

Proyecto StarRoad: corredor electromagnético de lanzamiento Tierra-espacio de clase superpesada

Índice

Navegación: [inicio](#) | [índice](#) | [final](#)

[1. Descripción, características principales, capacidades y filosofía](#)

[1.1. Filosofía fundamental del proyecto](#)

[1.2. Capacidades](#)

[2. Ventajas y fundamentos técnicos, económicos, geográficos y estratégicos](#)

[2.1. Técnicos](#)

[2.2. Económicos](#)

[2.3. Geográficos](#)

[2.4. Estratégicos](#)

[3. Base industrial y tecnológica](#)

[3.1. Levitación y aceleración magnéticas \(maglev\)](#)

[3.2. Tecnologías superconductoras y arquitectura distribuida](#)

[3.3. Energía pulsada](#)

[3.4. Tecnología de vacío](#)

[3.5. Aerodinámica hipersónica y protección térmica](#)

[3.6. Sistemas de energía nuclear](#)

[3.7. Construcción de túneles](#)

[3.8. Sistema geotérmico autónomo de energía térmica](#)

[3.9. Combustión supersónica](#)

[3.10. Ciclo cerrado de combustible del portal](#)

[3.11. Estrategia de validación tecnológica](#)

[4. Descripción detallada por etapas de los elementos y tecnologías de StarRoad](#)

[4.1. Túnel de aceleración y su infraestructura](#)

[4.2. Portal atmosférico \(terminal de gran altitud\)](#)

[4.3. Lanzadera \(AstroLiner\)](#)

[5. Ciclo operativo desde la preparación del lanzamiento hasta el mantenimiento posterior al amerizaje](#)

[5.1. Preparación y lanzamiento](#)

[5.2. Aceleración en el túnel](#)

[5.3. Salida por el portal atmosférico](#)

[5.4. Cruce de la atmósfera](#)

[5.5. Entrada en el espacio y operaciones orbitales](#)

[5.6. Salida de órbita y regreso](#)

[5.7. Amerizaje](#)

[5.8. Remolque y mantenimiento](#)

[6. Ejecución, calendario, requisitos y centros industriales](#)

[6.1. Fases del proyecto](#)

[6.2. Centros industriales](#)

[6.3. Plazo general](#)

[7. Problemas y tareas abordados](#)

[7.1. Sobre calentamiento global](#)

[7.2. Tarea económica](#)

[7.3. Objetivo estratégico](#)

[7.4. Catalizador tecnológico](#)

[7.5. Autonomía energética y térmica](#)

[7.6. Huella de carbono](#)

[7.7. Potencial social y ambiental del Canal Troncal Hidrotermal](#)

[7.8. Red energética](#)

[7.9. StarRoad como arteria económica](#)

[7.10. Seguridad de infraestructuras críticas](#)

[7.11. Selección y escalabilidad del emplazamiento](#)

[7.12. Coordinación política y jurídica de un proyecto transcontinental](#)

[7.13. Crecimiento evolutivo del flujo de carga](#)

[8. Mercados y logística orbital](#)

[8.1. El problema de la demanda de lanzamientos superpesados](#)

[8.2. Mercado inicial: energía solar espacial y centros de datos orbitales](#)

[8.3. Lógica climática e industrial de la energía solar espacial](#)

[8.4. Emplazamientos orbitales: GEO y EML4/5](#)

[8.5. Etapa inicial: vuelos directos de AstroLiner-S](#)

[8.6. Etapa madura: relés de microondas e infraestructura de servicio](#)

[8.7. División del transporte según el entorno operativo](#)

[8.8. Papel de AstroLiner en la logística madura](#)

[8.9. transportes y remolcadores interorbitales](#)

[8.10. Descenso a la Tierra y a otros planetas](#)

[8.11. Módulos estandarizados](#)

[8.12. Jerarquía de la infraestructura orbital](#)

[8.13. Astilleros orbitales](#)

[8.14. Asentamientos orbitales y lunares](#)

[8.15. Analogía logística: el espacio como red marítima](#)

[8.16. Economía del flujo de carga](#)

[8.17. Etapas de desarrollo del mercado y la logística](#)

[8.18. Perspectivas evolutivas: el sucesor de StarRoad](#)

[8.19. Potencial de ingeniería planetaria: el Sistema Solar como un único sistema de recursos](#)

[8.20. Conclusión estratégica](#)

[9. Modelo económico del proyecto](#)

[9.1. Metodología y supuestos principales](#)

[9.2. Coste de excavación de túneles en condiciones africanas](#)

[9.3. Flota de tuneladoras con fabricación propia](#)

[9.4. Sistema geotérmico autónomo de energía térmica](#)

[9.5. Sistema de almacenamiento de energía](#)

[9.6. Centros industriales y logística](#)

[9.7. I+D y prototipos — Fase 0](#)

[9.8. Tabla CAPEX final consolidada](#)

[9.9. Distribución por fases \(miles de millones USD\)](#)

[9.10. Amortización y evolución del coste de transporte](#)

[9.11. Comparación con alternativas](#)

[9.12. Conclusión económica](#)

[10. Seguridad y modos de operación de emergencia](#)

[10.1. Filosofía de seguridad: ningún fallo aislado es fatal](#)

[10.2. Riesgos principales y sistemas de protección](#)

[10.3. Jerarquía de protocolos de emergencia](#)

[10.4. Características estructurales de supervivencia](#)

[10.5. Efectos acústicos y de onda de choque](#)

[11. Influencia cultural y psicológica](#)

[11.1. El espectáculo como fenómeno](#)

[11.2. Resonancia psicológica y simbólica](#)

[11.3. Consecuencias socioeconómicas](#)

[12. Conclusión](#)

1. Descripción, características principales, capacidades y filosofía

StarRoad es un complejo de transporte troncal Tierra-espacio de muy larga distancia, construido alrededor de un acelerador de levitación magnética al vacío de más de 2.050 kilómetros. Está destinado a llevar al espacio lanzaderas autónomas, reutilizables y superpesadas de hasta 15.000 toneladas sin transportar propelente reactivo de despegue a bordo.

1.1. Filosofía fundamental del proyecto

Cambio del paradigma de lanzamiento espacial:

- **Cruce inercial de la atmósfera.** En vez de superar la atmósfera mediante empuje y eficiencia aerodinámica, StarRoad utiliza la energía cinética almacenada en la masa de una lanzadera acelerada al vacío hasta una velocidad hipersónica de unos 11 km/s. La atmósfera se atraviesa por completo gracias a la inercia en 50–60 segundos.
- **La masa como ventaja. Una masa** elevada —miles de toneladas— deja de ser un enemigo y se convierte en portadora de una enorme energía cinética, al tiempo que permite emplear materiales superresistentes y refractarios en la estructura y la protección térmica.
- **Separación de funciones.** La infraestructura energética, la aceleración y el control de precisión se trasladan al complejo terrestre y se convierten en un sistema de ingeniería fijo. La lanzadera pasa a ser un módulo de transporte especializado, optimizado para carga, maniobras orbitales y regreso.
- **Industrialización escalable. El sistema** no se concibe como una instalación aislada, sino como la primera línea de un «ferrocarril» espacial. Podrán construirse túneles paralelos, redundantes y adicionales, lo que permitirá un crecimiento exponencial del flujo y una reducción de costes.

1.2. Capacidades

- **Acceso directo más allá de la órbita geoestacionaria.** Una velocidad inicial de unos 11 km/s, más los aproximadamente 0,465 km/s aportados por la rotación ecuatorial de la Tierra, permite a la lanzadera alcanzar casi directamente destinos de alta energía, como los puntos de Lagrange L1/L2 de los sistemas Tierra-Sol o Tierra-Luna, con correcciones mínimas. Así puede eliminarse por completo el remolque y el repostaje en órbita terrestre baja.
- **Capacidad de carga.** En un solo vuelo pueden transportarse miles de toneladas. Esto hace económicamente viables centrales orbitales de clase gigavatio, asentamientos espaciales, complejos de extracción, procesamiento, montaje y fabricación, sistemas de defensa planetaria y naves interplanetarias.
- **Coste. A plena** utilización, el coste calculado de transporte a órbitas altas podría caer a 1–10 dólares por kilogramo, varios órdenes de magnitud por debajo de los sistemas de cohetes existentes y futuros.

2. Ventajas y fundamentos técnicos, económicos, geográficos y estratégicos

2.1. Técnicos

La mayoría de los conceptos alternativos de lanzamiento orbital no están limitados por la posibilidad física de construirlos, sino por sus condiciones de explotación: funcionamiento continuo, soporte dinámico activo, una fiabilidad irreal y consecuencias catastróficas de los fallos. Las megaestructuras cinéticas activas necesitan alimentación y estabilización dinámica permanentes; si se pierde la energía o el control, la estructura pierde el soporte y entra en un régimen de fallo potencialmente catastrófico. Los largos tubos exteriores al vacío también imponen exigencias extremas de estanqueidad, seccionamiento y estabilidad térmica. StarRoad se diferencia porque sitúa la infraestructura esencial bajo tierra, permite el funcionamiento por impulsos, localiza los accidentes y conserva estabilidad pasiva. Por ello constituye la forma mínimamente viable de un corredor para transportar carga más allá de la Tierra. El uso de tecnologías reales —transporte al vacío, aerodinámica hipersónica, energía pulsada y superconductores— adaptadas a la escala de StarRoad refuerza aún más la viabilidad del enfoque.

2.2. Económicos

Los principales costes son el capital de construcción y la energía. La ausencia de etapas desechables y el consumo mínimo de fluido de trabajo para el despegue reducen radicalmente los gastos operativos. El proyecto también impulsa el desarrollo regional, nuevas redes energéticas y polos de alta tecnología.

La viabilidad económica de StarRoad debe evaluarse a la escala de las infraestructuras mundiales de transporte y energía. Frente al movimiento anual global de mercancías, varios millones de toneladas son una fracción insignificante, mientras que inversiones de cientos de miles de millones de dólares son habituales en infraestructuras planetarias. StarRoad no compite, por tanto, con los sistemas de transporte existentes: ocupa el nicho de un corredor de alta energía que añade nuevas capacidades con una influencia relativamente pequeña sobre el flujo mundial total.

2.3. Geográficos

La ruta desde la desembocadura del río Nyanga, en Gabón, hasta el monte Mohi y la meseta meridional de la República Democrática del Congo es casi ideal:

- **Ecuador.** Máximo incremento de velocidad debido a la rotación terrestre y corrección mínima de la inclinación orbital.
 - **Visibilidad directa.** Trazado relativamente recto a través de regiones poco pobladas de África central.
 - **Altitud del portal.** A 3.400 metros, la densidad atmosférica en la salida disminuye un 30 %, moderando las cargas térmicas y de impacto.
 - **Estabilidad sísmica.** El Rift de África Oriental muestra una actividad mínima en esta zona.
 - **Logística.** El recorrido comienza junto al océano —fabricación y recuperación de lanzaderas— y termina en una zona elevada.
- **Ruta y emplazamiento óptimos:** aproximadamente **2.050 km desde la desembocadura del Nyanga en Gabón hasta el monte Mohi** en la República Democrática del Congo. El inicio **en la costa gabonesa ofrece una inclinación orbital** ecuatorial casi ideal de unos 3°, acceso directo a la órbita geoestacionaria y a los puntos de Lagrange y un coste mínimo de transferencias interplanetarias. El **complejo del portal se** ubica en el monte Mohi, a unos 3.400 m, y la amplia meseta meridional queda reservada para ampliaciones. El lugar combina altitud, terreno llano, más de 20 km de distancia respecto a poblaciones y proximidad a los lagos Tanganica y Kivu.
 - **Emplazamiento alternativo.** Una ruta de reserva desde el puerto de Kitomb hasta el **monte Mohi, de unos 1.850 km y** enteramente **dentro** de la República Democrática del Congo, simplificaría la logística y la coordinación jurídica. Sin embargo, produciría una **inclinación orbital de unos 13°** y exigiría 200–300 m/s **adicionales de delta-v para enviar** carga a la órbita geoestacionaria de 0° o a los puntos de Lagrange, lo que equivale a perder **un 2–4 % de carga útil** en cada lanzamiento. Elegir la ruta internacional más compleja, pero ecuatorial, con una inclinación **cercana a 3°**, es por **tanto una decisión** estratégica orientada a maximizar la eficiencia económica durante toda la vida del corredor y a dar acceso directo a todos los nodos críticos de la infraestructura orbital.

2.4. Estratégicos

Creación de un corredor espacial permanente e independiente del tiempo meteorológico. A largo plazo, redes de estas líneas se convertirían en infraestructura mundial, seguro para la civilización —con capacidad potencial de evacuación masiva— y base de una industrialización espacial completa que trasladaría fuera de la Tierra las industrias intensivas en energía y calor.

Incluso si los sistemas de cohetes alcanzan los costes ultrabajos de lanzamiento anunciados, cada despegue sigue siendo un suceso discreto de capacidad limitada. En este sentido, los cohetes, sea cual sea su precio por kilogramo, pertenecen por naturaleza a la logística expedicionaria. StarRoad es un corredor de infraestructura orientado no solo a minimizar el coste de cada lanzamiento, sino a establecer un flujo estable y continuo de carga.

3. Base industrial y tecnológica

StarRoad no exige descubrir nuevas leyes físicas, pero representa la culminación de la integración técnica de tecnologías existentes y emergentes:

3.1. Levitación y aceleración magnéticas (maglev)

Se apoya en la experiencia de China, Japón y Alemania. Las aceleraciones récord obtenidas en ensayos chinos de maglev —una tonelada de 0 a 700 km/h en dos segundos— demuestran la viabilidad fundamental de acelerar con rapidez objetos masivos.

