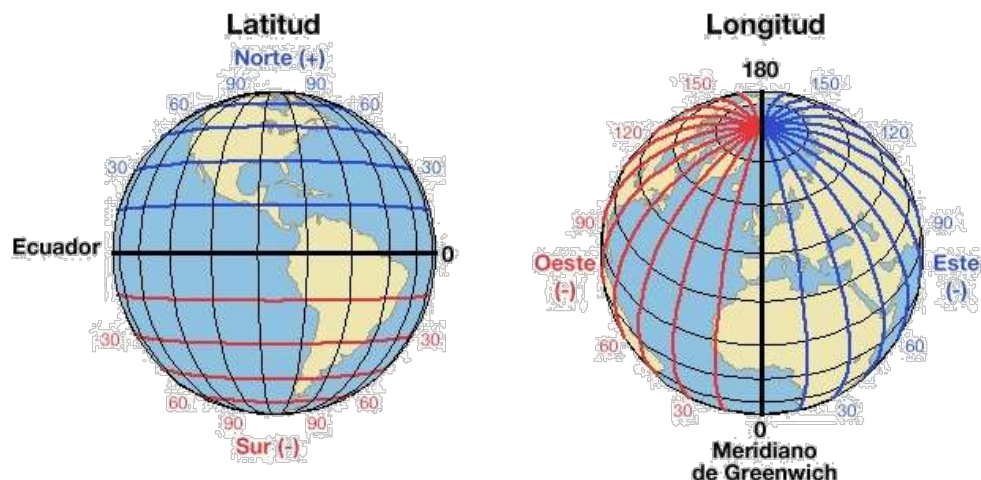


Figura 75. Situación del emplazamiento, España, respecto al Ecuador y al Meridiano de Greenwich. [39].

A continuación, se explican los pasos a seguir en la **web de la Comisión Europea PVGIS para conseguir los datos de la irradiación en el emplazamiento en función de los parámetros calculados**. Esta página web proporciona tanto los datos de irradiación como el costo económico de la instalación en función del tipo de placa seleccionado, la potencia pico instalada y los datos sobre el interés y la vida útil de la instalación. En este caso solo se va a utilizar para realizar una búsqueda de los parámetros de irradiación solar.

La Figura 76 muestra una imagen de la interfaz de la página web. Dado que se ha decidido diseñar una instalación conectada a la red, para introducir los *inputs* en la herramienta se utiliza la pestaña *Grid Connected*. Aun habiendo calculado de manera aproximada la pendiente y el azimut del emplazamiento, se va a realizar una descarga de información con los parámetros optimizados por la herramienta. Más adelante se comprobará cómo estos valores no presentan diferencias significativas respecto a los que se obtienen realizando los cálculos como se ha explicado anteriormente.

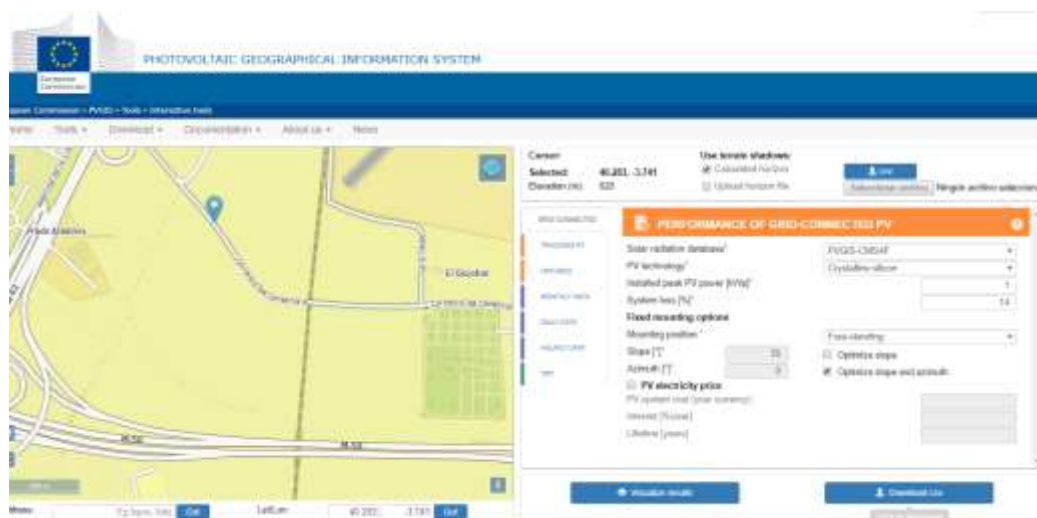


Figura 76. Parámetros para el diseño de instalación Grid Connected. Fuente: PVGIS Comisión Europea.

A continuación, se utiliza a la pestaña de *Monthly Data* mostrada en la Figura 77 para especificar la información que se desea descargar. En este caso se han seleccionado los datos de irradiación horizontal, la irradiación directa normal y la irradiación en el ángulo óptimo, además del radio de difusión y la temperatura media en el emplazamiento que se tienen entre los años 2007 y 2016.

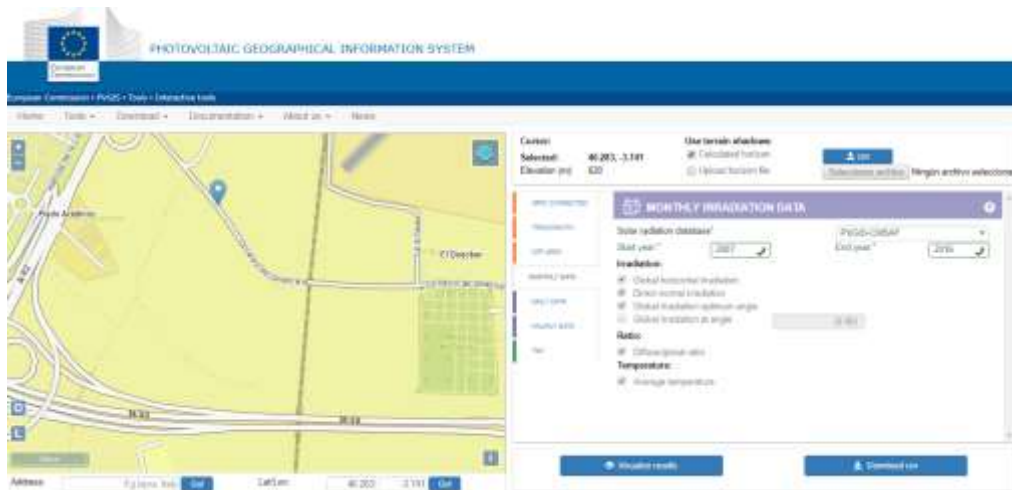


Figura 77. Extracción de datos PV. Fuente: PVGIS Comisión Europea.

Realizando la descarga de la información se obtiene lo siguiente. La Figura 78 muestra las irradiaciones solicitadas entre 2007 y 2017. Se comprueba que, efectivamente, los valores registrados tanto de irradiación horizontal como de irradiación normal directa son iguales o inferiores a los valores de la irradiación optimizada según la inclinación detectada por la herramienta como óptima,  $34^\circ$ . Como puede verse la diferencia en algunos puntos ronda los  $40\text{-}50 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$  lo cual respalda la necesidad de instalar los paneles con la inclinación optimizada.

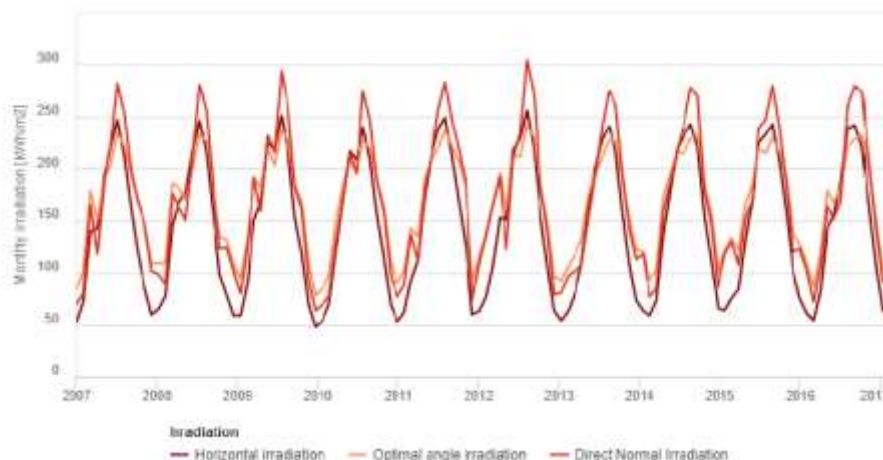


Figura 78. Histórico de irradiación solar en el emplazamiento. Fuente: PVGIS Comisión Europea.

Dado que existe un patrón constante en la irradiación a lo largo de los años, para la realización de los cálculos, se van a utilizar los datos más recientes. Así la Tabla 5 muestra la información relativa a la temperatura y la irradiación solar (H) del año 2016 y se compara con la irradiación óptima para una pendiente de  $31.5^\circ$  obtenida de una segunda descarga de la página web. Se puede comprobar la validez del método simplificado pues ofrece un valor de pendiente muy similar al ofrecido por la herramienta dado que las irradiaciones son muy similares.

| Mes  | H_horizontal (kWh/m2/dia) | H_normal (kWh/m2/dia) | H_opt: $34^\circ$ (kWh/m2/dia) | H_opt: $31,5^\circ$ (kWh/m2/dia) |
|------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Ene  | 54,8                      | 72                    | 86,8                           | 85                               |
| Feb  | 82,7                      | 107                   | 120                            | 118                              |
| Mar  | 142                       | 165                   | 180                            | 179                              |
| Abr  | 155                       | 152                   | 168                            | 168                              |
| Mayo | 187                       | 169                   | 181                            | 183                              |
| Jun  | 239                       | 260                   | 221                            | 224                              |
| Jul  | 242                       | 280                   | 229                            | 233                              |
| Ago  | 221                       | 274                   | 232                            | 234                              |
| Sep  | 164                       | 206                   | 200                            | 199                              |
| Oct  | 108                       | 144                   | 152                            | 150                              |
| Nov  | 64,3                      | 92                    | 102                            | 99,9                             |
| Dic  | 58,2                      | 98                    | 105                            | 102                              |

Tabla 5. Irradiación horizontal normal y optimizada para inclinación  $34^\circ$ . Fuente: Elaboración propia. Datos: PVGIS Comisión Europea.

Para la realización del diseño se toma el dato de irradiación solar más pequeño de la columna de optimizados por la herramienta de forma que se diseñará la instalación para el mes más desfavorable del año, es decir, la mínima energía que los paneles serán capaces de generar por año.