3.2. Tecnologías superconductoras y arquitectura distribuida

StarRoad utiliza una arquitectura invertida: los imanes superconductores que generan el campo principal de levitación y estabilización viajan a bordo de la lanzadera y se enfrían con sus sistemas criogénicos. En el túnel se instalan devanados-«carril» de cobre o aluminio relativamente sencillos y baratos, que actúan como guías pasivas y circuito secundario para transmitir la energía pulsada de aceleración. Esto reduce en varios órdenes de magnitud el coste y la complejidad del túnel y concentra la dificultad tecnológica en el elemento reutilizable —la lanzadera—, donde puede mantenerse de forma centralizada.

3.3. Energía pulsada

Estaciones de supercondensadores y baterías distribuidas a lo largo de la ruta, cargadas por la red geotérmica autónoma, suministran impulsos de varios gigavatios al segmento necesario del acelerador.

3.4. Tecnología de vacío

Experiencia del Gran Colisionador de Hadrones del CERN, de SpinLaunch y de los tubos al vacío Hyperloop.

3.5. Aerodinámica hipersónica y protección térmica

Conocimientos adquiridos con vehículos espaciales, vehículos de reentrada maniobrables y proyectos como SpaceX Starship; refrigeración activa y acumuladores térmicos de cambio de fase.

3.6. Sistemas de energía nuclear

Reactores compactos a bordo —una generación posterior a los generadores termoelectrónicos de radioisótopos— o futuros módulos de fusión, como los de Helion Energy, para alimentar la lanzadera en órbita.

3.7. Construcción de túneles

Tuneladoras modernas capaces de avanzar decenas de kilómetros al año, con varios túneles excavados en paralelo.

3.8. Sistema geotérmico autónomo de energía térmica

El proyecto incluye una infraestructura energética y climática integrada, propia de StarRoad y de escala gigavatio, basada en una tecnología modificada de sistemas geotérmicos mejorados (EGS). El fluido de trabajo es dióxido de carbono supercrítico (sCO_2) obtenido por captura directa del aire (DAC). El sistema desempeña tres funciones críticas: 1) controlar activamente el campo térmico geotérmico para mantener estable la temperatura del túnel de aceleración; 2) generar electricidad de base; 3) retirar CO_2 de la atmósfera a largo plazo.

3.9. Combustión supersónica

La barrera gasodinámica del portal emplea motores de reacción supersónicos anulares que funcionan con una mezcla de aire e hidrógeno. La combustión supersónica forma un flujo cónico estable dirigido hacia fuera por el eje del túnel; desplaza el aire atmosférico y crea un gradiente de presión que protege el vacío del acelerador durante el paso de la lanzadera.

3.10. Ciclo cerrado de combustible del portal

La barrera gasodinámica usa combustible limpio y renovable. El hidrógeno se obtiene del agua por electrólisis y los motores emplean aire atmosférico como oxidante. Al activarse la barrera, el producto principal es vapor de agua sobrecalentado. Se evita transportar y almacenar grandes volúmenes de combustible químico en una zona montañosa remota, mejorando la fiabilidad y reduciendo los costes operativos.

3.11. Estrategia de validación tecnológica

El proyecto avanza por dos vías paralelas: modelos matemáticos y ensayos físicos de componentes críticos. Así se confirma pronto la viabilidad del concepto, se obtienen datos de ingeniería precisos y se reducen los riesgos del proyecto principal.

4. Descripción detallada por etapas de los elementos y tecnologías de StarRoad

4.1. Túnel de aceleración y su infraestructura

- **Longitud** : unos 2050 km.
- **Sección**. Elíptica ($\sim 17,5 \times 12,5$ m), optimizada para la forma aerodinámica de la lanzadera y una levitación magnética estable.
- **Profundidad del túnel**: hasta unos 8 km, o incluso más si lo permiten las condiciones geológicas y térmicas. La profundidad admisible solo podrá establecerse tras una prospección geológica detallada: sondeos a lo largo del trazado, perfil de temperaturas, evaluación del estado tensional y la fracturación de la roca, e hidrogeología. Cuanto menores sean la temperatura y el flujo térmico de las capas profundas —orientativamente hasta unos 200–250 °C—, mayor será el intervalo de profundidades técnicamente viable y la libertad para optimizar los radios de curvatura y las transiciones. Así pueden reducirse los picos de aceleración y las cargas dinámicas sin renunciar a la velocidad prevista.
- **Construcción**: combinada. El tramo inicial, de unos 330 km, es una recta subterránea de poca pendiente que desciende directamente hacia el portal para simplificar la aceleración. El resto discurre en un túnel profundo o subterráneo que aporta estabilidad térmica, aislamiento al vacío y seguridad.
- **Geometría del trazado**: curva en S después de los primeros 330 km aproximadamente.
 - **Arco descendente**: radio aproximado de 6300 km; lleva el túnel suavemente a profundidad para crear el ángulo necesario.
 - **Arco ascendente**: radio de 2500–3500 km; conduce el túnel al portal con una inclinación de unos 5–6° respecto a la horizontal. Los radios están calculados para que la aceleración centrípeta no supere 4 g a velocidad hipersónica.
- **Sistema de vacío**: segmentado. Cada tramo de unos 50 km es autónomo y dispone de bombas de vacío, sensores y válvulas de emergencia propios.

4.1.1. Sistema de aceleración

La aceleración y estabilización de la lanzadera se obtienen mediante la interacción de sus imanes superconductores con accionamientos electromagnéticos lineales distribuidos por el túnel. Estos accionamientos son bobinados pasivos segmentados de conductores convencionales —cobre o aluminio— que no requieren refrigeración criogénica.

- **En la parte inicial del túnel, de 0 a 330 km**: los **accionamientos se sitúan principalmente** bajo la vía. Producen el campo de levitación, la aceleración inicial de 4 g y la compensación activa de la gravedad.
- **En la parte intermedia, de 330 a 2000 km, sobre todo en la curva en S**: los **accionamientos** rodean el perímetro del túnel. Proporcionan aceleración precisa, mantienen la lanzadera centrada a velocidad hipersónica y estabilizan el rumbo en las curvas. En el suelo del tramo final, donde las aceleraciones radiales son elevadas, se emplean bobinados reforzados y estructuralmente redundantes. Entre los kilómetros 330 y 2000, la aceleración disminuye siguiendo una curva desde 4 g hasta 0 g mientras la velocidad alcanza unos 11 km/s.
- **En la última parte, de 2000 a 2050 km**: los 50 km finales se destinan a estabilizar y centrar la lanzadera antes de que entre en la atmósfera por el portal atmosférico. En este tramo ya no se acelera.

La energía pulsada de las subestaciones del sistema geotérmico autónomo se suministra a cada segmento de bobinas en sincronía exacta con la posición **de la lanzadera**. El campo magnético viajero resultante interactúa con los imanes de a bordo y acelera el vehículo. Esta arquitectura reduce la complejidad del túnel, facilita su mantenimiento y concentra los componentes de alta tecnología en la lanzadera reutilizable.

4.1.2. Sistema geotérmico autónomo de energía térmica

Para garantizar la estabilidad térmica, la autonomía energética y una larga vida útil, cada túnel de aceleración va acompañado de siete túneles de servicio de pequeño diámetro que forman un sistema geotérmico autónomo de energía térmica, denominado en adelante «sistema geotérmico autónomo»:

- **Seis túneles colectores y energéticos principales, cada uno de 2 m** de diámetro. Se encuentran 30 m por debajo del suelo del acelerador, con 7 m uniformes entre ejes. Funcionan por pares con circulación reversible de CO₂ supercrítico

fuertemente subenfriado a +5 °C. Así se crea bajo toda la sección del acelerador una losa rocosa refrigerada continua de más de 15 m de espesor, sin puentes térmicos.

- **Un túnel técnico de servicio de 3 m de diámetro** . Discurre al mismo nivel que el acelerador, 3 m a un lado, y permite diagnóstico y reparación continuos sin detener el tráfico. Los túneles del sistema geotérmico autónomo soportan simultáneamente una presión interna de hasta 25 MPa, la presión de la roca y cargas **dinámicas**. **Una flota totalmente robotizada de microtuneladoras excava los siete túneles. El sistema separa física y funcionalmente la infraestructura energética de la de transporte**, proporcionando una fiabilidad y mantenibilidad excepcionales.

4.1.3. Sistema de refrigeración del sistema geotérmico autónomo de energía térmica

- **Circuito de refrigeración profundo**. Los túneles colectores del sistema geotérmico autónomo situados bajo el acelerador hacen circular un fluido basado en CO₂ en estado denso a alta presión o supercrítico. En el régimen normal de baja temperatura, la corriente fría entra en los colectores a unos +5...+15 °C. Tras absorber calor geotérmico, el CO₂ puede superar +100 °C según la profundidad, el flujo térmico de la roca y el modo de generación. El circuito extrae calor, crea una zona refrigerada bajo el túnel principal y permite construir con seguridad a profundidades de unos 5–8 km.

- **Canal hidrotermal troncal** . **Se construye** junto al trazado de StarRoad, paralelo a la carretera de servicio, la línea eléctrica y las comunicaciones, y conecta los terminales en un único sistema superficial de evacuación de calor.

El canal tiene unos 5–8 m de anchura y 2–3 m de profundidad. Por su fondo discurren varias tuberías serpentinas independientes de alta presión que transportan CO₂ entre terminales contiguos. El agua actúa como amortiguador térmico y medio intermedio de transferencia de calor.

Después de turbinas, intercambiadores o compresores, el CO₂ entra en los serpentines a unos +50...+80 °C. En un tramo de unos 50 km entre terminales cede calor al agua y se enfría hasta aproximadamente +22...+35 °C, según la estación, la humedad, la intensidad de las lluvias, la refrigeración radiativa nocturna y el modo de operación del canal.

En funcionamiento normal, el agua del canal se mantiene en torno a +22...+32 °C, con aumentos locales hasta +35...+45 °C en las secciones calientes. Cerca de la entrada de la corriente caliente puede alcanzar brevemente +50...+80 °C, lo que incluso reduce parte de la actividad biológica, pero no la hace potable sin tratamiento.

Unas cubiertas selectivas ligeras sobre el canal reflejan la radiación solar y permiten evacuar calor en el infrarrojo.

- **Refrigeración en los terminales**. Cada terminal contiene torres de refrigeración, intercambiadores, bombas, compresores de refuerzo, turboexpansores y enfriadoras de reserva. En régimen normal, el canal evacua pasivamente la mayor parte del calor de baja temperatura.

Las torres y los intercambiadores terminales reducen la temperatura del CO₂ después del canal desde unos +22...+35 °C hasta +15...+25 °C. Cuando hace falta, las enfriadoras de reserva la bajan a –5...+5 °C antes de los colectores profundos. Se emplean como respaldo de pico, emergencia o temporada, no como modo principal continuo.

- **Compresión de refuerzo y turboexpansión**. El CO₂ refrigerado llega al siguiente terminal a presión elevada. Después puede atravesar un turboexpansor, recuperar parte de la energía de compresión y enfriarse por expansión hasta unos –10...+5 °C, según presión, caudal y estado de fase requerido.

A continuación, el CO₂ entra en los colectores geotérmicos con la temperatura, presión y fase necesarias. El ciclo no crea energía gratuita: el compresor aporta trabajo, el canal evacua el calor de compresión y el turboexpansor solo recupera una parte de la energía invertida. El beneficio es una corriente más fría con menor carga sobre la refrigeración activa.

- **Redundancia y flujo bidireccional**. Los serpentines están duplicados y son reversibles. Si un circuito resulta dañado, el caudal se desvía por una tubería de reserva o un terminal vecino. El sentido del CO₂ puede cambiar según la carga térmica, el estado de emergencia y la disponibilidad de cada tramo.

- **Mantenibilidad**. Compuertas dividen el canal en tramos de aproximadamente un kilómetro. Si uno resulta dañado, se aísla y se bombea el agua hasta el nivel técnico mínimo o se vacía parcialmente. Tras despresurizarlo, personal o robots acceden a los serpentines sin detener toda la línea. Durante la reparación mantienen la refrigeración los circuitos de reserva, la inversión del flujo, el mayor intercambio en terminales vecinos y la activación temporal de las enfriadoras.

- **Función hídrica limitada.** Como función secundaria, una pendiente constante de este a oeste permite mantener un flujo gravitatorio lento, lavar los tramos y descargar de forma controlada el exceso de agua.

Las lluvias ecuatoriales nocturnas pueden reponer el canal mediante captaciones, decantadores, filtros y aliviaderos. Como el agua no entra en contacto directo con el CO₂, tras un tratamiento local puede utilizarse para riego limitado, servicios técnicos de los terminales, reservas contra incendios y franjas verdes de protección.

Esta función sigue siendo secundaria: solo se permite extraer agua cuando no perjudique la misión principal del canal, refrigerar el CO₂ y mantener la estabilidad térmica del sistema geotérmico autónomo.

- **Importancia para StarRoad.** Los colectores profundos, el canal hidrotermal, los refrigeradores terminales, las torres, los compresores de refuerzo, los turboexpansores y las enfriadoras de reserva forman un sistema distribuido único de gestión térmica. Reduce la dependencia de refrigeradores locales, mejora la tolerancia a fallos, redistribuye los flujos térmicos entre terminales y hace más realista la construcción profunda del acelerador.