A continuación se seleccionan los paneles fotovoltaicos a utilizar puesto que para el cálculo de la potencia generada se necesita saber la potencia pico y el número de paneles que es posible instalar en el emplazamiento. El generador fotovoltaico estará formado por paneles policristalinos (tecnología fotovoltaica más madura) de 60 células. Los módulos elegidos son de  $256 W_p$  de capacidad CEM



## MEMORIA DESCRIPTIVA

también conocido como potencia pico. En la Tabla 6 se muestran los datos proporcionados por el fabricante para los paneles seleccionados.

| Panel fotovoltaico. Especificaciones técnicas. |                        |
|------------------------------------------------|------------------------|
| Potencia [W]                                   | 265                    |
| Voltaje en circuito abierto [Voc]              | 38.1                   |
| Voltaje en el punto de máxima potencia [Vmp]   | 31.1                   |
| Corriente de cortocircuito (Isc) [A]           | 8.98                   |
| Corriente nominal (Imp) [A]                    | 8.37                   |
| Sistema de voltaje máximo                      | 1000VDC                |
| Tipo de célula                                 | Silicio Policristalino |
| Número de células                              | 60 (6x10)              |
| Dimensiones [mm]                               | 1650x992x40            |
| Peso [kg]                                      | 19                     |
| Precio [€]                                     | 165                    |



Tabla 6. Especificaciones técnicas paneles solares.

Para **calcular el número de paneles** que es posible instalar en el solar seleccionado se han tenido en cuenta las siguientes **hipótesis o consideraciones**:

- Se considerarán unos márgenes de 1,5 metros con respecto al solar delimitado en la Figura 73.
- Los paneles se agruparán en grupos de 10.
- Para facilitar las tareas de mantenimiento como, por ejemplo, la limpieza de los paneles se ha considerado un pasillo intermedio, con capacidad suficiente para la circulación de un coche, 4 metros.
- Se dejará un espacio de medio metro entre grupos de placas de una misma fila.
- Para estimar el número de filas se considerará que las placas no se encuentran inclinadas y se dejará un espacio de medio metro entre filas.

De esta forma se calcula que el solar es capaz de albergar aproximadamente **32.800 paneles**, divididos en 16 grupos de 10 paneles por fila, 8 grupos en el lado izquierdo del pasillo central y otros 8 grupos en el lado derecho, y 205 filas. La Figura 75 muestra un esquema de la instalación, sin respetar escalas, para facilitar la comprensión.

MEMORIA DESCRIPTIVA

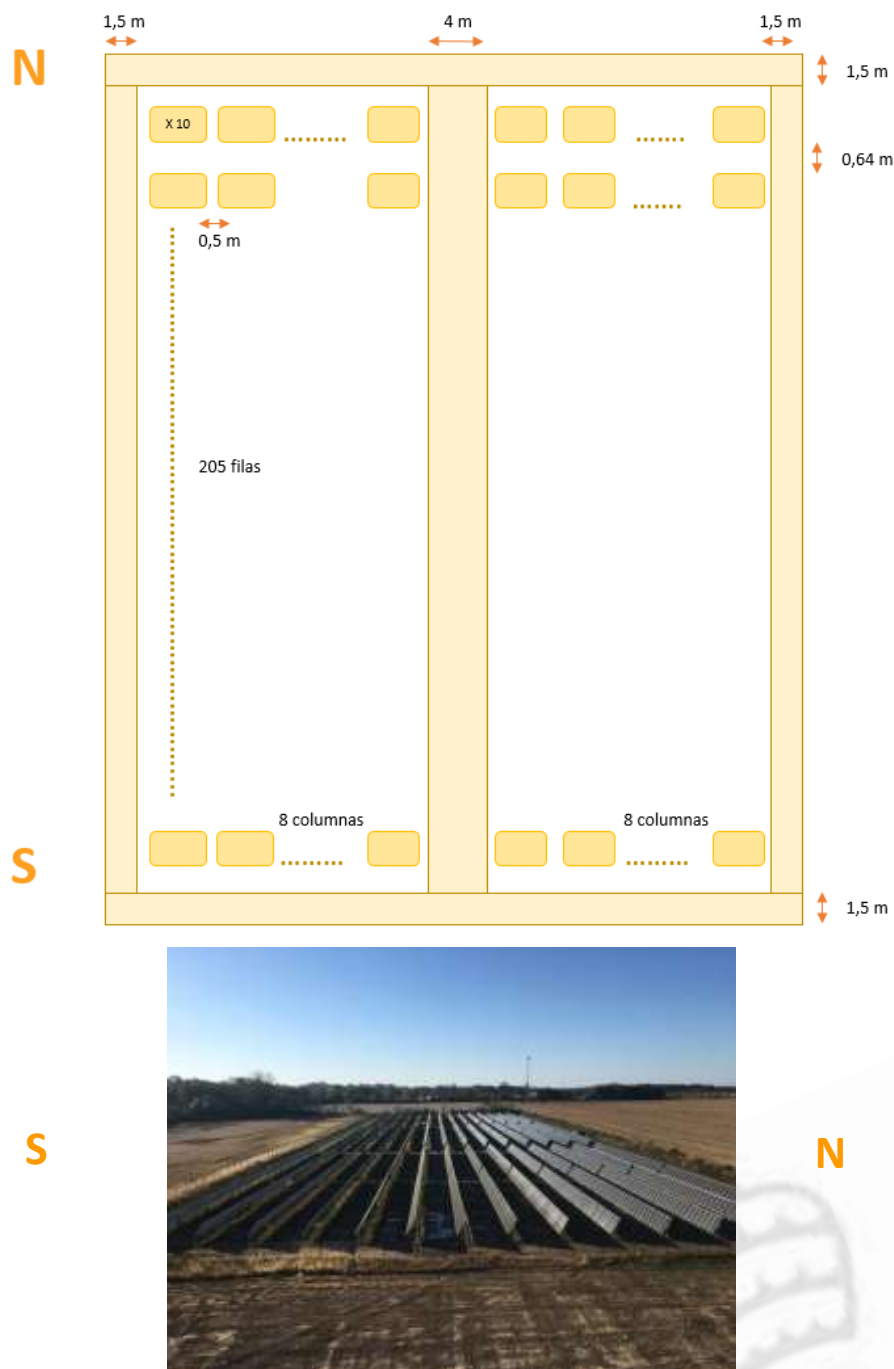


Figura 79 Distribución de los paneles fotovoltaicos en el sola. Vista en planta y estimación de la vista en perfil. Fuente: Elaboración propia.

Se puede comprobar que el espacio entre filas visto en planta indicado es de 0,64 metros. Esto se debe a que al estar las placas inclinadas la verdadera magnitud de las placas en planta se reduce de 0,992 metros a 0,852 metros quedando entonces un pasillo de 0,64 metros. A continuación se comprueba que la separación impuesta entre filas es lo suficientemente grande como para evitar que la sombra de las placas delanteras prive de sol a las traseras en las horas de

mayor irradiación, es decir, cuando el sol se encuentra perpendicular a los paneles. La Figura 80 muestra un croquis de la vista en perfil de las placas en las que se puede comprobar como la sombra de las placas delanteras no afectaría a las traseras.

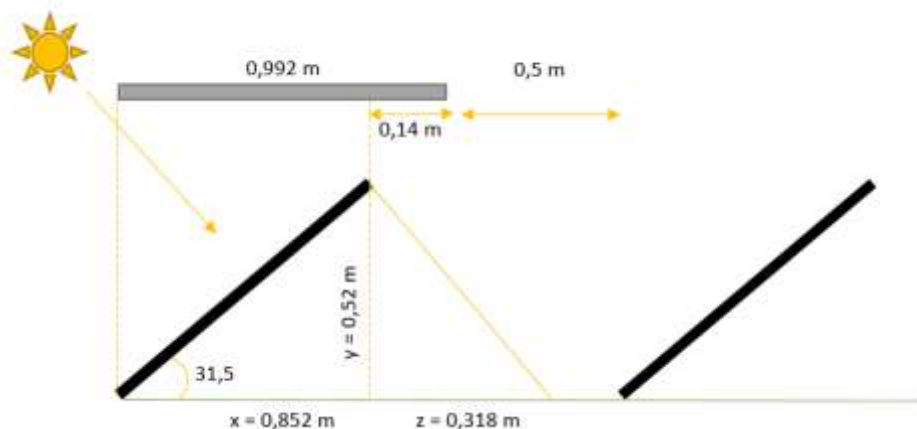


Figura 80. Vista en perfil disposición de las placas solares. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, teniendo en cuenta el número de paneles y su potencia pico se puede calcular el CEM (potencia pico instalada) de la instalación según la siguiente ecuación.

$$CEM = n^{\circ} \text{ paneles} * W_p = 32.800 * 265 W_p = 8.692.000 W_p = 8,692 MW_p$$

Para considerar el caso más desfavorable se va a utilizar un **factor de aprovechamiento global de la planta** del 80%, es decir, se consideran unas pérdidas del 20% de la capacidad generadora de los paneles debidas a calentamiento del sistema u otros factores que puedan disminuir su rendimiento. Según esta selección, la **producción de diseño** queda de 220,3 GWh anuales. Se recuerda que esta producción ha sido calculada a partir de la situación más desfavorable, es decir, cogiendo los datos de la irradiación solar del menor mes, por lo que en funcionamiento normal la planta realmente producirá por encima de esta cantidad.

$$DD_{\text{día}} = H_{\text{opt}} * CEM * PR = 86,8 kW * 8.692 kWh * 0.8 = 603,57248 \frac{MWh}{\text{día}}$$

$$PD_{\text{anual}} = PD_{\text{día}} * 365 \text{ días} = 220,3 GWh \text{ anuales}$$

A continuación se va a realizar una estimación del consumo que puede representar un viaje de Hyperloop para la ruta estudiada. Dado que el sistema se encuentra en fases de desarrollo **no se disponen de datos objetivos de la potencia** que puede llegar a tener la tecnología. Sin embargo, a grandes rasgos, se considera que la potencia sería similar a la de los trenes de alta velocidad actuales, basándose en la hipótesis de que el ahorro de energía asociado a la menor resistencia aerodinámica sería aproximadamente igual a la energía necesaria para generar las condiciones de baja presión en los tubos.

## MEMORIA DESCRIPTIVA

La potencia asociada el TGV francés está entre 6.500 kW y 12.000 kW en función del modelo. Para la realización de los cálculos en la ruta estimada se utilizará 10.000 kW. La distancia que separa ambas estaciones es aproximadamente 450 km y teniendo en cuenta una velocidad media de 700 km/h el recorrido podría realizarse en 39 minutos con un consumo aproximado de 6,5MWh. Esto significa que, en el peor de los casos, la planta diseñada podría soportar 93 viajes al día.

$$Tiempo = \frac{distancia}{velocidad\ media} = \frac{450\ km}{700\ \frac{km}{h}} = 0,6428\ h \sim 39\ minutos$$

$$\begin{aligned} Consumo &= potencia * tiempo = 10.000\ kW * 0,6428\ h \\ &= 6.428,57\ kWh \sim 6,5\ MW\ por\ viaje \end{aligned}$$

El **estudio aquí descrito puede ser escalable** al solar adyacente de forma que se aumente la generación de energía y se reduzca todavía más el impacto de esta instalación en la red eléctrica o con el fin de proporcionar energía a la red. Como ya se ha mencionado anteriormente, algunas de las alternativas que se barajan para la alimentación de Hyperloop plantean la instalación de placas en la parte superior del tubo o incluso en el propio tubo a modo de envoltura. La ventaja de este tipo de propuesta es que no es necesaria expropiación de terrenos a lo largo de la ruta para la instalación de los parques solares, sin embargo, se requeriría un estudio de irradiación a lo largo del recorrido del tubo y analizar la posibilidad de instalar baterías en las zonas del trayecto en las que no se tenga acceso a la red. La siguiente figura ilustra el concepto.