La refrigeración superficial también refuerza la función económica de StarRoad: a lo largo del trazado se forma un corredor lineal de terminales, carreteras de servicio, nodos energéticos, canal, zonas industriales y tierras agrícolas irrigadas.

4.1.4. Importancia estratégica del sistema geotérmico

Además de aportar energía y estabilidad térmica, el sistema hace posible construir el túnel principal a gran profundidad —5–8 km o más— con seguridad y a un coste razonable. El control activo del campo térmico y la extracción del calor geotérmico eliminan las limitaciones de temperatura que impedirían tal profundidad. Así puede realizarse la geometría óptima en S, con grandes radios de curvatura, necesaria para ascender gradualmente y sacar la lanzadera a unos 5–6° respecto a la horizontal, manteniendo las aceleraciones admisibles para carga y tripulación en torno a 4 g a lo largo de 2050 km. El sistema geotérmico autónomo es, por ello, el fundamento tecnológico tanto de la energía como de toda la optimización balística de StarRoad. Una flota robotizada de microtuneladoras excava el conjunto.

4.1.5. Sistema de túneles técnicos laterales perpendiculares

Para facilitar la construcción, ventilación, reparación y evacuación, a lo largo de la ruta se construyen 40 túneles de transporte inclinados, uno cada 50 km. Con 30° de inclinación y sección elíptica de aproximadamente 17,5 × 12,5 m, se excavan con las mismas tuneladoras que el túnel principal y enlazan la superficie con el corredor a profundidades de hasta 8 km.

- **Logística:** ofrecen al personal y la tripulación una vía de evacuación independiente durante una parada de emergencia Alarm-2. A diferencia de un pozo vertical, un túnel inclinado permite emplear vehículos autopropulsados para evacuar a decenas de personas en un solo viaje.
- **Seguridad:** proporcionan una segunda vía de evacuación independiente para el personal y la tripulación durante una parada de emergencia Alarm-2.
- **Escalabilidad:** los túneles inclinados preparan la conexión de futuras líneas StarRoad paralelas. Desde ellos podrán perforarse ramales horizontales hacia nuevos aceleradores, convirtiendo la red de accesos en una estructura de transporte en crecimiento continuo.
- **Integración con el sistema geotérmico autónomo.** Bajo cada túnel inclinado se excavan colectores otros 10–20 m más abajo para congelar previamente y estabilizar la roca durante la construcción y generar energía después.
- **Complejo terminal de superficie.** Cada túnel inclinado termina en un terminal multifuncional. Cada uno de los 40 terminales es un nodo independiente que incluye:
 - **ventilación y depuración de gases** para mantener el ambiente del túnel y extraer el aire usado;
 - **una base de obra** con zonas de depósito, transbordo y almacenamiento temporal de módulos, escombros y materiales;
 - **un edificio operativo y residencial** para el personal por turnos, con salas de control y descanso, talleres y almacenes;
 - **una central geotérmica e instalaciones de refrigeración** integradas en el sistema geotérmico autónomo, que utilizan y controlan el fluido térmico de los colectores profundos;

- **una estación de captura y** tratamiento de CO₂ mediante captura directa del aire (DAC), que cierra el ciclo: el CO₂ extraído se licua, purifica e introduce como fluido térmico en los colectores profundos;
 - **una conexión a redes eléctricas y de comunicaciones exteriores**, con alimentación de reserva y enlace de banda ancha.
 - **accesos por** carretera o ramales ferroviarios a la red regional;
 - **un punto de** evacuación en superficie con puesto médico de urgencias y helipuerto.
- **Flexibilidad jurídica y ambiental.** Los túneles técnicos inclinados permiten situar los terminales en superficie fuera de parques nacionales, reservas y cuencas protegidas aunque StarRoad pase por debajo a gran profundidad. Así se elimina el principal obstáculo jurídico sin construir dentro de los parques. Cada terminal se instala en el terreno no protegido más próximo y se une mediante un pozo inclinado, lo que facilita permisos, reduce la presión ambiental y evita impactos directos en ecosistemas protegidos.

4.1.6. Suministro y almacenamiento de energía

La alimentación del acelerador StarRoad se organiza como una red de tres niveles que garantiza:

- redundancia: el fallo de un elemento aislado no detiene el sistema;
 - velocidad de descarga adaptativa: desde segundos al inicio hasta microsegundos al final;
 - cables de potencia lo más cortos posible, para reducir pérdidas e inductancia.
- **Niveles de la topología**
- Nivel 0: acumuladores primarios en los terminales**
- Los 40 terminales disponen de almacenamiento gravitatorio, centrales hidroeléctricas reversibles — microcentrales en el canal— y baterías de ion-litio (BESS).
 - Capacidad total por terminal: unos 5–9 GWh; unos 360 GWh en toda la línea.
 - Salida: corriente continua de alta tensión, hasta 100 kV, transmitida al túnel técnico por cables troncales.
- Nivel 1: controladores de segmentos de 50 km**
- El trazado se divide en 41 segmentos de 50 km; el último corresponde a los 50 km anteriores al portal.
 - Cada segmento posee un controlador principal de distribución alimentado por dos terminales vecinos, con redundancia cruzada.
 - El controlador reparte la energía entre bloques de 1 km y sincroniza su funcionamiento.
- Nivel 2: bloques energéticos de un kilómetro.** Cada bloque kilométrico dispone de un controlador local que:
- recibe energía del controlador de segmento;
 - controla baterías tampón de ion-litio situadas bajo las paredes del túnel principal;
 - controla conjuntos conmutables de bobinas conectados mediante volantes de inercia y supercondensadores, instalados en nichos tras las paredes.
- Dos canales independientes desde el controlador de segmento a cada bloque kilométrico proporcionan redundancia.
- **Arquitectura del cableado**
- **Cables troncales, nivel 0→1:** se instalan en el túnel técnico de 3 m, que discurre paralelo al principal a una distancia de 3 m.
 - **Distribución por el trazado:** desde cada terminal los cables recorren 50 km en ambas direcciones, 100 km en total, y solapan las zonas de terminales vecinos. Así, cada segmento recibe energía de al menos dos terminales y cuenta con redundancia del 100 %.
 - **Entrada al túnel principal:** cada kilómetro, los cables pasan desde el túnel técnico al principal por penetraciones estancas y se conectan al controlador del bloque kilométrico.
 - **Distribución dentro del bloque:** después del controlador, la alimentación se divide en dos vías paralelas:

vía A: baterías tampón de ion-litio, con unos 0,5–1 GWh por bloque, para suavizar picos de varios segundos;

vía B: conjuntos conmutables de bobinas alimentados mediante volantes de inercia y supercondensadores tras las paredes del túnel.

- **Adaptación de la descarga en tres zonas.** El perfil de aceleración se optimiza para que la potencia máxima de cada conjunto de devanados sea mayor al principio —donde no hacen falta impulsos ultracortos— y disminuya hacia el final. Esto permite utilizar distintas tecnologías de almacenamiento y conmutación en cada una de las tres zonas:

Zona	Tramo del trazado	Tipo de descarga	Almacenamiento / conmutación	Motivo
Zona I — baja velocidad	0–200 km	De segundos a milisegundos	Baterías de ion-litio e inversores IGBT convencionales	La lanzadera se mueve despacio y tarda más de 0,1 s en recorrer un kilómetro. Las BESS pueden alimentar la vía sin acumuladores intermedios.
Zona II — velocidad media	200–1000 km	De milisegundos a microsegundos	Baterías tampón de ion-litio, volantes de inercia e inversores SiC	La lanzadera gana velocidad; la conmutación debe ser más rápida, pero todavía pueden usarse volantes mecánicos.
Zona III — alta velocidad	1000–2000 km	Impulsos de microsegundos	Supercondensadores e interruptores rápidos de tiristores GTO/IGCT	El tiempo para recorrer un kilómetro cae a 0,09 s. Solo los supercondensadores con respuesta de nanosegundos pueden estabilizar el impulso.

Importante: la energía necesaria por kilómetro en la zona III es menor que en la zona I porque la aceleración disminuye. La carga sobre los componentes baja pese a que se exige una descarga más rápida.

- **Redundancia y resistencia a emergencias**

- **Controladores duplicados:** cada controlador de segmento y de kilómetro tiene reserva activa, es decir, dos placas idénticas con alimentación independiente.
- **Alimentación cruzada:** cada bloque kilométrico puede recibir energía tanto de su controlador de segmento como de los vecinos mediante cables de reserva en el túnel técnico.
- **Redundancia local de bobinas:** cada bloque tiene tres conjuntos independientes que se alternan. Si uno resulta dañado, los otros dos siguen acelerando con menor eficiencia, pero sin detener el sistema.
- **Desconexión de emergencia:** al detectar un cortocircuito o sobrecalentamiento, el controlador kilométrico corta la alimentación de su bloque y lo aísla con compuertas entre secciones, sin afectar a los bloques vecinos.

- **Realización material y conclusiones**

Elemento	Ubicación	Función
Acumuladores primarios	En superficie, en los terminales	Almacenamiento de energía a largo plazo, 360 GWh.
Cables troncales	Túnel técnico de 3 m	Transmisión redundante de energía desde los terminales a los segmentos.
Controladores de segmento	Nichos del túnel principal cada 50 km	Distribución de energía entre 10 bloques kilométricos y sincronización.
Baterías tampón de ion-litio	Bajo las paredes del túnel principal	Suavizado de picos de varios segundos en las zonas I y II.
Volantes de inercia	Tras las paredes del túnel, zona II	Amortiguación de impulsos de milisegundos.
Supercondensadores	Tras las paredes del túnel, zona III	Estabilización de microsegundos y compensación de caídas.
Controladores locales kilométricos	En nichos cada 1 km	Control de la conmutación de bobinas, supervisión del estado y gestión de acumuladores.
Bobinas del acelerador	Superficie interior del túnel	Creación del campo magnético viajero que acelera la lanzadera.

- **Ventajas de la arquitectura energética**

- **Distribución gradual de la carga.** La potencia máxima no se requiere a la vez en toda la longitud: impulsos lentos al principio y breves pero menos potentes al final.

- Redundancia en todos los niveles. El fallo de un terminal, un controlador o incluso un segmento entero de 50 km no detiene el sistema: los terminales y segmentos vecinos compensan la energía que falta.
- **Flexibilidad de ampliación.** Añadir líneas StarRoad paralelas no exige reconstruir la red energética; basta con instalar cables troncales adicionales en el túnel técnico existente.
- **Optimización de costes.** Los costosos supercondensadores y volantes de inercia solo se utilizan donde son necesarios, en los tramos finales; al principio bastan baterías de ion-litio más baratas.

4.2. Portal atmosférico (terminal de gran altitud)

Resuelve el problema de la «última milla».

4.2.1. Ubicación y construcción

El complejo del portal se sitúa en la meseta de la cima del monte Mohi, a unos 3400 m de altitud, en la República Democrática del Congo. Una extensa meseta 16 km al sur queda reservada para futuras ampliaciones con decenas de portales paralelos. La estructura maciza contiene un cierre mecánico principal y sistemas que crean una barrera gasodinámica. En la práctica se asemeja a un motor a reacción terrestre fijo, con una triple tobera anular inclinada hacia el cielo, no para acelerar un cuerpo, sino para desplazar la atmósfera y crear un colchón cuando la lanzadera entra en ella.

4.2.2. Barrera gasodinámica

Elemento de trabajo principal. Unos segundos antes de que llegue la lanzadera se crea un flujo cónico de gas supersónico dirigido hacia fuera a lo largo del eje del túnel.

- **Fuente y configuración:** tres motores anulares de reacción concéntricos e independientes, o estatorreactores hipersónicos equivalentes con tres coronas, rodean la boca del portal y funcionan con una mezcla de aire e hidrógeno. El hidrógeno se produce allí mismo por electrólisis. Dos coronas cualesquiera bastan para formar una barrera eficaz, de modo que el sistema sigue funcionando si falla la tercera. Cada corona dispone de alimentación de combustible, control y encendido propios. Se colocan escalonadas alrededor del exterior del portal, desde la menor hasta la mayor en posiciones progresivamente retrasadas. El cierre mecánico queda dentro del portal, detrás de la cascada, por lo que las coronas pueden encenderse antes de abrirlo.

- **Funciones principales :**

1) crear una presión dirigida hacia fuera que proteja el vacío del túnel mientras pasa la lanzadera;

2) desplazar y calentar de antemano el aire situado ante la salida para establecer un gradiente entre el vacío del túnel y la atmósfera, y formar así una transición gradual entre ambos medios.

La barrera gasodinámica no es una protección aerodinámica de la lanzadera ni la aísla de la atmósfera. Su función es prolongar la transición entre medios: una carga de choque casi instantánea, de microsegundos, contra aire frío e inmóvil se convierte en una carga repartida durante milisegundos al entrar en un flujo caliente que avanza en la misma dirección. Las fuerzas aerodinámicas integradas no disminuyen, pero sí lo hacen drásticamente la brusquedad y las componentes de alta frecuencia, reduciendo el riesgo de daños locales y choque térmico.

- **Forma del flujo:** cono de sección elíptica acorde con el túnel y la lanzadera, con una longitud de decenas a centenares de metros y proyectado hacia fuera por tres filas de toberas anulares del portal.

La barrera gasodinámica no necesita formar un cono geométricamente perfecto, estacionario o estrictamente axisimétrico. Su régimen es dinámico por naturaleza y admite variaciones temporales y espaciales de forma, densidad y velocidad.

La única condición rígida es mantener durante toda la salida un gradiente positivo de presión y cantidad de movimiento, dirigido hacia fuera, que impida por completo la entrada de aire atmosférico en el túnel. La preparación gasodinámica y térmica previa de la zona de salida aumenta de manera sustancial la fiabilidad y viabilidad del sistema.

Por tanto, la forma del flujo es un parámetro adaptativo, no una magnitud objetivo. Se optimiza en tiempo real mediante variables integrales —presión, caudal másico y cantidad de movimiento— y no según una geometría impuesta.

- **Escalabilidad y ensayos: a diferencia** del acelerador de miles de kilómetros, el portal es modular y fácil de escalar. Las tecnologías críticas —formación de un cono gasodinámico supersónico estable, sincronización y funcionamiento

de las coronas de reacción— pueden validarse por completo en bancos funcionales a escala 1:5 o 1:10. Así se eliminan los principales riesgos técnicos antes de iniciar la construcción de la línea a tamaño real.

4.2.3. Sistema de seguridad

El uso de hidrógeno exige una protección reforzada frente a incendios y explosiones. Toda la infraestructura incorpora detección redundante de fugas, purga inerte de tuberías con nitrógeno, equipos antideflagrantes, separación física entre electrolizadores, depósitos y coronas motrices, y conductos de ventilación dirigidos para evacuar posibles emisiones a la atmósfera lejos del personal y de las instalaciones críticas.

4.3. Lanzadera (AstroLiner)

4.3.1. Dimensiones y masa de lanzamiento

Longitud aproximada de 150 m y sección elipsoidal de unos 10 × 15 m. La forma es una cuña hipersónica optimizada para reducir la resistencia y la carga térmica al atravesar la atmósfera.

- **Masa óptima de lanzamiento: unas 15 000 toneladas.**

Las 15 000 toneladas son el resultado de buscar el óptimo técnico y económico, situado en el punto medio entre las limitaciones físicas y las posibilidades de realización.

Criterio	Límite inferior (< 8000–10 000 t)	Óptimo (15 000 t)	Límite superior (> 20 000–25 000 t)
Aerodinámica y aceleraciones	Domina la atmósfera. La resistencia $F_d = \rho \cdot A \cdot v^2$ produce aceleraciones elevadas, $a = F_d/m$, exige estabilización activa compleja y genera picos de carga térmica.	Domina la inercia. La resistencia atmosférica causa aceleraciones iniciales breves —hasta 5 segundos y unos 3–6 g— que permiten usar amortiguación y protección térmica más sencillas.	Las aceleraciones disminuyen poco y otros factores anulan las ventajas.
Régimen térmico	Baja capacidad térmica. Una masa pequeña m se calienta con rapidez según $\Delta T = Q \cdot t / (m \cdot c)$ y requiere sistemas extremos de refrigeración activa.	Gran inercia térmica. La estructura masiva absorbe y reparte el pico de calor de la breve travesía atmosférica, permitiendo combinar protección pasiva y activa.	La capacidad térmica aumenta, pero extraer el calor de una estructura tan masiva se convierte en otro problema.
Energía de lanzamiento	La energía necesaria, $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$, es aceptable, pero no compensa las demás desventajas.	Equilibrio razonable. Acelerar hasta 11 km/s requiere unos 9×10^{14} J, equivalentes a 252 GWh, dentro de las posibilidades del sistema geotérmico autónomo distribuido y sus acumuladores.	El consumo energético crece linealmente y exige incrementos desproporcionados de potencia y capacidad de almacenamiento, lo que resulta antieconómico.
Construcción y logística	Es realizable, pero no ofrece la ventaja principal del «ariete inercial».	Compatible con tecnologías existentes. Las dimensiones y la masa entran en las capacidades actuales de los astilleros, la soldadura industrial y el transporte pesado.	La estructura pierde rigidez y surgen problemas de modos propios, montaje y transporte hasta el punto de partida. Los costes crecen más que linealmente.
Filosofía de StarRoad	Permanece en el paradigma del «vehículo ligero», vulnerable a la atmósfera.	Aplica el paradigma del «ariete inercial»: la atmósfera deja de ser una barrera y pasa a ser una perturbación breve que se supera mediante masa y resistencia estructural.	Se convierte en una tarea inabarcable para la industria y anula las economías de escala.

- **Físicamente:** está por encima del umbral aproximado de 10 000 t a partir del cual la inercia comienza a dominar los efectos aerodinámicos.
- **Energéticamente:** no provoca un crecimiento exponencial de las necesidades de infraestructura.
- **Tecnológicamente:** permanece dentro de prácticas industriales escalables, como la construcción naval y la maquinaria pesada.
- **Económicamente:** equilibra la reducción del coste de puesta en órbita por efecto de escala con la limitación de la inversión inicial.

Esta masa es, por tanto, un **óptimo calculado que hace StarRoad físicamente realizable y económicamente justificable.**

4.3.2. Distribución y sistemas

Toda la arquitectura interior se organiza como una estructura longitudinal multinivel, con las funciones separadas según la altura del fuselaje.

- **Las partes inferior y posterior** se reservan por completo a la energía y la propulsión: reactor de a bordo, intercambiadores, circuitos de refrigeración activa, convertidores de potencia, acumuladores, conducciones de fluido térmico y elementos de propulsión marina. Esta disposición baja el centro de masas, mejora la estabilidad durante el vuelo hipersónico, el planeo y el amerizaje, y simplifica la protección térmica y radiológica de los compartimentos superiores.
- **El sistema superconductor de levitación y estabilización** se integra a lo largo de los costados y, en parte, del fondo. Sus módulos se fijan justo detrás del revestimiento exterior y la protección térmica para reducir el espacio con los bobinados pasivos del túnel. Los imanes se colocan:
 - a lo largo de ambos costados en toda la longitud, incluidas las zonas superior y media hasta la línea de las compuertas deslizantes;
 - en las partes media y posterior del fondo;
 - excepto en las salidas de las alas principales y los alojamientos mecánicos.

Esta distribución crea un campo uniforme, una gran estabilidad a velocidad hipersónica y tolerancia a daños locales.

- **La parte central** contiene los alojamientos de las alas plegables y su estructura resistente. Las alas principales se retraen dentro del fuselaje y quedan aisladas de los compartimentos de energía y carga. En la zona central del morro se alojan pequeñas alas de control retráctiles para corregir y estabilizar la trayectoria durante los regímenes transitorios.
- **La parte superior** alberga un módulo universal e intercambiable de carga útil. Sus dimensiones, puntos de fijación, masa y posición admisible del centro de gravedad están normalizados; puede configurarse para carga, combustible, pasajeros o un uso combinado. El módulo se instala y extrae en el dique antes del lanzamiento y también puede manipularse en órbita después de abrir las compuertas superiores. Un elevador hidráulico o electromecánico integrado y unas guías permiten sacar automáticamente los módulos en microgravedad sin intervención de la tripulación.
- **Las compuertas superiores** deslizantes no forman parte de la estructura resistente; actúan como carenado aerodinámico y acceso orbital. Integran paneles radiadores plegables. Una vez abiertas y bloqueadas por completo, los paneles se despliegan automáticamente y reciben refrigerante para radiar el exceso de calor al vacío.
- **El morro de la lanzadera** tiene una disposición funcional en varios niveles:
 - zona superior: puente, control, navegación y comunicaciones;
 - zona media: mecanismos de las pequeñas alas retráctiles y superficies de control;
 - zona inferior: depósitos criogénicos de combustible y refrigerante, dispuestos para minimizar la resistencia hidráulica y llevar cuanto antes el medio refrigerante al sistema activo del morro durante la travesía atmosférica.

Esta distribución acorta los circuitos térmicos e hidráulicos, reduce la inercia térmica del morro y mejora la fiabilidad de la protección en la fase más exigente. En conjunto, la lanzadera adopta una arquitectura rígida, modular y escalable, optimizada para el lanzamiento hipersónico, las operaciones orbitales, la navegación autónoma y múltiples usos sin desmontar en profundidad el fuselaje.

4.3.3. Protección térmica del fuselaje

El morro y el fondo incorporan una protección térmica multicapa, metálica y compuesta, calculada para las cargas térmicas y dinámicas extremas del vuelo hipersónico y el posterior amerizaje. Combina elementos pasivos y activos:

- una capa exterior resistente al calor, capaz de soportar durante breves periodos temperaturas de miles de grados y un calentamiento radiativo intenso;
- una subcapa metálica resistente que absorbe las cargas mecánicas y vibratorias;

- circuitos de refrigeración activa que extraen calor de las zonas más exigidas, sobre todo el morro y el borde delantero del fondo;
- elementos ablativos sustituibles en puntos críticos, diseñados para desgastarse de forma controlada sin dañar la estructura principal.

La protección tiene en cuenta el choque térmico cuando el casco caliente entra en contacto con el agua al amerizar, incluidos gradientes bruscos y tensiones térmicas cíclicas. Los elementos más exigidos están segmentados y pueden cambiarse de forma modular durante el mantenimiento, lo que mejora la reparabilidad y la vida útil en usos repetidos.

4.3.4. Alas

La lanzadera dispone de dos pares de alas retráctiles para estabilización, planeo y amerizaje. Se despliegan al alcanzar las capas poco densas de la atmósfera.

- **El par delantero** corrige la trayectoria, estabiliza el cabeceo y el alabeo y amortigua las perturbaciones dinámicas. Se despliega en las capas poco densas para el planeo.

Parámetros de cada ala delantera:

- longitud desde la raíz: unos 35 m;
- cuerda en la raíz / punta: unos 14 / 7 m;
- superficie: unos 360–400 m².

- **El par trasero** constituye la principal superficie aerodinámica de la lanzadera.

Parámetros de cada ala trasera:

- longitud desde la raíz: unos 100 m;
- cuerda en la raíz / punta: unos 14 / 7 m;
- superficie: unos 1000–1100 m².

La superficie alar total es de unos 2800–2900 m². La forma sustentadora del fuselaje eleva la superficie aerodinámica efectiva otro 20–30 %.

En régimen subsónico, esta configuración ofrece una relación sustentación/resistencia L/D de aproximadamente 9–13, suficiente para un planeo estable y una elección controlada del punto de amerizaje. Las velocidades típicas de planeo y contacto se estiman en 90–120 m/s, unos 320–430 km/h. A estas velocidades la seguridad depende menos de la velocidad horizontal absoluta que de la velocidad vertical al tocar el agua, el ángulo de ataque y la senda de descenso.

4.3.5. Sistemas de paracaídas

Para reducir el impacto del amerizaje y ampliar la ventana admisible, la lanzadera incorpora un sistema reutilizable de paracaídas tipo parafoil que actúa como circuito condicional de aterrizaje suave.

- **Arquitectura y ubicación:** hay dos posiciones de parafoil:

- una en **la parte superior posterior** ;
- otra en **la parte superior delantera** , justo detrás del morro.

Cada posición sigue un esquema N+1 — parafoil principal y de reserva— con empaquetado y líneas de extracción independientes. Las velas no se fijan en un solo punto, sino **mediante una línea transversal** unida a los marcos resistentes, lo que reduce los picos locales y estabiliza cabeceo y alabeo. Los dos conjuntos quedan separados longitudinalmente para evitar interferencias y enredos.

- **Superficie y funcionamiento:** los parafoils no sostienen todo el peso del vehículo; amortiguan la velocidad vertical al final y crean una fase de contacto suave. Valores orientativos:

- superficie de cada parafoil principal: unos **4500–6000 m²** ;
- superficie activa total con los dos parafoils: unos **9000–12 000 m²** .

La velocidad vertical objetivo en el contacto es $-V_z \approx 1 \text{ m/s}$.

- **Criterio de activación:** el sistema solo se emplea cuando **hace falta**. El **algoritmo** de amerizaje considera la **aceleración total**, suma vectorial de las componentes aerodinámica, inercial e hidrodinámica:
 - si la aceleración total prevista al contacto **no supera 4 g**, el amerizaje se **realiza sobre las alas** sin parafoils;
 - si **existe** riesgo de superar 4 g, el sistema se activa, reduce la componente vertical a su valor objetivo y pasa a un descenso suave.
- **Reutilización: parafoils**, líneas y anclajes están diseñados para muchos usos con mantenimiento programado — inspección, secado y sustitución de piezas de desgaste— sin desmontar la estructura resistente del fuselaje.

4.3.6. Sistema autónomo de potencia y propulsión

La lanzadera dispone de un sistema energético y propulsivo totalmente autónomo para todo el ciclo de misión, desde las maniobras orbitales hasta varios meses de navegación independiente.

- **Fuente principal de energía: reactor nuclear de a bordo.**
 - **Tipo:** reactor rápido compacto de sales fundidas o reactor de alta temperatura refrigerado por gas de nueva generación; en el futuro, un módulo compacto de fusión, por ejemplo de compresión de campo como el de Helion Energy.
 - **Potencia:** 10–20 MW eléctricos y 50–100 MW térmicos.
 - **Función:** alimentar todos los sistemas de a bordo, los elementos superconductores de levitación magnética , **los propulsores electromagnéticos de plasma**, la refrigeración activa **y la propulsión marina autónoma** . El reactor funcionará sin recarga durante toda la vida de la lanzadera, entre 5 y 10 años.
- **Sistema superconductor embarcado de levitación y estabilización.** A lo largo del fuselaje se integran módulos criogénicos con superconductores de alta temperatura refrigerados por nitrógeno o hidrógeno líquido de los sistemas de a bordo. Su potente campo principal proporciona levitación y estabilización activa. Incluso si el túnel pierde por completo la alimentación exterior, la interacción inductiva con sus bobinados pasivos, que actúan como «raíles», mantiene la sustentación por efecto de espejo magnético.