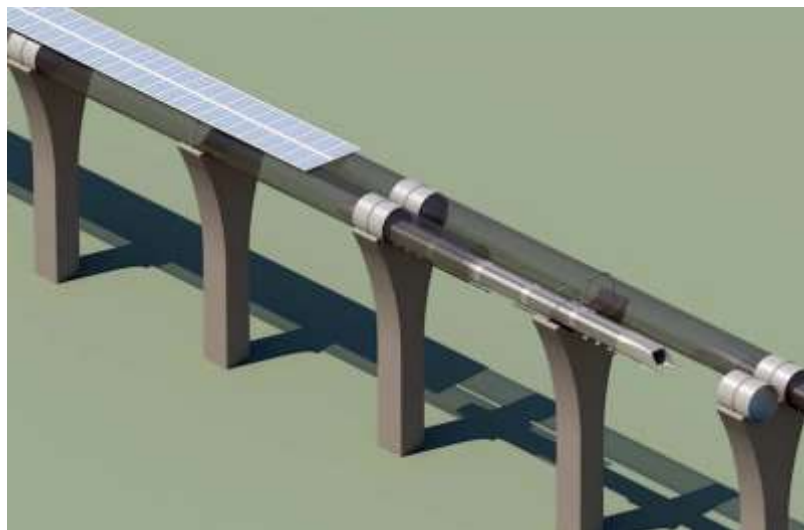


Figura 81. Alternativa para instalación de paneles sobre los tubos Hyperloop. [65]

*Rentabilidad de la instalación LCOE*

Para analizar la competitividad de la instalación diseñada se procede al cálculo de su LCOE (*Levelized Cost Of Energy*). Este cálculo permite obtener el coste por kWh generado según la siguiente ecuación:

$$LCOE = \frac{\sum_1^n \frac{I + M + F}{(1+r)^n}}{\sum_1^n \frac{E}{(1+r)^n}}$$

Donde n: vida útil de la instalación (25 años)

r: tasa de descuento<sup>8</sup> (6%)

I: Inversión inicial

M: Costes de operación y mantenimiento

F: Costes de carburante (en este caso nulos)

E: Energía anual generada por la instalación

En la **inversión inicial** se ha de tener en cuenta tanto el coste de los paneles como el coste del resto del sistema (reguladores, inversores...) conocidos como BOS (Balance Of Systems), los costes asociados a la ingeniería, obra civil, el margen del contratista y las licencias. Dado que este estudio se centra en el diseño cualitativo de la instalación fotovoltaica no se dispone de estos datos por lo que se recurre a fuentes oficiales para obtener una estimación, ver Tabla 7.

| CAPEX [EUR/kW]       | PV rooftop small (5-15 kWp) | PV rooftop large (100-1000 kWp) | PV utility-scale (> 2 MWp) | Wind onshore | Wind offshore | Biogas | Brown coal | Hard coal | CCGT | GT  |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------|---------------|--------|------------|-----------|------|-----|
| Investment 2018 low  | 1200                        | 800                             | 600                        | 1500         | 3100          | 2000   | 1600       | 1300      | 800  | 400 |
| Investment 2018 high | 1400                        | 1000                            | 800                        | 2000         | 4700          | 4000   | 2200       | 2000      | 1100 | 600 |

Tabla 7. Valores de CAPEX de distintas energías renovables. Fuente: Fraunhofer. [23]

Según el informe “*Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies*” publicado en marzo de 2018 por el Instituto Fraunhofer sobre sistemas de energía solar, el CAPEX asociado a un proyecto escala *utility* se aproxima teniendo en cuenta un coste de 600€/kW. [23]

$$I = CAPEX = 600 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 8.692 \text{ kW} = 5.215.200 \text{ €}$$

<sup>8</sup> El WACC, de las siglas en inglés Weighted Average Cost of Capital, también denominado coste promedio ponderado del capital (CPPC), es la tasa de descuento que se utiliza para descontar los flujos de caja futuros a la hora de valorar un proyecto de inversión. En el caso de España para energías renovables oscila entre 7-9%



## MEMORIA DESCRIPTIVA

Teniendo en cuenta que los **costos de operación**, también conocidos como OPEX, se encuentran entre el 2,5 % y el 5 % del valor del CAPEX, se tienen 260.760€ de gastos de operación y mantenimiento.

$$M = OPEX = 5\% CAPEX = 0,05 * 5.215.200 = 260.760 \text{ €}$$

Con todas estas consideraciones y teniendo en cuenta la fórmula del LCOE explicada anteriormente se obtiene un valor de **0,02486 €/kWh**. La Figura 82 muestra una gráfica obtenida del informe “Renewable Power Generation Costs in 2018” realizado y publicado por IRENA (*International Renewable Energy Agency*) en 2019. En esta gráfica se observa la evolución del promedio ponderado global del valor del LCOE. La base de datos de IRENA contiene datos del coste de alrededor 15.000 proyectos comparados con los obtenidos de otras bases de datos (BNEF, Auctions Database, MAKE Consulting, WindEurope, etc). El valor obtenido en el cálculo de esta instalación se encuentra por debajo del valor registrado para el año 2018 (0,9 USD/kWh lo que equivale aproximadamente a 0,81 €/kWh). Este dato considera las instalaciones realizadas en 2018 en todo el mundo, por lo que la diferencia que presenta con respecto al dato calculado para la instalación diseñada se puede deber, entre otras cosas, a que en España la fotovoltaica es más rentable que en otros países como Reino Unido debido a la disponibilidad de mayor cantidad de horas de sol. [38]

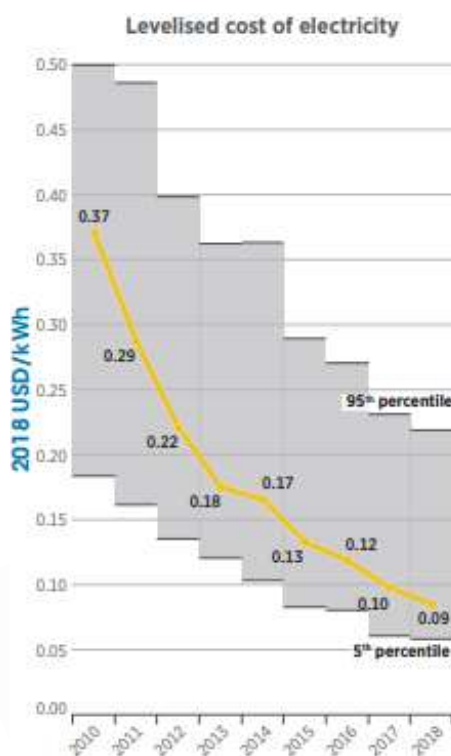


Figura 82. Evolución del promedio ponderado global del valor del LCOE para PV. [38]





## Capítulo 5 Conclusiones

Como ha podido comprobarse a lo largo del documento, **Hyperloop es un método de transporte que se basa en una tecnología incipiente que se encuentra en fases de desarrollo**. A pesar de haberse popularizado a partir de la publicación del documento Hyperloop Alpha por parte de Elon Musk y su empresa SpaceX, parte de **ideas y conceptos que se remontan a la época de 1800** y llevan desarrollándose más de 200 años. Sin embargo, estos conceptos se están haciendo realidad ahora gracias a los avances tecnológicos y a las empresas de otros sectores que muestran su interés a partir de inversiones para el desarrollo de este método de transporte.

En cuanto a la tecnología detrás de Hyperloop, parece evidente que los desarrollos van a seguir en busca de una **alimentación totalmente eléctrica mediante la utilización de energías renovables**. Dado los niveles actuales de contaminación en las ciudades y la congestión de los métodos de transporte tradicionales, este será un punto decisivo a la hora de elegir la tecnología en la que se termine basando el sistema. **Su principio de funcionamiento está claramente centrado en la levitación magnética y motores lineales en sus distintas versiones**. El objetivo a futuro es conseguir un sistema homogéneo y estandarizado que permita la circulación de las cápsulas entre países por lo que la empresa que consiga un sistema atractivo en términos de velocidad, eficiencia, impacto medioambiental, comodidad y seguridad, conseguirá la aceptación y apoyo de los gobiernos y marcará los estándares de la tecnología.

A raíz de los **acuerdos firmados entre los gobiernos y las distintas empresas se puede afirmar que el interés que despierta una tecnología como Hyperloop es bastante alto**. Sin embargo, a partir de la información obtenida en los medios y de la matriz ascendente centesimal planteada en el primer capítulo se podría decir que, aunque la sociedad está interesada en el valor añadido que puede proporcionar Hyperloop tanto en su día a día como en el de los negocios, la realidad es que, dadas las velocidades en las que operaría el sistema, las empresas y los gobiernos tendrán que realizar una importante gestión del cambio de cara a la implantación Hyperloop.

A pesar de la posible reticencia que puedan tener a día de hoy las personas respecto circular en cápsulas a 1.000 km/h a nivel de la corteza terrestre, el Capítulo 3 pone de manifiesto la necesidad de una sociedad que crece exponencialmente de encontrar un método de transporte que permita aligerar la cantidad de población viviendo en las ciudades, así como el nivel de contaminación en las mismas. **Los sistemas de transporte tradicionales además de ser más**

**contaminantes están llegando a sus límites de saturación** con la población existente, lo cual reafirma la importancia de crear y ofrecer otros sistemas de transporte que puedan soportar los desplazamientos tanto de mercancías como de personas que realicen los 11.200 millones de personas que se prevén para 2.100 según la División de Población del Departamento de Asunto Económicos y Sociales de las Naciones Unidas.



Figura 83. Población mundial proyectada hasta 2.100. Fuente: División de Población del Departamento de Asunto Económicos y Sociales de las Naciones Unidas. [49]

Además de crecer la población está evolucionando, **los consumidores desean cada vez más la entrega en el mismo día y las empresas quieren cadenas de suministro cada vez más eficientes y automatizadas** que les permitan aumentar la capacidad y crecer. Un sistema como Hyperloop permitirá el crecimiento de la entrega bajo demanda a menor coste que un avión, en aproximadamente el mismo tiempo y sin huella ecológica negativa. Además, al permitir la entrega de mercancías más rápidamente se reducen los inventarios reduciendo así los costos de almacenamiento.

Hyperloop está siendo diseñado para convertirse en el **método de transporte a gran escala y velocidad menos contaminante del mundo**. Al igual que cualquier otro método de transporte Hyperloop tiene ventajas e inconvenientes. El principal inconveniente que tiene la tecnología es la necesidad de inversión para el desarrollo de la tecnología y para la puesta en marcha. Se puede considerar que **tiene mayor impacto visual que otros medios de transporte**, sin embargo, su diseño permitiría **reducir el ruido, los costos operacionales y de mantenimiento y la dependencia de las condiciones meteorológicas**. Gracias a la eliminación del factor humano mediante la automatización de todo el sistema, Hyperloop será **uno de los métodos de transporte más seguros**.