El control de estabilización está jerarquizado:

- 1) **circuito pasivo**, microsegundos: el acoplamiento inductivo entre superconductores y bobinas del túnel crea automáticamente una fuerza restauradora ante cualquier desplazamiento, sin electrónica;
- 2) **circuito de hardware**, de microsegundos a milisegundos: dispositivos FPGA y ASIC especializados detectan desequilibrios y conmutan las secciones mediante algoritmos deterministas;
- 3) **circuito de software**, de milisegundos a decenas de milisegundos: el ordenador de a bordo, con apoyo limitado de IA, redistribuye las corrientes entre secciones superconductoras para compensar derivas lentas y desequilibrios locales, sin necesidad de reaccionar en nanosegundos.

Esta arquitectura reacciona a las perturbaciones en milisegundos, varios órdenes de magnitud más rápido de lo que exige la estabilidad de una lanzadera de 15 000 toneladas a velocidad hipersónica.

- **Propulsores principales : propulsores electromagnéticos de plasma de gran empuje.**
 - **Principio:** propulsores magnetoplasmadínamicos o de impulso específico variable, como VASIMR, alimentados por el reactor de a bordo.
 - **Empuje:** hasta 50–100 kN, equivalentes a 5–10 toneladas-fuerza, en régimen pulsado; suficiente para correcciones orbitales, salida de órbita y transferencias entre órbitas.
 - **Propelente:** reserva de xenón, argón o hidrógeno líquido, usado también para refrigeración.
 - **Autonomía:** la IA de a bordo calcula y ejecuta por sí sola las maniobras de acoplamiento con estaciones orbitales, descarga y regreso.
- **Gestión térmica :**
 - **radiadores desplegables:** paneles con circuito líquido que se abren en el espacio para radiar al vacío el exceso de calor del reactor y los equipos;

- **acumuladores térmicos de cambio de fase:** elementos críticos situados en el morro y otros puntos exigidos. Absorben picos de varios megajulios durante la travesía atmosférica al salir y al regresar, y después liberan lentamente el calor mediante los radiadores en el espacio o al entorno en el océano;
- **refrigeración activa: circuito** cerrado de helio o hidrógeno líquido para enfriar de emergencia el escudo térmico y los elementos críticos durante el vuelo.
- **Redundancia y seguridad:** controles del reactor duplicados, circuitos de refrigeración independientes y medios de emergencia para disipar calor. El diseño mantiene la seguridad en cualquier escenario, incluida una caída al océano.

4.3.7. Sistemas autónomos de amerizaje y navegación marítima

Después de amerizar en la zona prevista del Atlántico, la lanzadera pasa a funcionar como buque totalmente autónomo. Para ello utiliza:

- **propulsión marina:** dos propulsores azimutales retráctiles o dos hidrochorros que ofrecen gran maniobrabilidad a baja velocidad;
- **energía para navegar:** el reactor nuclear o de fusión de a bordo **alimenta los propulsores y sistemas** en régimen mínimo. Su núcleo permite travesías autónomas de varios meses;
- **navegación y comunicaciones :** navegación por satélite GPS/GLONASS e inercial, radares y ládares para reconocer el entorno marítimo, y enlace fiable mediante satélites geoestacionarios;
- **frenado final: justo antes del** contacto, la velocidad residual de 100–150 km/h se reduce mediante un pequeño paracaídas de frenado, **que estabiliza e inicia la** desaceleración, y un breve impulso de los **propulsores principales de plasma, que ajusta con** precisión la velocidad vertical. El paracaídas **se desprende después del amerizaje;**

Esta configuración permite que la lanzadera **se dirija por sí sola a su puerto** base o al encuentro con un remolcador sin ayuda inmediata. Puede **mantenerse autónomamente en mar gruesa**, realizar largas travesías y llegar al dique asignado para el mantenimiento programado, convirtiéndose de vehículo **espacial en buque** robotizado.

4.3.8. AstroLiner-S: versión inicial simplificada

En las primeras fases de StarRoad se utilizará una versión inicial de la lanzadera, AstroLiner-S —Simplified / Start—, como configuración básica, tecnológicamente más sencilla y operativamente más conservadora.

Esta variante es plenamente funcional, pero simplifica la energía y otros sistemas. Está destinada a la puesta en servicio inicial de la línea, a los primeros lanzamientos de carga y tripulados y a reducir por etapas los riesgos técnicos, operativos y normativos.

- **Idea principal de AstroLiner -S:** aplicar el paradigma básico de StarRoad —atravesar la atmósfera por inercia— **sin una fuente nuclear o de fusión a bordo y conservando íntegramente** las dimensiones y la masa de lanzamiento de la versión principal .

Todas las operaciones de potencia extrema —aceleración, levitación y estabilización dentro del túnel— recaen por completo en la infraestructura terrestre.

AstroLiner-S es:

- un vehículo de transporte autónomo;
- totalmente reutilizable;
- capaz de alcanzar la órbita, abandonarla y regresar por sus propios medios;
- propulsado exclusivamente por motores químicos fuera del túnel;
- sin fuentes embarcadas de radiación ionizante de alta potencia.
- **Energía y sistemas superconductores:** la configuración AstroLiner-S elimina por completo:
 - las plantas nucleares y de fusión;
 - sus riesgos radiológicos, térmicos y accidentales;
 - los escenarios de contaminación irreversible del túnel y los tramos del portal.

Los elementos superconductores de levitación, estabilización e interacción con la vía:

- se precargan con corriente antes del lanzamiento;
- se colocan en régimen persistente;
- están aislados entre sí y controlados por el sistema de a bordo.

Las baterías y los acumuladores inerciales de volante alimentan la electrónica, el control y las protecciones durante todo el ciclo de aceleración en el túnel, con margen temporal.

Durante la aceleración, el control activo de los circuitos superconductores se limita a pequeñas corrientes correctoras y a los modos de emergencia, por lo que no hace falta una fuente continua de alta potencia a bordo.

En órbita se emplean paneles solares plegables como fuente activa de electricidad.

○ **Propulsión fuera del túnel**

Todas las operaciones orbitales de AstroLiner-S se realizan con propulsión química.

La lanzadera incorpora:

- motores químicos principales de empuje medio, de tipo LOX/LH₂ o LOX/LCH₄;
- sistemas redundantes de control de actitud y emergencia (RCS).

La propulsión permite:

- completar la inserción en la órbita prevista después de salir de la atmósfera;
- corregir los parámetros orbitales;
- abandonar la órbita;
- efectuar una reentrada controlada y regresar.

La ausencia de propulsores eléctricos y magnetoplasmáticos en esta versión se debe a que no hay una fuente eléctrica embarcada de alta potencia; no constituye una limitación de la arquitectura general.

○ **Regreso y reutilización**

AstroLiner-S puede:

- salir de órbita de forma autónoma;
- realizar una reentrada atmosférica controlada y de poca pendiente;
- planear aerodinámicamente;
- amerizar mediante sus alas y el sistema de parafoils.

La ausencia de reactor simplifica considerablemente:

- la operación marítima;
- el mantenimiento programado;
- la recuperación del vehículo después de amerizajes imprevistos.

○ **Papel de AstroLiner-S en el desarrollo de StarRoad**

AstroLiner-S se concibe como:

- la primera versión de serie de la lanzadera StarRoad;
- una plataforma para acumular estadísticas de lanzamientos y fallos;
- un medio para poner el sistema en servicio de forma temprana;
- el transporte básico de la primera infraestructura orbital.

A medida que avance el proyecto, aparezcan fuentes compactas de alta potencia y se acumule experiencia operativa, AstroLiner-S podrá complementarse progresivamente o ser sustituido por el AstroLiner completo, dotado de plantas energéticas embarcadas y propulsores electromagnéticos de plasma.

AstroLiner-S no es, por tanto, una solución de compromiso, sino un primer nivel lógico que permite explotar StarRoad antes, con mayor seguridad y menor riesgo sistémico, sin alterar la arquitectura fundamental de la línea.

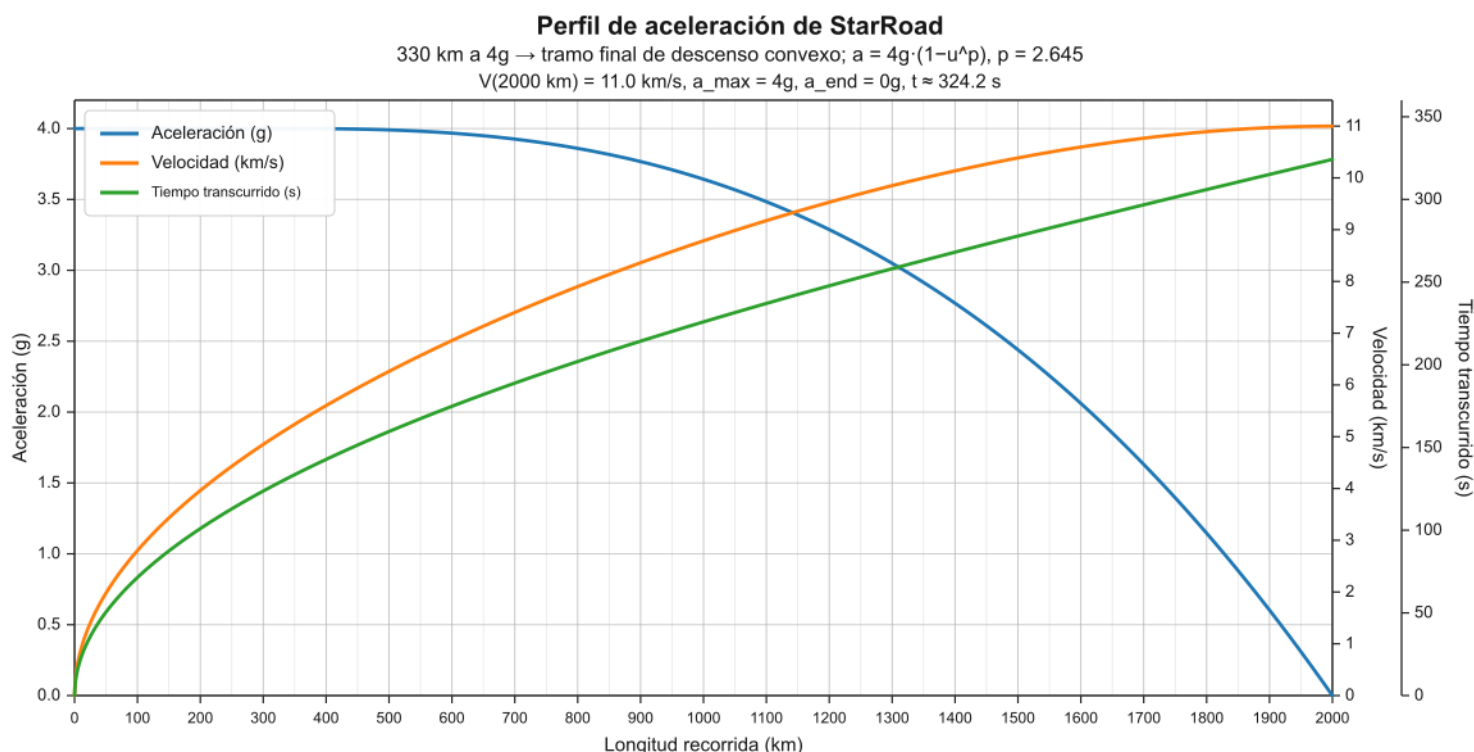
5. Ciclo operativo desde la preparación del lanzamiento hasta el mantenimiento posterior al amerizaje

5.1. Preparación y lanzamiento

La lanzadera cargada se coloca en la cámara de lanzamiento, cerca de Batanga. Primero se prueban sus sistemas de a bordo y después los del acelerador. A continuación se realiza la prueba previa al lanzamiento del portal gasodinámico. Se energizan los superconductores de a bordo, se pone en marcha y se comprueba la levitación magnética y se evacúa el túnel. A la orden de lanzamiento comienza el suministro de energía por impulsos a los primeros segmentos del acelerador.

5.2. Aceleración en el túnel

- **0–330 km. Aceleración** longitudinal inicial de unos 4g. Una parte considerable de la energía se destina a la levitación y a vencer la gravedad.
- **330–aprox. 1.800 km, tramo descendente de la curva en S.** La aceleración longitudinal disminuye suavemente desde los 4g iniciales hasta cero. La lanzadera recorre las curvas subterráneas con cargas de hasta unos 4g, mientras los elementos electromagnéticos circundantes estabilizan su trayectoria.
- **Aprox. 1.800–2.050 km, tramo ascendente de la curva en S.** La aceleración cae a cero al acercarse al portal. Durante los últimos 50 km la lanzadera avanza por inercia a unos 11 km/s.