Como ya se ha mencionado anteriormente este sistema es posible gracias a los desarrollos tecnológicos y la evolución de la industria. En este sentido, **Hyperloop se apoya en tecnologías propias de la cuarta revolución industrial, también**



## MEMORIA DESCRIPTIVA

**conocida como Industria 4.0.** En este documento se ha descrito la utilidad de algunas de las tecnologías características de esta cuarta revolución en el sistema Hyperloop. En concreto se han explicado y aplicado los conceptos de **Cloud, Edge, Mist Computing** y los **entornos IoT** en el sistema de comunicación y control que se encarga de gestionar tanto el movimiento autónomo de las cápsulas como su correcto funcionamiento y monitorización. Sin embargo, Hyperloop se apoyará en más tecnologías 4.0 como por ejemplo la **realidad virtual** para mejorar la experiencia del usuario puesto que las cápsulas están cerradas al exterior, la **realidad aumentada** que permitirá a los operarios realizar el mantenimiento de las instalaciones y cápsulas de manera veloz y eficaz e incluso **impresión 3D** para la fabricación de piezas complejas e *in situ* en el mantenimiento, tanto de los tubos como de las cápsulas, para diseñar el interior de las cápsulas e incluso las estaciones y paradas. Por su parte la tecnología **Blockchain** sería de utilidad para certificar el origen de la energía excedente volcada a la red como renovable.

Por todo ello, Hyperloop además de representar una **oportunidad de mercado para un amplio número de empresas** existentes también **supone la creación de un océano azul. Mientras las aerolíneas o los trenes actuales se encuentran en un océano rojo** compitiendo entre ellos para incrementar su cuota de mercado a base de reducir sus márgenes o mejorar la calidad del servicio, Hyperloop supone un nuevo método de transporte. Proporciona la velocidad de un avión a nivel de corteza terrestre al tiempo que mantiene la comodidad de un tren gracias a la tecnología de levitación magnética y generar el vacío en los tubos.





## Capítulo 6 Bibliografía

- [1] ABERTIS (2018). *ROAD TECH*. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.ABERTIS.COM/ONTHEROAD/THE-FUTURE-OF-MOBILITY/?LANG=EN](https://www.abertis.com/ontheroad/the-future-of-mobility/?lang=en)
- [2] ACELERACIÓN Y DECELERACIÓN HYPERLOOP, IMAGEN. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/IMGRES?IMGURL=HTTP%3A%2F%2FWWW.MAGNETICTRANSPORTSYSTEMS.COM%2FIMAGES%2FMAGNETMOTION.GIF&IMGREFURL=HTTP%3A%2F%2FWWW.MAGNETICTRANSPORTSYSTEMS.COM%2FLINEARMOTORS2.SHTML&DOCID=7xMUFBQbTKFXTFM&TBNID=zE8bk3Kh1JFw7M%3A&VET=10AHUKEWihQMyQsvDIAHVYDGMBHR70ADAQMWHOKA0WDQ..i&w=565&h=266&BIH=969&BIW=1920&q=IMAGENES%20LINEAR%20INDUCTION%20MOTOR&VED=0AHUKEWihQMyQsvDIAHVYDGMBHR70ADAQMWHOKA0WDQ&IACT=MRC&UACT=8#H=266&IMGDII=BpWvKsHR-Z4Q-M:&VET=10AHUKEWihQMyQsvDIAHVYDGMBHR70ADAQMWHOKA0WDQ..i&w=565](https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.magnetictransportsystems.com%2Fimages%2Fmagnetmotion.gif&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.magnetictransportsystems.com%2Flinearmotors2.shtml&docid=7xMUFBQbTKFXTFM&tbnid=zE8bk3Kh1JFw7M%3A&vet=10AHUKEWihQMyQsvDIAHVYDGMBHR70ADAQMWHOKA0WDQ..i&w=565&h=266&bih=969&biw=1920&q=imagenes%20linear%20induction%20motor&ved=0AHUKEWihQMyQsvDIAHVYDGMBHR70ADAQMWHOKA0WDQ&iact=mrc&uact=8#h=266&imgdii=BpWvKsHR-Z4Q-M:&vet=10AHUKEWihQMyQsvDIAHVYDGMBHR70ADAQMWHOKA0WDQ..i&w=565)
- [3] ADHERENCIA FERROVIARIA. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=FUERZAS+SOBRE+UNA+RUEDA&SOURCE=LNMS&TBM=ISCH&SA=X&VED=0AHUKEWjO3ZDTzu7IAHUHuRoKHUHFcmQQ\\_AUIECGB&BIW=1069&BIH=618#IMGRC=LFVEq8AAzC5L0M:](https://www.google.com/search?q=fuerzas+sobre+una+rueda&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0AHUKEWjO3ZDTzu7IAHUHuRoKHUHFcmQQ_AUIECGB&biw=1069&bih=618#imgrc=LFVEq8AAzC5L0M:)
- [4] AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE. (2016). IMAGEN. OBTENIDA DE  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=METODOS+DE+TRANSPORTE+SEGUN+VELOCIDAD&TBM=ISCH&TBS=RIMG:CTvZJqALT9k5IJGQZ4YJJHLWNAOCA-7Id5YPTWRS18E1O5vQ1dYxs6F8NOGOxRPryNHZERTekMct9EBVoUhyJHKLhSoSCSPNHGMmctY0ETFI\\_115PsYKGKHIJA4ID7sh3LG8RYNBMM1SGPVIQeGLNZFKXwTU7MXGZFGsE31UvWCoSCerv1JGzoXyCEUQNZty9MTTJKHIJ4AJGs-vI2HMR-f083PWmIPIQEGkRFN6Qxy30QBED2IAAnoV1BCoSCW-HSHIkCOUFESSMxiQ0FM74&TBO=u&SA=X&VED=2AHUKEWiEr\\_DX16NIAHXx1UAKHY\\_wA9cQ9C96BAgBEBs&BIW=1280&BIH=613&DPR=1.1#IMGRC=GAhRO4vUUL-PWM:](https://www.google.com/search?q=metodos+de+transporte+segun+velocidad&tbm=isch&tbs=rimg:CTvZJqALT9k5IJGQZ4YJJHLWNAOCA-7Id5YPTWRS18E1O5vQ1dYxs6F8NOGOxRPryNHZERTekMct9EBVoUhyJHKLhSoSCSPNHGMmctY0ETFI_115PsYKGKHIJA4ID7sh3LG8RYNBMM1SGPVIQeGLNZFKXwTU7MXGZFGsE31UvWCoSCerv1JGzoXyCEUQNZty9MTTJKHIJ4AJGs-vI2HMR-f083PWmIPIQEGkRFN6Qxy30QBED2IAAnoV1BCoSCW-HSHIkCOUFESSMxiQ0FM74&tbo=u&sa=X&ved=2AHUKEWiEr_DX16NIAHXx1UAKHY_wA9cQ9C96BAgBEBs&biw=1280&bih=613&dpr=1.1#imgrc=GAhRO4vUUL-PWM:)
- [5] ANÁLISIS SECTOR FREIGHT. OBTENIDO DE [HTTPS://EC.EUROPA.EU/EUROSTAT/STATISTICS-EXPLAINED/INDEX.PHP/FREIGHT\\_TRANSPORT\\_STATISTICS#ROAD\\_FREIGHT](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Freight_transport_statistics#Road_freight)
- [6] ANÁLISIS SECTOR TRANSPORTE DE PERSONAS. OBTENIDO DE  
[HTTPS://EC.EUROPA.EU/EUROSTAT/STATISTICS-EXPLAINED/INDEX.PHP/PASSENGER\\_TRANSPORT\\_STATISTICS#AIR\\_PASSENGERS](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Passenger_transport_statistics#Air_passengers)
- [7] ANTECEDENTES HYPERLOOP. OBTENIDO DE  
[HTTPS://ES.SLIDESHARE.NET/MACHAMADAGANAPATHI/VACTRAIN-AN-INSIGHT-TO-HYPERLOOP](https://es.slideshare.net/machamadaganapathi/vactrain-an-insight-to-hyperloop)



MEMORIA DESCRIPTIVA

- 
- [8] AVIÓN SUPERSÓNICO Y COMERCIAL, IMÁGENES. OBTENIDO DE  
[HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/AVI%C3%B3N\\_SUPERS%C3%B3nico#/MEDIA/ARCHIVO:TU-144.JPG](https://es.wikipedia.org/wiki/Avi%C3%B3n_supers%C3%B3nico#/media/Archivo:TU-144.jpg)  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=AVION+COMERCIAL+IMAGEN&SOURCE=LNMS&TBM=ISCH&SA=X&VED=0AHUKEWJ\\_HUGWl\\_HIAHUNCROKHxzNCdsQ\\_AUIECGB&BIW=1069&BIH=618&DPR=2#IMGRC=1HGE\\_QzESnYVXM](https://www.google.com/search?q=avion+comercial+imagen&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0AHUKEWJ_HUGWl_HIAHUNCROKHxzNCdsQ_AUIECGB&biw=1069&bih=618&dpr=2#imgsrc=1HGE_QzESnYVXM):
- [9] AVIONES COMERCIALES Y SUPERSÓNICOS. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.VIX.COM/ES/BTG/CURIOSIDADES/7898/A-QUE-VELOCIDAD-VUELAN-LOS-AVIONES](https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/7898/a-que-velocidad-vuelan-los-aviones) [HTTPS://COMPUTERHOJ.COM/LISTAS/LIFE/10-AVIONES-TRIPULADOS-MAS-RAPIDOS-DEL-MUNDO-76641](https://computerhoj.com/listas/life/10-aviones-tripulados-mas-rapidos-del-mundo-76641)
- [10] BCD ENGINEERING (2011). *MAGLEV WORLDWIDE STATUS AND TECHNICAL REVIEW*. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PUBLICATION/236993225\\_MAGLEV\\_-\\_WORLDWIDE\\_STATUS\\_AND\\_TECHNICAL\\_REVIEW](https://www.researchgate.net/publication/236993225_MAGLEV_-_WORLDWIDE_STATUS_AND_TECHNICAL_REVIEW)
- [11] COMISIÓN EUROPEA (2018). *MOBILITY AND TRANSPORT*. OBTENIDO DE  
[HTTPS://EC.EUROPA.EU/TRANSPORT/FACTS-FUNDINGS/STATISTICS/POCKETBOOK-2018\\_EN](https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2018_en)
- [12] CONSTRUCCIÓN CENTRO DE EXPERIMENTACIÓN HYPERLOOP EN MÁLAGA. OBTENIDO DE  
[HTTPS://ELPAIS.COM/ECONOMIA/2018/08/07/ACTUALIDAD/1533644614\\_268555.HTML](https://elpais.com/economia/2018/08/07/actualidad/1533644614_268555.html)
- [13] CONTAMINACIÓN DE LOS MÉTODOS DE TRANSPORTE. OBTENIDO DE  
[HTTPS://NOTICIAS.ELTIEMPO.ES/QUE-MEDIO-DE-TRANSPORTE-CONTAMINA-MAS/](https://noticias.eltiempo.es/que-medio-de-transporte-contamina-mas/)
- [14] CONTAMINACIÓN MÉTODOS DE TRANSPORTE. OBTENIDO DE  
[HTTPS://ELPAIS.COM/SOCIEDAD/2019/06/21/ACTUALIDAD/1561139209\\_974079.H](https://elpais.com/sociedad/2019/06/21/actualidad/1561139209_974079.html)  
TML [HTTPS://WWW.ABC.ES/SOCIEDAD/ABCI-PROPUESTA-ALEMANA-ANTICONTAMINACION-SOLO-TRES-VUELOS-PERSONA-201904140146\\_NOTICIA.HTML](https://www.abc.es/sociedad/abci-propuesta-alemana-anticontaminacion-solo-tres-vuelos-persona-201904140146_noticia.html)
- [15] CORREO NEUMÁTICO NY (1860). OBTENIDO DE  
[HTTP://WWW.CABOVOLO.COM/2009/06/EL-METRO-SECRETO-DE-NUEVA-YORK.HTML](http://www.cabovolo.com/2009/06/el-metro-secreto-de-nueva-york.html)  
[HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/TUBO\\_NEUM%C3%A1TICO](https://es.wikipedia.org/wiki/Tubo_neum%C3%A1tico)
- [16] DATOS IRRADIACIÓN SOLAR. OBTENIDO DE  
[HTTP://RE.JRC.EC.EUROPA.EU/PVG\\_TOOLS/EN/TOOLS.HTML](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html)
- [17] EL DIARIO.ES CIUDADES CON RESTRICCIÓN DE CIRCULACIÓN. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.ELDIARIO.ES/BALLENABLANCA/TRANSICION\\_ENERGETICA/CIUDADES-EUROPA-RESTRICCION-TRAFICO-ESPAA\\_0\\_870713415.HTML](https://www.eldiario.es/ballenablanca/transicion_energetica/ciudades-europa-restriccion-traffic-espaa_0_870713415.html)
- [18] ELECTROIMANES. OBTENIDO DE  
[HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELECTROIM%C3%A1N](https://es.wikipedia.org/wiki/Electroim%C3%A1n)
- [19] ESTRATEGIA 2020 EUROPA, (2017) OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.ECOINTELIGENCIA.COM/2011/03/LA-APUESTA-2020-2020-PARA-2020/](https://www.ecointeligencia.com/2011/03/la-apuesta-2020-para-2020/)
- [20] ESTUDIO DE COSTES INICIAL DE TRANSPOD. OBTENIDO DE: [HTTPS://TRANSPOD.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2017/07/TRANSPOD-INFRASTRUCTURE\\_EN\\_JULY-17-UPDATE2.PDF](https://transpod.com/wp-content/uploads/2017/07/transpod-infrastructure_en_july-17-update2.pdf)
- [21] ESTUDIO DE LAS APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA LEVITACIÓN MAGNÉTICA (2003). OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.FCEIA.UNR.EDU.AR/~FISICA3/MAGLEV.PDF](https://www.fceia.unr.edu.ar/~fisica3/MAGLEV.PDF)
- [22] FINAL DESIGN PACKAGE. GAIA HYPERLOOP TEAM (2016).
-



- [23] FRAUNHOFER (2018). LEVELIZED COST OF ELECTRICITY RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES. OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.ISE.FRAUNHOFER.DE/CONTENT/DAM/ISE/EN/DOCUMENTS/PUBLICATIONS/STUDIES/EN2018\\_FRAUNHOFER-ISE\\_LCOE\\_RENEWABLE\\_ENERGY\\_TECHNOLOGIES.PDF](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/EN2018_FRAUNHOFER-ISE_LCOE_RENEWABLE_ENERGY_TECHNOLOGIES.PDF)
- [24] GEORGE MEDHURST BOMBA DE AIRE COMPRIMIDO (1799). OBTENIDO DE [HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/GEORGE\\_MEDHURST](https://en.wikipedia.org/wiki/George_Medhurst)
- [25] HYPERLOOP ALPHA, (2013) OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.SPACEX.COM/SITES/SPACEX/FILES/HYPERLOOP\\_ALPHA-20130812.PDF](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)
- [26] HYPERLOOP ONE GLOBAL CHALLENGE. OBTENIDO DE [HTTPS://HYPERLOOP-ONE.COM/GLOBAL-CHALLENGE](https://hyperloop-one.com/global-challenge)
- [27] ICAI (2019). *IIoT And Cloud Communications*.
- [28] IMAGEN TREN FRANCÉS TGV. OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=TGV+FRANCIA&SOURCE=LNMS&TBM=ISCH&SA=X&VED=0AHUKEWIFVSPGHFHIAHVJDHOKHR8VCT4Q\\_AUIECGB&CSID=1560792782769690&BIW=1069&BIH=618#IMGRC=0APSHYUP7BTKNM:](https://www.google.com/search?q=TGV+FRANCIA&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0AHUKEWIFVSPGHFHIAHVJDHOKHR8VCT4Q_AUIECGB&csid=1560792782769690&biw=1069&bih=618#imgsrc=0APSHYUP7BTKNM:)
- [29] INDUCTRACK. OBTENIDO DE [HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INDUCTRACK](https://en.wikipedia.org/wiki/Inductrack)
- [30] INFORMACIÓN HARDT. OBTENIDO DE [HTTPS://HARDT.GLOBAL/](https://hardt.global/)  
[HTTPS://HARDT.GLOBAL/TECHNOLOGY-DEVELOPMENT/](https://hardt.global/technology-development/)
- [31] INFORMACIÓN HTT. OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.HYPERLOOP.GLOBAL/](https://www.hyperloop.global/)
- [32] INFORMACIÓN HYPER POLAND. OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.HYPERPOLAND.COM/PL/](https://www.hyperpoland.com/pl/)
- [33] INFORMACIÓN PROYECTO NUMBAI PUNE. OBTENIDA DE [HTTPS://WWW.DNAINDIA.COM/BUSINESS/REPORT-MUMBAI-TO-PUNE-IN-30-MINS-HYPERLOOP-TO-BEGIN-FIRST-PHASE-WORK-IN-DECEMBER-2764827](https://www.dnaindia.com/business/report-mumbai-to-pune-in-30-mins-hyperloop-to-begin-first-phase-work-in-december-2764827)
- [34] INFORMACIÓN TRANSPOD. OBTENIDO DE [HTTPS://TRANSPOD.COM/EN/](https://transpod.com/en/)
- [35] INFORMACIÓN TRENES. OBTENIDO DE [HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/TREN#EVIDENCIA\\_DE\\_DESARROLLO](https://es.wikipedia.org/wiki/Tren#Evidencia_de_desarrollo) // CAMBIAR POR EL LINK DE LAS IMÁGENES Y LA INFO DE BRIYI SOBRE TRENES
- [36] INFORMACIÓN VIRGIN HYPERLOOP ONE. OBTENIDO DE [HTTPS://HYPERLOOP-ONE.COM/FACTS-FREQUENTLY-ASKED-QUESTIONS](https://hyperloop-one.com/facts-frequently-asked-questions)
- [37] INFORMACIÓN ZELEROS. OBTENIDO DE [HTTPS://ZELEROS.COM/ES/INICIO/](https://zeleros.com/es/inicio/)
- [38] IRENA (2019). RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2018. OBTENIDO DE: [HTTPS://WWW.IRENA.ORG/-/MEDIA/FILES/IRENA/AGENCY/PUBLICATION/2019/MAY/IRENA\\_RENEWABLE-POWER-GENERATIONS-COSTS-IN-2018.PDF](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable_Power_Generations_Costs_in_2018.pdf)
- [39] LATITUD Y LONGITUD, IMAGEN. OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=LATITUD+LONGITUD&RLZ=1C1GCEA\\_ENES839ES839&SOURCE=LNMS&TBM=ISCH&SA=X&VED=0AHUKEWIMV\\_s14TJAHWEMFWKHCPASKQ\\_AUIECGB&BIW=1920&BIH=969#IMGRC=YB62tWtSJLQYQM:](https://www.google.com/search?q=latitud+longitud&rlz=1C1GCEA_ENES839ES839&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0AHUKEWIMV_s14TJAHWEMFWKHCPASKQ_AUIECGB&biw=1920&bih=969#imgsrc=YB62tWtSJLQYQM:)
- [40] LÍMITE DE KANTROWITZ. OBTENIDO DE [HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/KANTROWITZ\\_LIMIT#HYPERLOOP](https://en.wikipedia.org/wiki/Kantrowitz_limit#Hyperloop)
- [41] MAGLEV, IMAGEN. OBTENIDA DE [HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=IMAGEN+MAGLEV+JAPONES&SOURCE=LNMS&](https://www.google.com/search?q=imagen+maglev+japones&source=lnms&)