5.3. Salida por el portal atmosférico

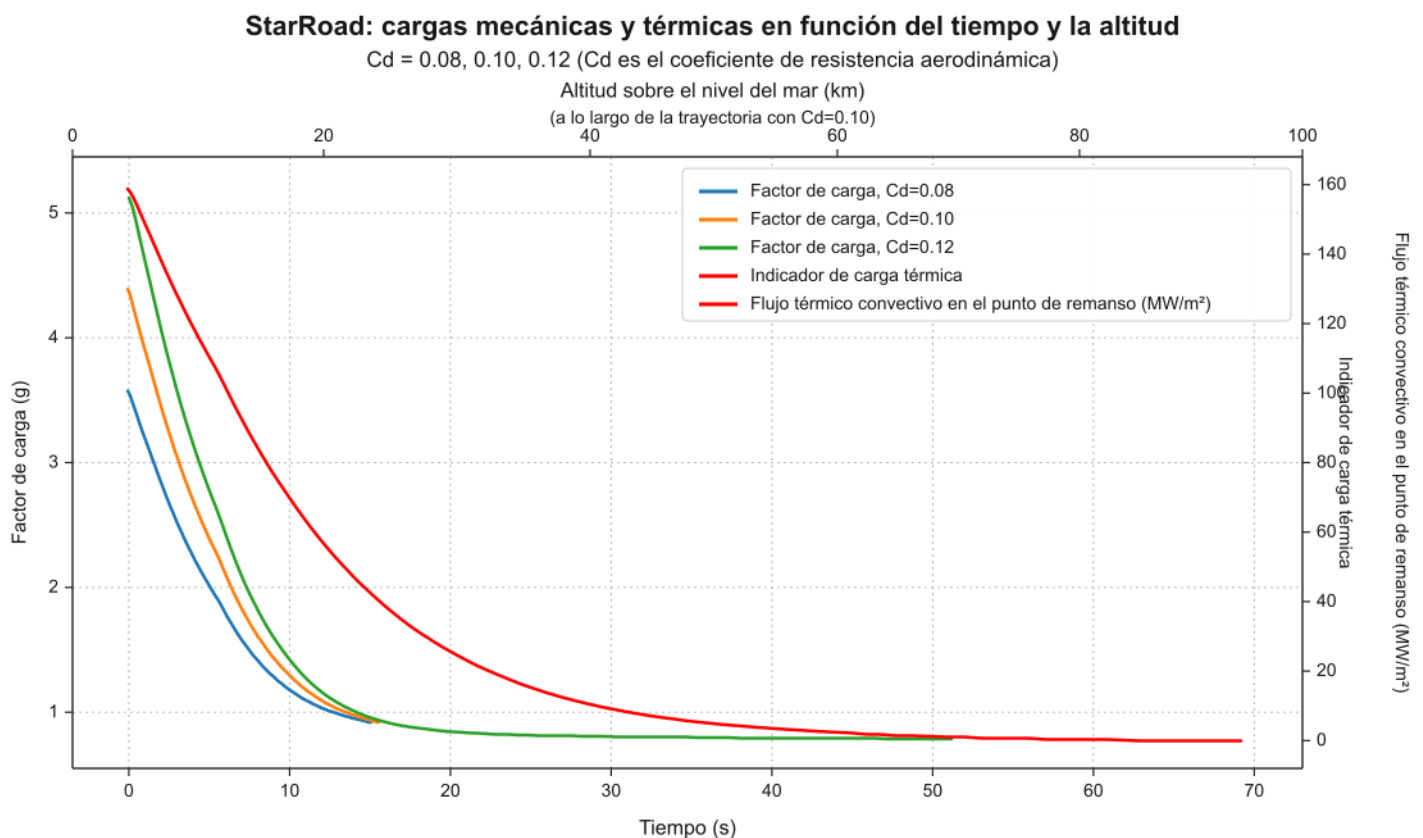
- Gracias a la elevada cota de partida, a unos 30 km del portal la lanzadera ya se encuentra a más de 10 km sobre el nivel del mar, lo que reduce al mínimo el efecto de la onda de choque sobre el territorio. Los anillos propulsores del portal se prueban un minuto antes del lanzamiento sin abrir el cierre mecánico. Cuando la lanzadera ha recorrido el 45% del túnel, se libera por los anillos un flujo supersónico de aire comprimido acumulado por las bombas al evacuar la última sección. Unos 10 segundos antes del paso se inyecta hidrógeno y la barrera gasodinámica entra en su régimen principal de combustión, formando un flujo supersónico cónico, estable, caliente y parcialmente ionizado. Tres segundos después de activarse correctamente los anillos y formarse el cono caliente de gradiente y barrera, se abre el cierre mecánico.

- La barrera también evita la pérdida del vacío del túnel y modera el choque térmico inicial. En milisegundos, la lanzadera atraviesa la zona previamente preparada de gas enrarecido y caliente. Esta tecnología clave modifica el perfil temporal de la primera carga aerodinámica y elimina el frente de choque ultrabreve propio del cambio de medio.
- La barrera gasodinámica no reduce la suma de las fuerzas aerodinámicas: traslada la sobrecarga de choque del intervalo de microsegundos al de milisegundos, reduciendo de forma decisiva las tensiones locales, las vibraciones y el choque térmico de la estructura.
- El cierre mecánico se abre inmediatamente después del paso de la lanzadera; a continuación se apagan sin demora los anillos de motores.

5.4. Cruce de la atmósfera

La lanzadera sigue una trayectoria balística y utiliza su masa inercial y su sólida estructura para atravesar las capas densas de la atmósfera. Las cargas térmicas y dinámicas máximas se concentran en los primeros 10–20 segundos.

- **Aclaración esencial.** Al salir de la barrera gasodinámica, la lanzadera comienza a interactuar de inmediato con la atmósfera normal a la altitud prevista, unos 3.400 m. Todos los cálculos de trayectoria, flujo térmico y sobrecarga parten de una interacción aerodinámica completa con la atmósfera; no presuponen un «escudo de gas», un «canal» ni un volumen enrarecido que acompañe al vehículo.



5.5. Entrada en el espacio y operaciones orbitales

Tras abandonar la atmósfera se despliegan los radiadores para disipar calor. A continuación, la lanzadera activa sus motores electromagnéticos de plasma para corregir con precisión la trayectoria e insertarse en la órbita objetivo, a menudo directamente más allá de la órbita geoestacionaria o hacia un punto de Lagrange. Después se despliega la carga útil. En la configuración AstroLiner-S, la inserción final y las correcciones orbitales se realizan con propulsión química.

5.6. Salida de órbita y regreso

La versión completa de AstroLiner sale de órbita mediante motores electromagnéticos de plasma. En AstroLiner-S, el sistema químico realiza el frenado de salida de órbita, las correcciones y las maniobras finales.

5.7. Amerizaje

Sobre el Atlántico, cerca de Gabón, se despliega el sistema de paracaídas de frenado. La lanzadera ameriza con un ángulo de ataque reducido sobre su fondo reforzado, diseñado para el contacto de una superficie caliente con agua fría. Tras el amerizaje se despliegan las hélices o los propulsores de chorro de agua.

5.8. Remolque y mantenimiento

Los propulsores propios, alimentados por el reactor de a bordo, llevan el vehículo al complejo portuario; si fallan los sistemas de la lanzadera, lo hacen los remolcadores de guardia. Allí se inspecciona, se mantiene, se repara la protección térmica y se prepara el siguiente viaje. AstroLiner-S regresa mediante baterías, una unidad auxiliar de potencia o remolcadores de guardia.

6. Ejecución, calendario, requisitos y centros industriales

6.1. Fases del proyecto

La ejecución de StarRoad se plantea como una secuencia de etapas relacionadas tecnológicamente y justificadas en términos económicos. Cada fase tiene objetivos y criterios de éxito claros y crea la infraestructura necesaria para la siguiente, reduciendo los riesgos técnicos y financieros.

6.1.1. Fase 0: concepto y ensayos (2–5 años)

- **Objetivo:** validar los principios físicos, desarrollar las tecnologías críticas en laboratorio y crear una base de ingeniería.
- **Actuaciones principales**
 1. Modelización matemática y CFD detallada de todos los procesos: aceleración, funcionamiento del portal e impacto aerodinámico.
 2. Constitución de un consorcio internacional y acuerdos políticos y jurídicos preliminares.
 3. Estudios geológicos y ambientales a lo largo de todo el trazado.
 4. Creación de campos de prueba fuera del emplazamiento principal:
 - ensayos en banco de módulos de levitación superconductora y sistemas de alimentación por impulsos;
 - construcción y prueba de un prototipo a escala 1:10 del portal gasodinámico para confirmar que puede formarse una barrera de gradiente estable;
 - Excavación de un breve túnel demostrador al vacío de 1–2 km para validar la integración de los sistemas de vacío, la aceleración magnética de cuerpos de ensayo ligeros y la seguridad.
- **Criterio de éxito:** datos experimentales que confirmen la viabilidad de las soluciones principales —portal, levitación y estabilización— y finalización del proyecto técnico detallado de la fase 1.

6.1.2. Fase 1: ancla de infraestructura y energía (5–7 años)

- **Objetivo:** crear la «columna vertebral energética» y desarrollar la construcción robotizada en condiciones de campo.
- **Actuaciones principales**
 1. Implantación de la producción en series cortas de tuneladoras robotizadas estandarizadas de 2 metros de diámetro.
 2. Excavación en paralelo del primer par de túneles colectores troncales del sistema geotérmico autónomo a lo largo de los ~2.050 km de la ruta para crear el circuito inicial de estabilización térmica.
 3. Construcción de las primeras centrales geotérmicas con CO₂ supercrítico obtenido mediante captura directa del aire (DAC) en puntos clave del trazado.
 4. Excavación, sobre los colectores geotérmicos, de un túnel prototipo de pequeño diámetro —D=2 m, L=2.050 km— dotado de sistemas básicos de vacío, comunicaciones y servicio.

- **Criterio de éxito:** la configuración mínima del sistema geotérmico funciona por completo y es autónoma en energía; queda probado el proceso de excavación robotizada de alta velocidad y existe una base para ampliaciones posteriores.

6.1.3. Fase 2: validación a pequeña escala (categoría de «complejo científico e instrumental») (4–6 años)

- **Objetivo:** comprobar la sincronización y la seguridad de los sistemas a velocidades realistas y obtener datos experimentales únicos.
- **Actuaciones principales**
 1. En el pequeño túnel de pruebas, acelerar y frenar cuerpos inertes de hasta varias toneladas a velocidades de 1–11 km/s.
 2. Ensayos completos de un prototipo de portal gasodinámico a escala 1:5 con el paso de una pequeña lanzadera experimental.
 3. Comprobación experimental de la hipótesis del «ariete inercial»: lanzar masas de ensayo con estructuras y protecciones térmicas diferentes para medir las aceleraciones y los flujos de calor.
 4. Inicio del diseño detallado y la fabricación de prototipos de los sistemas esenciales de la lanzadera a escala real, incluidos los imanes superconductores y los acumuladores térmicos.
- **Criterio de éxito:** todos los sistemas de sincronización funcionan de forma estable y segura; se confirma la eficacia del portal gasodinámico; los experimentos demuestran que las cargas específicas disminuyen al aumentar la masa; se completa el anteproyecto de la lanzadera.

6.1.4. Fase 3: sección plenamente funcional y prototipo de lanzadera (4–7 años)

- **Objetivo:** integrar y ensayar sistemas en su configuración final sobre un tramo significativo y crear un prototipo de vuelo.
- **Actuaciones principales**
 1. Construcción de una sección plenamente funcional de 50–200 km del túnel acelerador principal con la sección definitiva de 17,5 × 12,5 m, incluidos todos los devanados, acumuladores de energía y el túnel de servicio.
 2. Ampliación del sistema geotérmico bajo ese tramo hasta la configuración completa de siete túneles.
 3. Fabricación y ensayos exhaustivos en tierra de un prototipo de lanzadera a escala real sin propulsión: sistemas criogénicos, resistencia estructural y protección térmica.
 4. Ensayos de integración en el túnel: aceleración y frenado de masas representativas de la lanzadera hasta 8g y ~4 km/s; validación de todos los protocolos de emergencia Alarm 1–3.
 5. Desarrollo, ensayo en tierra y certificación de un reactor nuclear compacto a bordo para la versión plenamente funcional del AstroLiner.
- **Criterio de éxito:** se completan repetidos ciclos de aceleración y parada de emergencia sin daños críticos; se confirma la eficacia de la recuperación de energía; la lanzadera de vuelo y el reactor están listos para su integración final.

6.1.5. Fase 4: ampliación de longitud y entrada en servicio (10–15 años)

- **Objetivo:** terminar la primera línea, integrar la lanzadera y alcanzar la velocidad de servicio.
- **Actuaciones principales**
 1. Ampliación gradual del túnel acelerador hasta su longitud de proyecto de 2.050 km mediante el trabajo paralelo de numerosas tuneladoras.
 2. Extensión de la infraestructura geotérmica y de los acumuladores de impulsos a lo largo de todo el trazado.
 3. Construcción del complejo final del portal atmosférico de gran altitud en el monte Mohi.
 4. Integración de los sistemas de a bordo de la lanzadera y realización de ensayos en tierra y a baja velocidad dentro del túnel.

5. Lanzamientos escalonados con aumento gradual de la velocidad y la masa hasta alcanzar los parámetros de diseño de 15.000 t y ~11 km/s.

- **Criterio de éxito:** el primer lanzamiento hipersónico de la lanzadera coloca una carga en la órbita objetivo; se alcanza la cadencia prevista de uno o dos lanzamientos al mes.

6.1.6. Fase 5: ampliación y explotación industrial (continua)

- **Objetivo:** convertir StarRoad en una infraestructura mundial en crecimiento continuo.
- **Actuaciones principales**
 1. Explotación de la primera línea y perfeccionamiento de los ciclos logísticos: carga, mantenimiento y retorno.
 2. Inicio de la segunda línea y de las siguientes líneas paralelas para aumentar el flujo de carga.
 3. Implantación de astilleros orbitales y plantas de procesamiento a partir de los centros industriales del proyecto.
 4. Desarrollo de una red de ramales: aceleradores más cortos para personas y cargas especiales.
- **Criterio de éxito:** el coste de entrega baja de 10 USD/kg; hay lanzamientos diarios; existe un plan aprobado para las siguientes líneas principales y su construcción ya ha comenzado.