MEMORIA DESCRIPTIVA

- TBM=ISCH&SA=X&VED=0AHUKEWJ47PT0JvHiAHUU4OAKHezGAIYQ\_AUIECGB&BIW=1069&BIH=618#IMGDII=WMHS68-JTY7pDM:&IMGRC=TWSUASMKCePCIM:
- [42] MATRIZ DE HALBACH, ESQUEMA. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=MATRIZ+DE+HALBACH&SOURCE=LNMS&TBM=ISCH&SA=X&VED=0AHUKEWiyXKed9U7iAHVNxYUKHXUPADoQ\\_AUIECGB&BIW=1069&BIH=569#IMGDII=8qXGJS0qYvV6XM:&IMGRC=\\_-RVdO22VgUQIM:](https://www.google.com/search?q=matriz+de+halbach&source=lnms&tbm=isch&sa=x&ved=0AHUKEWiyXKed9U7iAHVNxYUKHXUPADoQ_AUIECGB&biw=1069&bih=569#imgdii=8qXGJS0qYvV6XM:&imgrc=_-RVdO22VgUQIM)
- [43] MATRIZ DE HALBACH. OBTENIDO DE  
[HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/HALBACH\\_ARRAY](https://en.wikipedia.org/wiki/Halbach_array)
- [44] MEMORIA LEVITACIÓN. GAIA TEAM (2016).
- [45] MÉTODO DE LA INCLINACIÓN ÓPTIMA ANUAL. OBTENIDO DE  
[HTTPS://INGELIBREBLOG.WORDPRESS.COM/2014/01/09/INCLINACION-OPTIMA-DE-PLACAS-FOTOVOLTAICAS/](https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/01/09/inclinacion-optima-de-placas-fotovoltaicas/)
- [46] MUMETAL, CARACTERÍSTICAS. OBTENIDO DE  
[HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/MU-METAL](https://es.wikipedia.org/wiki/Mu-metal)
- [47] PERMEABILIDAD MAGNÉTICA  
[HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PERMEABILIDAD\\_MAGN%C3%A9TICA](https://es.wikipedia.org/wiki/Permeabilidad_magn%C3%A9tica)
- [48] PITCH, YAW AND ROLL. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=PITCH+YAW+AND+ROLL&RLZ=1C1GCEA\\_ENES839ES839&SOURCE=LNMS&TBM=ISCH&SA=X&VED=0AHUKEWJDM-WzzvLiAHUURhUIHQY7A2wQ\\_AUIECGB&BIW=1920&BIH=920#IMGRC=YMIcytMGgHA83M:](https://www.google.com/search?q=pitch+yaw+and+roll&rlz=1C1GCEA_ENES839ES839&source=lnms&tbm=isch&sa=x&ved=0AHUKEWJDM-WzzvLiAHUURhUIHQY7A2wQ_AUIECGB&biw=1920&bih=920#imgrc=YMIcytMGgHA83M)
- [49] POBLACIÓN MUNIDAL PROYECTADA 2100. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=CANTIDAD+DE+GENTE+EN+2050&RLZ=1C1GCEA\\_ENES839ES839&TBM=ISCH&SOURCE=IU&ICTX=1&FIR=TYs1TLbFNFD2M%253A%252CIRp\\_CtTPdUBVGM%252C\\_&VET=1&USG=AI4\\_-kT46AASiVMPAwCxm0HP7-W0jBb-HG&SA=X&VED=2AHUKEWJAm8\\_M6JHKAHwSUBUIHXJ3AS4Q9QEWAHoECAQQAww#IMGRC=TYs1TLbFNFD2M:&VET=1](https://www.google.com/search?q=cantidad+de+gente+en+2050&rlz=1C1GCEA_ENES839ES839&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=TYs1TLbFNFD2M%253A%252CIRp_CtTPdUBVGM%252C_&vet=1&usg=AI4_-kT46AASiVMPAwCxm0HP7-W0jBb-HG&sa=x&ved=2AHUKEWJAm8_M6JHKAHwSUBUIHXJ3AS4Q9QEWAHoECAQQAww#imgrc=TYs1TLbFNFD2M:&vet=1)
- [50] PRIMER METRO FUNCIONABA CON LOCOMOTORA DE VAPOR (1863). OBTENIDO DE  
[HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/METRO\\_\(SISTEMA\\_DE\\_TRANSPORTE\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Metro_(sistema_de_transporte))
- [51] PRIMER TRANVÍA ELÉCTRICO (1881). OBTENIDO DE  
[HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LOCOMOTORA\\_EL%C3%A9CTRICA](https://es.wikipedia.org/wiki/Locomotora_el%C3%A9ctrica)
- [52] PRIMER VUELO DE LOS HERMANOS WRIGHT (1903). OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=PRIMER+AVION&RLZ=1C1GCEA\\_ENES839ES839&OQ=PRIMER+AVION+&AQS=CHROME.0.0L6.2583J0J9&SOURCEID=CHROME&IE=UTF-8](https://www.google.com/search?q=primer+avion&rlz=1C1GCEA_ENES839ES839&oq=primer+avion+&aqs=chrome.69l57j0l3.3711j0j7&sourceid=chrome&ie=utf-8)
- [53] PRIMERA LOCOMOTORA DE VAPOR (1802). OBTENIDO DE  
[HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LOCOMOTORA](https://es.wikipedia.org/wiki/Locomotora)  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=PRIMERA+LOCOMOTORA+DE+VAPOR+1804&RLZ=1C1GCEA\\_ENES839ES839&OQ=PRIMERA+LOCOMOTORA+DE+&AQS=CHROME.0.69l59l2j69l57j0l3.3711j0j7&SOURCEID=CHROME&IE=UTF-8](https://www.google.com/search?q=primera+locomotora+de+vapor+1804&rlz=1C1GCEA_ENES839ES839&oq=primera+locomotora+de+&aqs=chrome.69l59l2j69l57j0l3.3711j0j7&sourceid=chrome&ie=utf-8)  
[HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LOCOMOTORA\\_EL%C3%A9CTRICA](https://es.wikipedia.org/wiki/Locomotora_el%C3%A9ctrica)



- [54] PROPUESTA HYPERCAN, CANADÁ. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.UNIVERSETODAY.COM/137283/PROPOSED-HYPERLOOP-ROUTE-TORONTO-MONTREAL/](https://www.universetoday.com/137283/proposed-hyperloop-route-toronto-montreal/)
- [55] REVISIÓN HORIZONTE 2030, (2018). OBTENIDO DE  
[HTTPS://ELPAIS.COM/ECONOMIA/2018/06/14/ACTUALIDAD/1528962952\\_159687.HTML](https://elpais.com/economia/2018/06/14/actualidad/1528962952_159687.html)
- [56] ROBERT GODDART (1910). OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.BUSINESSINSIDER.COM/HISTORY-HYPERLOOP-PNEUMATIC-TUBES-AS-TRANSPORTATION-2017-8?IR=T#IN-THE-MID-1860S-SOUTH-LONDON-CONSTRUCTED-THE-CRYSTAL-PALACE-ATMOSPHERIC-RAILWAY-WHICH-RAN-THROUGH-A-PARK-A-FAN-WHICH-MEASURED-22-FEET-IN-DIAMETER-PROPELLED-THE-TRAIN-ON-RETURN-JOURNEYS-THE-FANS-BLADES-REVERSED-SUCKING-THE-CARRIAGE-BACKWARDS-3](https://www.businessinsider.com/history-hyperloop-pneumatic-tubes-as-transportation-2017-8?IR=T#in-the-mid-1860s-south-london-constructed-the-crystal-palace-atmospheric-railway-which-ran-through-a-park-a-fan-which-measured-22-feet-in-diameter-propelled-the-train-on-return-journeys-the-fans-blades-reversed-sucking-the-carriage-backwards-3)
- [57] SISTEMA DE PROPULSIÓN, IMAGEN. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?Q=PROPULSION+LEVITACION+MAGNETICA&RLZ=1C1GCEA\\_ENES839ES839&TBM=ISCH&SOURCE=IU&ICTX=1&FIR=PFDP9PPLRMQBQVM%253A%252CTOUoVMCLG78MQM%252C\\_&VET=1&USG=AI4\\_-kT8y8RpJHV6GAH8XMWNHDSUZYSEMQ&SA=X&VED=2AHUKEWJAWDLA8vLIAHVPTHUIHTRQDWQQ9QEWAH0ECAQQA#imgdii=PL6NSow8Q\\_ALOM:&imgsrc=kDfZ31AFgKqfJM:&VET=1](https://www.google.com/search?q=PROPULSION+LEVITACION+MAGNETICA&RLZ=1C1GCEA_ENES839ES839&TBM=ISCH&SOURCE=IU&ICTX=1&FIR=PFDP9PPLRMQBQVM%253A%252CTOUoVMCLG78MQM%252C_&VET=1&USG=AI4_-kT8y8RpJHV6GAH8XMWNHDSUZYSEMQ&SA=X&VED=2AHUKEWJAWDLA8vLIAHVPTHUIHTRQDWQQ9QEWAH0ECAQQA#imgdii=PL6NSow8Q_ALOM:&imgsrc=kDfZ31AFgKqfJM:&VET=1)
- [58] SISTEMA DE PROPULSIÓN. LIM VS. LSM. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PUBLICATION/312027105\\_PROPULSION\\_OF\\_MAGNETIC\\_LEVITATION\\_TRAIN](https://www.researchgate.net/publication/312027105_PROPULSION_OF_MAGNETIC_LEVITATION_TRAIN) [HTTPS://COASTERFORCE.COM/FORUMS/THREADS/LIM-VS-LSM.36578/](https://coasterforce.com/forums/threads/lim-vs-lsm.36578/) [HTTP://WWW.COASTERSANDMORE.DE/RIDES/LIM/LIM\\_LSM.SHTML](http://www.coastersandmore.de/rides/lim/lim_lsm.shtml)
- [59] SISTEMA DE REFRIGERACIÓN MAGLEV, IMAGEN. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?BIW=1920&BIH=969&TBM=ISCH&SA=1&EI=AR8VXee3E9HBLWSctJ3YCA&Q=REFRIGERATOR+SYSTEM+MAGLEV&OQ=REFRIGERATOR+SYSTEM+MAGLEV&GS\\_L=IMG.3...6077.9031..9196...1.0..0.73.951.14.....0....1..GWS-WIZ-IMG.....0i8i30.MMTdF13Sivg#imgsrc=BWB41uIOcKvsSM:](https://www.google.com/search?biw=1920&bih=969&TBM=ISCH&SA=1&EI=AR8VXee3E9HBLWSctJ3YCA&Q=REFRIGERATOR+SYSTEM+MAGLEV&OQ=REFRIGERATOR+SYSTEM+MAGLEV&GS_L=IMG.3...6077.9031..9196...1.0..0.73.951.14.....0....1..GWS-WIZ-IMG.....0i8i30.MMTdF13Sivg#imgsrc=BWB41uIOcKvsSM:)
- [60] SPACEX HYPERLOOP POD COMPETITION (2015). OBTENIDO DE  
[HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/HYPERLOOP\\_POD\\_COMPETITION#CITE\\_NOTE-GEEKWIRE20170827-4](https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperloop_Pod_Competition#cite_note-geekwire20170827-4)
- [61] SUPERCONDUCTIVIDAD. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WP.ICMM.CSIC.ES/SUPERCONDUCTIVIDAD/APLICACIONES/](https://wp.icmm.csic.es/superconductividad/aplicaciones/)
- [62] TIPOS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA. OBTENIDO DE  
[HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/MAGLEV](https://en.wikipedia.org/wiki/Maglev)
- [63] TRL. OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.CLOUDWATCHHUB.EU/EXPLOITATION/BRIEF-REFRESHER-TECHNOLOGY-READINESS-LEVELS-TRL](https://www.cloudwatchhub.eu/exploitation/brief-refresher-technology-readiness-levels-trl)
- [64] TUBO NEUMÁTICO DE ALFRED ELY BEACH (1870). OBTENIDO DE  
[HTTPS://HIPERTEXTUAL.COM/2013/08/ORIGINAL-IDEA-HYPERLOOP-1870](https://hipertextual.com/2013/08/original-idea-hyperloop-1870)  
[HTTP://WWW.CABOVOLO.COM/2009/06/EL-METRO-SECRETO-DE-NUEVA-YORK.HTML](http://www.cabovolo.com/2009/06/el-metro-secreto-de-nueva-york.html)  
[HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/TUBO\\_NEUM%C3%A1TICO](https://es.wikipedia.org/wiki/Tubo_neum%C3%A1tico)
- [65] TUBOS CON PANELES SOLARES. OBTENIDO DE  
[HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/SEARCH?RLZ=1C1GCEA\\_ENES839ES839&BIW=1920&BIH=920&TBM=ISCH&SA=1&EI=GLATXc6IN-](https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA_ENES839ES839&biw=1920&bih=920&TBM=ISCH&SA=1&EI=GLATXc6IN-)