6.2. Centros industriales

- **Complejo costero, en la desembocadura del Nyanga, Gabón:** construcción de lanzaderas, fabricación de módulos para los tramos iniciales del túnel y principal puerto base y de mantenimiento de las lanzaderas.
- **Complejo de montaña, en el monte Mohi y la meseta meridional de la República Democrática del Congo:** producción de módulos para los tramos de alta velocidad y la curva S final, y montaje y mantenimiento del mecanismo del portal. El emplazamiento alberga tres líneas independientes de electrólisis y almacenamiento de hidrógeno; incluso en emergencia, cada una puede abastecer los tres anillos de motores de la barrera gasodinámica. La electrólisis se alimenta con fuentes locales —sistema geotérmico autónomo, hidráulica, solar y nuclear— integradas en la red del proyecto.

6.3. Plazo general

El proyecto requiere numerosas tecnologías y soluciones avanzadas, pero actualmente viables, además del trabajo paralelo de muchas tuneladoras, el despliegue de infraestructura y dos centros de fabricación. Por ello, el primer túnel necesitará aproximadamente 25–40 años desde el comienzo de la fase 0 hasta el primer lanzamiento comercial de la fase 4. El plazo es comparable al de otros proyectos de megaciencia, como ITER y LIGO. En estas condiciones, la velocidad depende ante todo de la financiación y de los acuerdos diplomáticos y jurídicos, no de la viabilidad técnica fundamental. Es un objetivo ambicioso, pero alcanzable para un consorcio mundial.

7. Problemas y tareas abordados

7.1. Sobrecalentamiento global

Trasladar la industria intensiva en energía al espacio para reducir la contaminación térmica y la presión sobre la biosfera terrestre.

7.2. Tarea económica

Reducir radicalmente el coste de acceso al espacio para que la energía solar, los asteroides, los recursos lunares y, con el tiempo, los recursos planetarios sean económicamente viables.

7.3. Objetivo estratégico

Crear un sistema de elevación resiliente e independiente del clima, capaz de sostener tanto la industrialización orbital como la defensa planetaria.

7.4. Catalizador tecnológico

El proyecto impulsará avances en potencia pulsada, superconductividad, tecnologías hipersónicas, propulsión nuclear y construcción robótica de túneles.

7.5. Autonomía energética y térmica

El sistema geotérmico resuelve ambas necesidades. Genera hasta unos 15 GW de potencia eléctrica continua, cubre totalmente el acelerador y crea excedente comercial, a la vez que mantiene un entorno frío previsible alrededor del túnel principal. Esto permite construir y operar en estratos profundos y geotérmicamente activos, sin depender de generación externa vulnerable ni del clima imprevisible.

7.6. Huella de carbono

StarRoad adopta un modelo de contribución ambiental activa. El proyecto sería el mayor consumidor estacionario de CO₂ atmosférico del mundo: en estado supercrítico, el gas permanece como fluido de trabajo en el circuito geotérmico cerrado. Millones de toneladas salen del ciclo atmosférico y quedan confinadas en el circuito industrial durante siglos. StarRoad se convierte así en una potente herramienta de ingeniería climática capaz de compensar las emisiones de carbono de sectores industriales enteros.

7.7. Potencial social y ambiental del Canal Troncal Hidrotermal

El canal hidrotermal troncal no solo forma parte de la refrigeración geotérmica: también es una infraestructura transcontinental de doble uso que beneficia a la región:

- **riego: compuertas** de derivación permiten usar el agua en terrenos agrícolas del corredor y transformar zonas áridas en un «cinturón verde» africano;
- **reposición natural:** las frecuentes lluvias ecuatoriales llenan automáticamente el canal;
- **Tratamiento térmico del agua.** Tras calentarse a +60°C en los intercambiadores geotérmicos, queda prácticamente pasteurizada y sirve para riego seguro, uso industrial y, después de filtrarla, necesidades domésticas y agua potable.
- **flujo gravitatorio:** la pendiente natural, desde 3400 m en el este hasta 0 m en el oeste, mueve el agua sin bombas y proporciona circulación gratuita;
- **microcentrales** hidroeléctricas: el desnivel permite instalar una cascada de pequeñas centrales que suministren energía renovable adicional a las redes locales y al propio sistema.

StarRoad pasa a ser así no solo una plataforma de transporte, sino también agroenergética, integrada en el desarrollo sostenible de la región.

7.8. Red energética

El sistema geotérmico autónomo y su red de centrales suministran energía «verde» excedentaria tanto al acelerador como a ciudades, industrias y explotaciones agrícolas próximas.

7.9. StarRoad como arteria económica

StarRoad como arteria económica. Por una parte, StarRoad se convierte en un portal planetario de carga para desarrollar el Sistema Solar; por otra, se convierte en la principal arteria económica de África y en un catalizador de la industrialización, la independencia energética y la seguridad alimentaria. La ruta no es una obra aislada que discurre bajo tierra hacia ninguna parte. Su infraestructura superficial —40 terminales, dos centros industriales en Gabón y la República Democrática del Congo, un canal hidrotermal troncal y una red de carreteras— forma un eje lineal de desarrollo sostenible que cruza África Central de oeste a este. A lo largo de los 2.050 km de la ruta surge un paisaje singular en el que se alternan áreas ecológicas, tecnológicas y agrícolas. Este eje lineal se convierte en una zona económica autosuficiente donde:

- se genera energía geotérmica, microhidroeléctrica y solar;
- se producen alimentos mediante agricultura de regadío;
- se fabrican bienes industriales, incluidos componentes de lanzaderas, módulos de túnel y equipos;
- la carga circula por carretera y ferrocarril;

- funciona un puerto espacial compuesto por el complejo de lanzamiento y el portal atmosférico;
- se elimina CO₂ de la atmósfera en plantas de captura directa del aire.

7.10. Seguridad de infraestructuras críticas

El proyecto incorpora desde el inicio medidas para operar con grandes cantidades de hidrógeno, velocidades hipersónicas y energías de gigavatios. La protección pasiva se combina con vigilancia activa y respuesta automática, creando un nuevo estándar para grandes instalaciones energéticas y sistemas de hidrógeno.

7.11. Selección y escalabilidad del emplazamiento

El portal requiere un lugar que satisfaga decenas de condiciones contrapuestas: altitud, logística, seguridad, capacidad de ampliación y derecho. El monte Mohi y su meseta permiten comenzar con una instalación compacta de altura y crecer hasta el mayor puerto espacial del mundo sin cambiar de ubicación.

7.12. Coordinación política y jurídica de un proyecto transcontinental

El paso de la ruta por tres países se resuelve mediante un consorcio internacional inspirado en megaproyectos como el CERN e ITER. La infraestructura subterránea y los activos energéticos del sistema geotérmico autónomo de energía térmica reciben un estatuto jurídico especial, y los beneficios se reparten claramente entre los participantes. El proyecto no es una carga que presupone estabilidad política; mediante la interdependencia y el acceso privilegiado al futuro y a las tecnologías desarrolladas durante la construcción, se convierte en un instrumento valioso por sí mismo para crear y mantener la estabilidad.

7.13. Crecimiento evolutivo del flujo de carga

La frecuencia de lanzamiento crece al mismo ritmo que la industria orbital. Una fase pionera de 1 lanzamiento al mes crea astilleros orbitales; una fase industrial de 1–3 lanzamientos por semana construye activos; y una fase madura de lanzamientos diarios sostiene el crecimiento exponencial de la economía espacial.

8. Mercados y logística orbital

Esta sección responde a la pregunta central sobre la viabilidad económica de StarRoad: qué puede lanzarse en volúmenes suficientes para aprovechar un corredor de lanzamiento superpesado. StarRoad no debe entenderse como un sistema para unas pocas misiones excepcionales. Su objetivo es un flujo de carga masivo, regular e industrializado entre la Tierra y las órbitas altas.

El principal mercado inicial de StarRoad no son las constelaciones de satélites en órbita terrestre baja ni las naves científicas individuales, sino la energía orbital a gran escala, la infraestructura informática, la logística interorbital, los asentamientos orbitales, los astilleros y las industrias extraterrestres posteriores.

8.1. El problema de la demanda de lanzamientos superpesados

La economía de los cohetes convencionales no está limitada solo por el coste por kilogramo, sino también por la propia naturaleza del lanzamiento: los cohetes entregan la carga en pequeños lotes separados, con una elevada proporción de masa auxiliar, un montaje orbital complejo y muchas operaciones individuales. Por eso, incluso cuando bajan los precios de lanzamiento, el transporte en cohete sigue siendo una logística de expedición.

StarRoad crea un mercado de otra naturaleza. Su finalidad no consiste únicamente en lanzar más barato las cargas actuales, sino en hacer posibles cargas que nunca llegarían a ser rentables con una logística basada en cohetes.

Entre esas cargas se encuentran:

- centrales solares espaciales de escala gigavatio completas o casi completas;
- grandes centros de datos orbitales;
- módulos de transmisión de energía por microondas;
- grandes celosías, radiadores, espejos y paneles;
- astilleros orbitales y líneas de montaje automatizadas;
- módulos residenciales e industriales para EML4/5;

- remolcadores y transportes interorbitales;
- módulos de propelente, energía y servicio;
- componentes de futuras infraestructuras asteroidales e interplanetarias.

Por tanto, StarRoad no depende del mercado actual de lanzamientos espaciales. Crea un mercado nuevo, igual que los ferrocarriles, el transporte de contenedores y las redes eléctricas no se limitaron a atender la demanda existente, sino que generaron nuevas economías a su alrededor.

8.2. Mercado inicial: energía solar espacial y centros de datos orbitales

En la primera etapa, la principal carga comercial y estratégica de StarRoad deberían ser las centrales solares espaciales de escala gigavatio. Son grandes plataformas energéticas, autodesplegables o parcialmente autodesplegables, que AstroLiner-S lleva directamente a sus órbitas o lugares de funcionamiento.

Las centrales solares espaciales satisfacen varias necesidades a la vez:

- crean una demanda masiva y repetible de lanzamientos superpesados;
- forman un mercado energético independiente del ciclo día-noche y de la mayoría de las condiciones meteorológicas;
- permiten instalar fuera de la superficie terrestre una parte considerable de la nueva capacidad de generación;
- proporcionan la base energética para la industria orbital;
- crean una justificación económica para construir logística orbital, astilleros y asentamientos de servicio.

La constante solar en la órbita terrestre es de unos **1.361,6 W/m²**. Por tanto, un gigavatio de radiación solar incidente corresponde a unos 0,74 km² de superficie colectora perfectamente orientada. Con una eficiencia fotovoltaica del 25–35 %, las pérdidas de conversión y transmisión, los huecos estructurales, los radiadores, la electrónica de potencia, la redundancia y la degradación, la superficie colectora real necesaria para obtener 1 GW de electricidad útil alcanza varios kilómetros cuadrados. Es una extensión enorme según los criterios de las naves convencionales, pero natural para StarRoad, donde la masa, la superficie y las dimensiones estructurales dejan de ser la principal limitación.

8.2.1. Referencias de masa para centrales solares espaciales de escala gigavatio

Una central de escala gigavatio no es un satélite pequeño. Incluso las arquitecturas actuales más optimistas sitúan la masa de una central de 2 GW en varios miles de toneladas. Los conceptos más ligeros, como CASSIOPeiA, se estiman en unas 2.000 t, mientras que estudios más conservadores de la NASA dan 5.900–10.000 t para un sistema equivalente de 2 GW.

Proyecto / estudio	Potencia	Masa	Pertinencia para StarRoad
CASSIOPeiA / Space Energy Initiative / Frazer-Nash	hasta 2 GW entregados a la red	≈2.000 t	La referencia más pertinente para StarRoad: GEO/GSO, un factor de generación del 99,7 %, una arquitectura de 1 satélite por 1 antena rectificadora (rectena) y, en el mejor caso, una potencia específica cercana a 1 MW/t.
NASA 2024 RD1 / Innovative Heliostat Swarm	2 GW entregados a la red	≈5.900 t	Una estimación más conservadora. La NASA normaliza el sistema a 2 GW entregados a la red; RD1 tiene unos 11,5 km² de paneles solares.
NASA 2024 RD2 / Mature Planar Array	2 GW entregados a la red, pero mediante varios sistemas	≈10.000 t	La NASA indica una masa de unos 10 millones de kg y una superficie de paneles solares de alrededor de 19 km². Como RD2 genera durante menos tiempo, se necesitan cinco sistemas RD2 para obtener aproximadamente el mismo resultado energético que un RD1.
JAXA / Sasaki Tethered-SPS	0,75 GW de media / 1,2 GW como máximo	≈20.000 t por sistema	Una referencia pesada. Una extrapolación aproximada a 2 GW de potencia media da unas 50.000 t o más, por lo que se necesitaría una serie de vuelos y montaje orbital, no un único lanzamiento.
Caltech SSPP / módulo ligero en mosaico	no una central completa de 2 GW, sino una unidad tecnológica	solo la capa activa pesaría teóricamente ≈1.700–3.400 t para entregar 2 GW en tierra	Con 160 g/m² y una eficiencia de extremo a extremo del 7–14 %, esta estimación solo cubre la capa activa. Una central completa también necesita estructura, transmisión de energía, control de actitud, radiadores, cableado, electrónica, medios de mantenimiento y reservas.