---

MEMORIA DESCRIPTIVA

ATGWEFSORIAg&Q=Pv+HYPERLOOP&OQ=Pv+HYPERLOOP&GS\_L=IMG.3...14651.16  
971..17434...0.0..0.65.735.12.....0....1..GWS-WIZ-  
IMG.....35i39j0i67j0j0i10j0i19j0i5i30i19j0i8i30i19j0i8i30.JvV6zQBW-  
6Q#IMGDII=7B-HRLAKX\_OkGM:&IMGRC=GNBGYROBC97B-M:



## PARTE II: ANEXOS



# Monthly irradiation data

## PVGIS-5 geo-temporal irradiation database

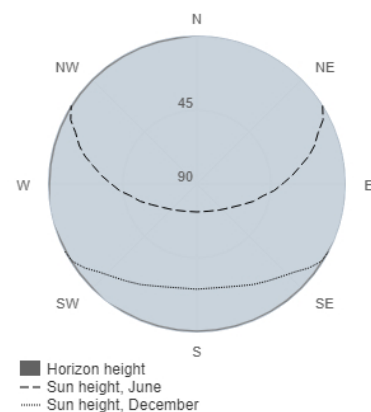
### Provided inputs

Latitude/Longitude: 40.283, -3.741  
 Horizon: Calculated  
 Database used: PVGIS-CMSAF  
 Start year: 2007  
 End year: 2016

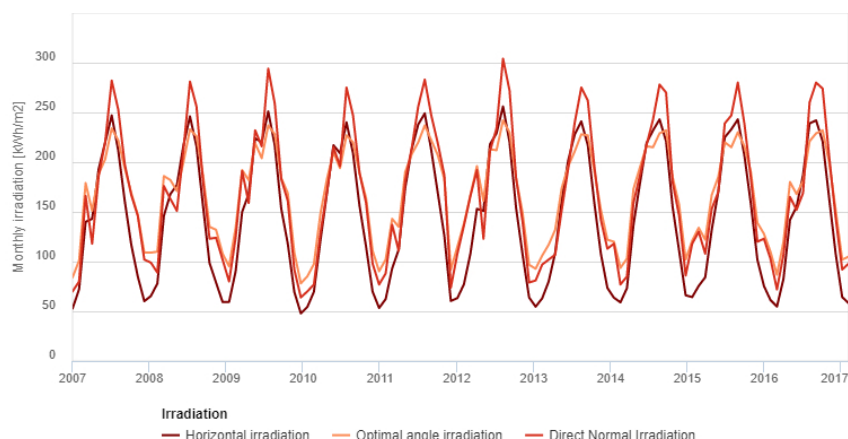
### Variables included in this report:

Global horizontal irradiation: Yes  
 Direct normal irradiation: Yes  
 Global irradiation optimum angle: Yes  
 Global Irradiation at °: No  
 Diffuse/global ratio: Yes  
 Average temperature: Yes

### Outline of horizon at chosen location:



## Monthly solar irradiation estimates



### Global horizontal irradiation

| Month     | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| January   | 52.8 | 65.3 | 59.5 | 54.4 | 62.2 | 77.1 | 63   | 59   | 75.5 | 54.8 |
| February  | 72.2 | 77.9 | 90.1 | 69.6 | 93.1 | 108  | 80   | 73.3 | 84.2 | 82.7 |
| March     | 140  | 146  | 150  | 121  | 112  | 153  | 109  | 137  | 132  | 142  |
| April     | 143  | 168  | 168  | 169  | 174  | 151  | 162  | 179  | 170  | 155  |
| May       | 193  | 177  | 224  | 217  | 213  | 218  | 202  | 219  | 225  | 187  |
| June      | 220  | 217  | 220  | 209  | 238  | 229  | 228  | 232  | 233  | 239  |
| July      | 247  | 246  | 251  | 240  | 249  | 256  | 241  | 243  | 243  | 242  |
| August    | 212  | 216  | 217  | 209  | 212  | 220  | 217  | 221  | 207  | 221  |
| September | 161  | 156  | 153  | 156  | 169  | 154  | 159  | 155  | 158  | 164  |
| October   | 117  | 98.5 | 118  | 115  | 126  | 107  | 108  | 111  | 102  | 108  |
| November  | 85   | 78.9 | 69.5 | 69.8 | 60.4 | 63.9 | 73.5 | 66.1 | 75.5 | 64.3 |
| December  | 60.2 | 59.4 | 47.9 | 53.4 | 63.3 | 54.7 | 63.7 | 64.3 | 61.4 | 58.2 |

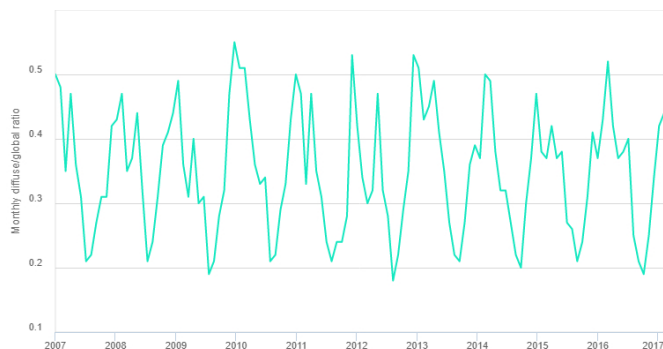
### Direct Normal irradiation

| Month     | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| January   | 70   | 99   | 80   | 70   | 88   | 136  | 97   | 77   | 130  | 72   |
| February  | 80   | 89   | 124  | 77   | 137  | 166  | 102  | 85   | 108  | 107  |
| March     | 166  | 176  | 191  | 129  | 111  | 192  | 107  | 159  | 153  | 165  |
| April     | 118  | 163  | 159  | 170  | 181  | 123  | 152  | 187  | 170  | 152  |
| May       | 186  | 151  | 232  | 215  | 214  | 211  | 194  | 217  | 239  | 169  |
| June      | 220  | 212  | 216  | 196  | 256  | 234  | 240  | 243  | 247  | 260  |
| July      | 282  | 281  | 294  | 275  | 283  | 304  | 275  | 278  | 280  | 280  |
| August    | 253  | 256  | 259  | 247  | 247  | 272  | 262  | 270  | 239  | 274  |
| September | 198  | 181  | 183  | 189  | 219  | 184  | 196  | 180  | 184  | 206  |
| October   | 167  | 123  | 161  | 159  | 187  | 140  | 142  | 146  | 120  | 144  |
| November  | 146  | 124  | 92   | 98   | 74   | 79   | 113  | 86   | 123  | 92   |
| December  | 102  | 102  | 64   | 77   | 108  | 81   | 118  | 118  | 103  | 98   |

#### Global irradiation optimum angle

| Month     | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| January   | 84.2 | 109  | 95.3 | 85.2 | 102  | 138  | 106  | 93.7 | 134  | 86.8 |
| February  | 101  | 110  | 134  | 97.5 | 143  | 167  | 117  | 103  | 122  | 120  |
| March     | 179  | 186  | 192  | 148  | 135  | 196  | 132  | 173  | 167  | 180  |
| April     | 151  | 182  | 182  | 183  | 190  | 161  | 174  | 195  | 185  | 168  |
| May       | 188  | 171  | 219  | 210  | 208  | 213  | 196  | 216  | 220  | 181  |
| June      | 203  | 200  | 204  | 194  | 220  | 212  | 211  | 215  | 215  | 221  |
| July      | 234  | 233  | 237  | 227  | 237  | 242  | 228  | 229  | 230  | 229  |
| August    | 222  | 226  | 228  | 220  | 222  | 230  | 227  | 232  | 216  | 232  |
| September | 194  | 187  | 184  | 189  | 207  | 184  | 191  | 185  | 190  | 200  |
| October   | 169  | 135  | 169  | 164  | 183  | 149  | 152  | 157  | 139  | 152  |
| November  | 147  | 132  | 109  | 111  | 92.2 | 96.8 | 122  | 102  | 128  | 102  |
| December  | 109  | 108  | 78.1 | 90.3 | 115  | 92.8 | 120  | 121  | 110  | 105  |

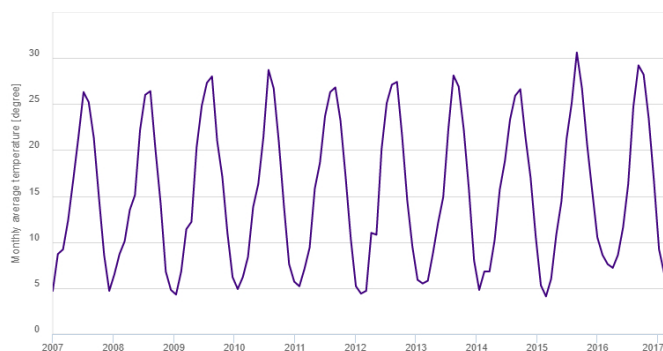
#### Monthly average diffuse to global ratio



#### Diffuse/global ratio

| Month     | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| January   | 0.5  | 0.43 | 0.49 | 0.51 | 0.47 | 0.34 | 0.43 | 0.5  | 0.37 | 0.52 |
| February  | 0.48 | 0.47 | 0.36 | 0.51 | 0.33 | 0.3  | 0.45 | 0.49 | 0.42 | 0.42 |
| March     | 0.35 | 0.35 | 0.31 | 0.43 | 0.47 | 0.32 | 0.49 | 0.38 | 0.37 | 0.37 |
| April     | 0.47 | 0.37 | 0.4  | 0.36 | 0.35 | 0.47 | 0.41 | 0.32 | 0.38 | 0.38 |
| May       | 0.36 | 0.44 | 0.3  | 0.33 | 0.31 | 0.32 | 0.35 | 0.32 | 0.27 | 0.4  |
| June      | 0.31 | 0.32 | 0.31 | 0.34 | 0.24 | 0.28 | 0.27 | 0.27 | 0.26 | 0.25 |
| July      | 0.21 | 0.21 | 0.19 | 0.21 | 0.21 | 0.18 | 0.22 | 0.22 | 0.21 | 0.21 |
| August    | 0.22 | 0.24 | 0.21 | 0.22 | 0.24 | 0.22 | 0.21 | 0.2  | 0.24 | 0.19 |
| September | 0.27 | 0.31 | 0.28 | 0.29 | 0.24 | 0.29 | 0.27 | 0.3  | 0.31 | 0.25 |
| October   | 0.31 | 0.39 | 0.32 | 0.33 | 0.28 | 0.35 | 0.36 | 0.37 | 0.41 | 0.34 |
| November  | 0.31 | 0.41 | 0.47 | 0.43 | 0.53 | 0.53 | 0.39 | 0.47 | 0.37 | 0.42 |
| December  | 0.42 | 0.44 | 0.55 | 0.5  | 0.42 | 0.51 | 0.37 | 0.38 | 0.43 | 0.44 |

#### Monthly average temperature



Monthly average temperature

| Month     | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| January   | 4.7  | 6.5  | 4.3  | 4.9  | 5.2  | 4.4  | 5.5  | 6.8  | 4.1  | 7.6  |
| February  | 8.7  | 8.7  | 6.8  | 6.2  | 7.1  | 4.7  | 5.8  | 6.8  | 6    | 7.2  |
| March     | 9.2  | 10.1 | 11.4 | 8.4  | 9.4  | 11   | 8.8  | 10.2 | 10.8 | 8.6  |
| April     | 12.4 | 13.5 | 12.2 | 13.8 | 15.8 | 10.8 | 12.1 | 15.7 | 14.4 | 11.6 |
| May       | 16.8 | 15.1 | 20.3 | 16.3 | 18.6 | 20.1 | 14.9 | 18.8 | 21.2 | 16.3 |
| June      | 21.4 | 22.2 | 24.8 | 21.4 | 23.7 | 25.1 | 22.3 | 23.3 | 25.1 | 24.7 |
| July      | 26.3 | 26   | 27.3 | 28.7 | 26.3 | 27.1 | 28.1 | 25.9 | 30.6 | 29.2 |
| August    | 25.2 | 26.4 | 28   | 26.7 | 26.8 | 27.4 | 26.9 | 26.6 | 26.7 | 28.2 |
| September | 21.3 | 20   | 21   | 20.9 | 23.2 | 21.5 | 22.2 | 21.4 | 20.6 | 23.4 |
| October   | 14.8 | 14.2 | 17.1 | 13.9 | 17.1 | 14.5 | 15.7 | 17   | 15.5 | 16.7 |
| November  | 8.6  | 6.8  | 11   | 7.6  | 10.4 | 9.5  | 8    | 10.6 | 10.5 | 9.2  |
| December  | 4.7  | 4.8  | 6.2  | 5.7  | 5.2  | 5.9  | 4.8  | 5.3  | 8.6  | 6.6  |



# Monthly irradiation data

## PVGIS-5 geo-temporal irradiation database

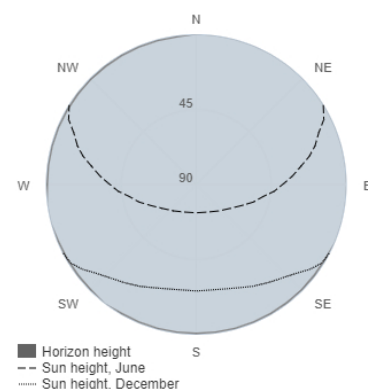
### Provided inputs

Latitude/Longitude: 40.283, -3.741  
 Horizon: Calculated  
 Database used: PVGIS-CMSAF  
 Start year: 2007  
 End year: 2016

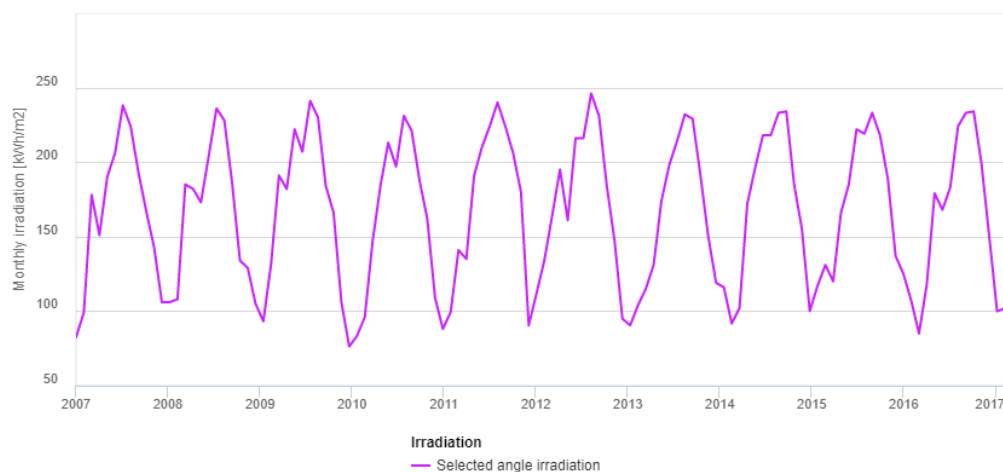
### Variables included in this report:

Global horizontal irradiation: No  
 Direct normal irradiation: No  
 Global irradiation optimum angle: No  
 Global Irradiation at 31.5°: Yes  
 Diffuse/global ratio: Yes  
 Average temperature: Yes

### Outline of horizon at chosen location:



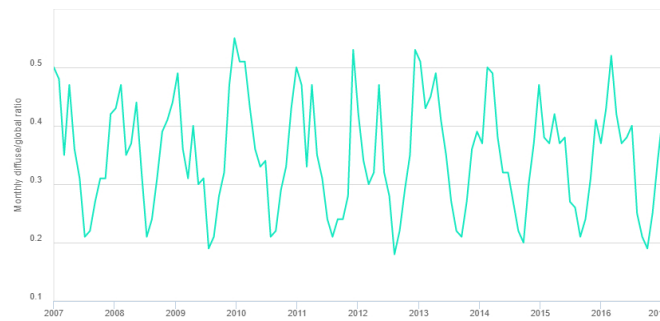
## Monthly solar irradiation estimates



### Global at user angle

| Month     | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| January   | 82.4 | 106  | 93.2 | 83.4 | 99.4 | 134  | 104  | 91.7 | 131  | 85   |
| February  | 99.1 | 108  | 132  | 96.1 | 141  | 164  | 115  | 102  | 120  | 118  |
| March     | 178  | 185  | 191  | 147  | 135  | 195  | 131  | 172  | 166  | 179  |
| April     | 151  | 182  | 182  | 184  | 191  | 161  | 174  | 196  | 185  | 168  |
| May       | 190  | 173  | 222  | 213  | 210  | 216  | 198  | 218  | 222  | 183  |
| June      | 206  | 204  | 207  | 197  | 224  | 216  | 214  | 218  | 219  | 224  |
| July      | 238  | 236  | 241  | 231  | 240  | 246  | 232  | 233  | 233  | 233  |
| August    | 224  | 228  | 230  | 221  | 224  | 231  | 229  | 234  | 218  | 234  |
| September | 193  | 186  | 184  | 188  | 206  | 184  | 191  | 185  | 189  | 199  |
| October   | 167  | 134  | 166  | 162  | 180  | 147  | 150  | 155  | 137  | 150  |
| November  | 143  | 129  | 106  | 109  | 90.4 | 94.9 | 119  | 100  | 125  | 99.9 |
| December  | 106  | 105  | 76.3 | 88.1 | 112  | 90.5 | 116  | 117  | 107  | 102  |

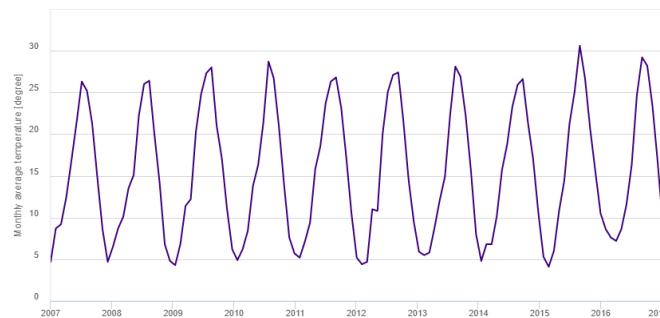
## Monthly average diffuse to global ratio



Diffuse/global ratio

| Month     | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| January   | 0.5  | 0.43 | 0.49 | 0.51 | 0.47 | 0.34 | 0.43 | 0.5  | 0.37 | 0.52 |
| February  | 0.48 | 0.47 | 0.36 | 0.51 | 0.33 | 0.3  | 0.45 | 0.49 | 0.42 | 0.42 |
| March     | 0.35 | 0.35 | 0.31 | 0.43 | 0.47 | 0.32 | 0.49 | 0.38 | 0.37 | 0.37 |
| April     | 0.47 | 0.37 | 0.4  | 0.36 | 0.35 | 0.47 | 0.41 | 0.32 | 0.38 | 0.38 |
| May       | 0.36 | 0.44 | 0.3  | 0.33 | 0.31 | 0.32 | 0.35 | 0.32 | 0.27 | 0.4  |
| June      | 0.31 | 0.32 | 0.31 | 0.34 | 0.24 | 0.28 | 0.27 | 0.27 | 0.26 | 0.25 |
| July      | 0.21 | 0.21 | 0.19 | 0.21 | 0.21 | 0.18 | 0.22 | 0.22 | 0.21 | 0.21 |
| August    | 0.22 | 0.24 | 0.21 | 0.22 | 0.24 | 0.22 | 0.21 | 0.2  | 0.24 | 0.19 |
| September | 0.27 | 0.31 | 0.28 | 0.29 | 0.24 | 0.29 | 0.27 | 0.3  | 0.31 | 0.25 |
| October   | 0.31 | 0.39 | 0.32 | 0.33 | 0.28 | 0.35 | 0.36 | 0.37 | 0.41 | 0.34 |
| November  | 0.31 | 0.41 | 0.47 | 0.43 | 0.53 | 0.53 | 0.39 | 0.47 | 0.37 | 0.42 |
| December  | 0.42 | 0.44 | 0.55 | 0.5  | 0.42 | 0.51 | 0.37 | 0.38 | 0.43 | 0.44 |

## Monthly average temperature



Monthly average temperature

| Month     | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| January   | 4.7  | 6.5  | 4.3  | 4.9  | 5.2  | 4.4  | 5.5  | 6.8  | 4.1  | 7.6  |
| February  | 8.7  | 8.7  | 6.8  | 6.2  | 7.1  | 4.7  | 5.8  | 6.8  | 6    | 7.2  |
| March     | 9.2  | 10.1 | 11.4 | 8.4  | 9.4  | 11   | 8.8  | 10.2 | 10.8 | 8.6  |
| April     | 12.4 | 13.5 | 12.2 | 13.8 | 15.8 | 10.8 | 12.1 | 15.7 | 14.4 | 11.6 |
| May       | 16.8 | 15.1 | 20.3 | 16.3 | 18.6 | 20.1 | 14.9 | 18.8 | 21.2 | 16.3 |
| June      | 21.4 | 22.2 | 24.8 | 21.4 | 23.7 | 25.1 | 22.3 | 23.3 | 25.1 | 24.7 |
| July      | 26.3 | 26   | 27.3 | 28.7 | 26.3 | 27.1 | 28.1 | 25.9 | 30.6 | 29.2 |
| August    | 25.2 | 26.4 | 28   | 26.7 | 26.8 | 27.4 | 26.9 | 26.6 | 26.7 | 28.2 |
| September | 21.3 | 20   | 21   | 20.9 | 23.2 | 21.5 | 22.2 | 21.4 | 20.6 | 23.4 |
| October   | 14.8 | 14.2 | 17.1 | 13.9 | 17.1 | 14.5 | 15.7 | 17   | 15.5 | 16.7 |
| November  | 8.6  | 6.8  | 11   | 7.6  | 10.4 | 9.5  | 8    | 10.6 | 10.5 | 9.2  |
| December  | 4.7  | 4.8  | 6.2  | 5.7  | 5.2  | 5.9  | 4.8  | 5.3  | 8.6  | 6.6  |