La tabla lleva a una conclusión fundamental: **una central solar espacial de 2 GW y 2.000–10.000 t encaja casi exactamente en el ámbito de AstroLiner**. Para StarRoad supone un lanzamiento superpesado o un número reducido de vuelos con un montaje orbital mínimo. La logística mediante cohetes exigiría decenas o centenares de lanzamientos de cohetes superpesados, cadenas de repostaje, montaje orbital, remolque hasta GEO o EML y un fuerte aumento de la complejidad operativa.

8.2.2. Producción energética de una central solar espacial de 2 GW

Con los siguientes supuestos de referencia:

- potencia entregada a la red: **2 GW**;
- disponibilidad / factor de generación: **99,7 %**;
- vida útil de diseño: **30 años**;

una central produce:

- ≈17,47 TWh al año**;
- ≈524 TWh en 30 años**.

Esto hace que el coste de transporte por kilogramo sea un factor fundamental. En la logística mediante cohetes, el lanzamiento sigue siendo la principal barrera. Con StarRoad, el componente de transporte se reduce rápidamente hasta representar una pequeña parte del precio futuro de la energía.

8.2.3. Componente de transporte del coste de la energía solar espacial

El cálculo siguiente abarca **únicamente el componente de transporte del** coste nivelado de la energía: el coste de entregar la masa de la central dividido por toda la energía que producirá durante sus 30 años de vida. Excluye la fabricación de la central, la rectena, el mantenimiento, el seguro, la sustitución de módulos, la infraestructura terrestre y el beneficio del operador.

Fórmula:

Componente de transporte del LCOE = masa de la central × coste de entrega / producción energética durante la vida útil

Para una central de 2 GW, con una disponibilidad del 99,7 % y una vida de 30 años, la producción total es de aproximadamente **524.000 millones de kWh**.

Etapas / sistema de transporte	Coste de entrega	Central similar a CASSIOPeiA, 2.000 t, €/kWh	NASA RD1, 5.900 t, €/kWh	NASA RD2, 10.000 t, €/kWh
Logística actual mediante cohetes, referencia inferior hacia GTO	3.600–5.600 \$/kg	1,37–2,14	4,05–6,31	6,87–10,69
StarRoad, años 1–2	80–120 \$/kg	0,0305–0,0458	0,0901–0,1351	0,1527–0,2290
StarRoad, años 3–5	30–50 \$/kg	0,0114–0,0191	0,0338–0,0563	0,0572–0,0954
StarRoad, años 6–10	10–20 \$/kg	0,0038–0,0076	0,0113–0,0225	0,0191–0,0382
StarRoad, años 11–15	3–8 \$/kg	0,0011–0,0031	0,0034–0,0090	0,0057–0,0153
StarRoad, años 16–25	0,8–3 \$/kg	0,0003–0,0011	0,0009–0,0034	0,0015–0,0057
StarRoad, a partir del año 26	0,3–1 \$/kg	0,0001–0,0004	0,0003–0,0011	0,0006–0,0019

Como comparación, el LCOE de las nuevas instalaciones terrestres modernas es de varios centavos por kWh: unos 3–4 ¢/kWh para la eólica terrestre, 4–5 ¢/kWh para la solar fotovoltaica a gran escala y 5–6 ¢/kWh para la hidroeléctrica. Las estimaciones de la NASA para las alternativas terrestres en 2050 rondan los 2–5 ¢/kWh.

De ello se desprende una conclusión importante: incluso durante el periodo piloto, el componente de transporte de la energía solar espacial con StarRoad es un orden de magnitud inferior al LCOE de la generación terrestre; en las etapas maduras prácticamente desaparece como factor principal del precio. Esto no significa que el coste total de la energía solar espacial vaya a ser de milésimas de centavo. Siguen existiendo la fabricación de la central y la rectena, el mantenimiento, la electrónica, los radiadores, la sustitución de módulos, los seguros y el beneficio de explotación. Significa que StarRoad elimina la barrera concreta que hace que la energía solar espacial resulte económicamente gravosa con una logística de cohetes.

En los escenarios actuales con cohetes, la situación completa es peor que la simple cifra de 3.600–5.600 \$/kg. Una gran central no solo debe ponerse en órbita, sino también trasladarse hasta su punto de operación, montarse y recibir mantenimiento; además, hay que repostar los remolcadores y conservar la infraestructura. Por ello, la NASA estima un LCOE de **referencia** de unos 61 ¢/kWh para **RD1** y **159 ¢/kWh** para RD2, muy por encima de las alternativas terrestres. StarRoad no se limita a reducir el coste de lanzamiento: cambia la naturaleza del problema al sustituir miles de operaciones con cohetes por uno o varios vuelos de infraestructura superpesados.

8.2.4. Los centros de datos orbitales como segundo mercado inicial

Los centros de datos orbitales podrían constituir el segundo mercado inicial. El crecimiento de la inteligencia artificial, la computación en la nube y la infraestructura digital está convirtiendo a los centros de datos en un componente importante de la demanda energética mundial. La AIE calcula que ya consumen cientos de TWh al año y que podrían acercarse a unos 1.000 TWh anuales durante la próxima década.

Situar parte de la infraestructura informática cerca de las centrales solares espaciales ofrece varias ventajas:

- acceso directo a una generación orbital continua;
- menor demanda sobre las redes eléctricas terrestres;
- posibilidad de construir grandes campos de radiadores en el vacío;
- menor dependencia de las limitaciones locales de terreno, agua y capacidad de red;
- infraestructura energética, de comunicaciones y de mantenimiento compartida con las centrales solares.

Durante la etapa inicial, las centrales orbitales y los centros de datos pueden lanzarse como plataformas separadas o como complejos combinados de energía y computación, integrados por una central solar, electrónica de potencia, radiadores, un módulo de cálculo, antenas de comunicaciones y un circuito de transmisión por microondas.

8.3. Lógica climática e industrial de la energía solar espacial

Las centrales solares espaciales no deben presentarse solo como tecnología «verde». Su función es más amplia: sustituyen generación basada en carbono no mediante pérdida de comodidad y límites forzosos al consumo, sino creando un sistema energético más potente.

La política climática clásica suele percibirse como una exigencia de renunciar a comodidad para reducir emisiones. StarRoad propone otra vía: no reducir la capacidad de la civilización, sino trasladar al espacio la mayor parte de la nueva generación y aumentar la energía disponible sin elevar la huella de carbono eléctrica.

En este modelo los hidrocarburos no tienen que desaparecer como recurso industrial. Es más racional retirarlos gradualmente de la generación masiva de electricidad y calor y destinarlos a química, materiales, compuestos de carbono, productos sintéticos y cadenas donde el carbono sea materia prima, no combustible.

Para la actual industria energética del carbono esto no es solo una amenaza, sino una ruta de transición. Empresas, estados y fondos ligados al petróleo, gas y carbón pueden obtener prioridad para invertir en energía solar espacial, energía orbital, química de hidrocarburos y materiales de carbono. StarRoad se convierte así en un mecanismo de conversión ordenada, no solo en competidor de la energía tradicional.

8.3.1. Escala de sustitución energética

Un gigavatio de potencia eléctrica continua produce unos **8,76 TWh al año**. Una central solar espacial de 2 GW y disponibilidad del 99,7% produce cerca de **17,47 TWh anuales**.

Por tanto:

- 100 GW de generación orbital producen unos **876 TWh/año**;
- 1 TW produce unos **8.760 TWh/año**;
- 3 TW producen unos **26.280 TWh/año**, una cifra comparable al consumo eléctrico mundial actual.

La generación eléctrica mundial de 2024 **fue de unos 30.800 TWh**, con unos 18.200 TWh de origen fósil. **La escala queda clara**: sustituir siquiera una parte requiere cientos o miles de gigavatios nuevos de generación estable, no decenas.

8.3.2. Posible ritmo de sustitución si StarRoad transporta centrales solares espaciales

La tabla ofrece un máximo técnico: qué ocurriría si una parte importante de los lanzamientos instalara una central de 2 GW conectada a la red por viaje. No es pronóstico ni promesa; solo estima un ritmo posible si existen producción en serie, rectenas, conexión a red, aceptación política y jurídica, financiación, mantenimiento y mercados capaces de absorber la energía.

Periodo operativo de StarRoad	Lanzamientos anuales según el modelo económico	Nueva potencia solar espacial por año	Nueva generación anual tras el despliegue	Proporción de la generación fósil en 2024, ≈18.200 TWh/año	Proporción de toda la generación eléctrica mundial en 2024, ≈30.800 TWh/año
Años 1–2	12–24	24–48 GW/año	210–419 TWh/año	1,2–2,3%	0,7–1,4%
Años 3–5	50–100	100–200 GW/año	873–1.747 TWh/año	4,8–9,6%	2,8–5,7%
Años 6–10	200–300	400–600 GW/año	3.493–5.240 TWh/año	19–29%	11–17%
Años 11–15	500–700	1.000–1.400 GW/año	8.734–12.227 TWh/año	48–67%	28–40%
Años 16–25	1000+	2.000+ GW/año	17.467+ TWh/año	96%+	57%+
Años 26+	1500+	3.000+ GW/año	26.201+ TWh/año	144%+	85%+

La tabla muestra por qué la energía solar espacial es un mercado primario natural para StarRoad. Con una central de 2 GW por viaje, incluso la fase inicial crea un flujo energético importante; la fase madura se convierte en una herramienta planetaria.

No debe leerse como calendario garantizado de descarbonización. La sustitución real estará limitada no solo por la capacidad de lanzamiento de StarRoad, sino por:

- el ritmo de producción de centrales solares espaciales;
- la fabricación de electrónica de potencia, radiadores, estructuras, transmisores de microondas y control;
- la construcción de rectenas terrestres;
- la capacidad de las redes eléctricas;
- la autorización política de la transmisión energética por microondas;
- el reparto internacional de beneficios y riesgos;
- los seguros y la regulación de la energía orbital;
- el mantenimiento, reparación y retirada de las centrales;
- la competencia de la energía solar terrestre, eólica, nuclear, hidroeléctrica y geotérmica.

La formulación correcta es esta: **StarRoad hace técnicamente posible un ritmo de sustitución comparable a la escala de la electricidad fósil mundial, pero la velocidad real depende de la fabricación, las redes, las rectenas, la política y el mercado.**

8.3.3. Conversión industrial de la energía basada en carbono

Si la fabricación sigue el ritmo de lanzamientos, en una o dos décadas puede crearse energía orbital de escala teravatio. No elimina por completo la energía terrestre, pero cambia su función: redes, centrales nucleares e hidroeléctricas, renovables, geotermia y almacenamiento forman un sistema híbrido donde la generación orbital cubre la carga base, industrial y de exportación.

En este escenario la energía basada en carbono no se limita a «perder». Obtiene una vía de conversión:

- las centrales de carbón y gas abandonan gradualmente la generación base;
- parte de la infraestructura de gas pasa a reserva, química y productos sintéticos;
- las petroleras y gasistas invierten en energía solar espacial, rectenas, química de hidrocarburos y materiales de carbono;
- la industria del carbón se orienta a compuestos de carbono, agentes reductores, materias químicas y materiales;
- algunas empresas energéticas tradicionales pasan a operar generación orbital, rectenas y distribución eléctrica.

El sentido político y económico no es exigir a sectores poderosos que se destruyan de inmediato, sino ofrecerles una transición. Si la industria del carbono puede mantener o elevar sus márgenes participando en la energía solar espacial y la química, la resistencia puede disminuir mucho.

8.3.4. En qué se diferencia de la agenda «verde» habitual

StarRoad propone expansión energética, no austeridad. Su lógica climática no reduce la capacidad civilizatoria, sino que la traslada a una infraestructura más sostenible.

Es distinto de los enfoques percibidos como «vivir peor por el clima». La energía solar espacial unida a StarRoad permite otro futuro:

- más energía, no menos;
- menos emisiones, no menos industria;
- más capacidad informática disponible, no límites a la economía digital;
- más electrificación del transporte, la producción y la vida cotidiana;
- más oportunidades para las regiones en desarrollo;
- menos dependencia de los fósiles como combustible, conservando el carbono como materia prima industrial.

Este enfoque encaja mejor con la lógica civilizatoria de StarRoad: no pide que la humanidad se reduzca, sino que crea infraestructura para crecer sin la antigua huella de carbono.

8.3.5. Conclusión: la energía solar espacial como mercado primario

Las centrales solares espaciales de clase gigawatt no son una aplicación secundaria, sino una de las bases de la necesidad económica de StarRoad.

A la vez:

- crean demanda masiva de lanzamientos superpesados;
- aportan ingresos comerciales claros mediante la venta de energía;
- alimentan la futura industria orbital;
- impulsan rectenas, repetidores, remolcadores, astilleros y asentamientos de servicio;
- ofrecen a la industria del carbono un nuevo nicho de inversión;
- proporcionan un mecanismo real de acción climática a escala planetaria.

Con logística de cohetes, estas centrales siguen siendo demasiado pesadas, caras y complejas. Con StarRoad se convierten en carga natural de serie: no una «misión excepcional», sino un producto energético de una gran industria de infraestructuras.

8.4. Emplazamientos orbitales: GEO y EML4/5

Los principales emplazamientos de las centrales solares espaciales y su infraestructura asociada son la órbita geoestacionaria y los puntos de Lagrange Tierra–Luna EML4/5.

La órbita geoestacionaria es adecuada para transmitir energía a regiones fijas de la Tierra. Un satélite o una plataforma energética en GEO mantiene una posición casi constante respecto a la superficie, lo que simplifica la orientación del haz de microondas, la ubicación de las rectenas terrestres y la integración con las redes regionales. La altitud geoestacionaria es de unos 35.800 km sobre el ecuador.

EML4 y EML5 son apropiados para grandes asentamientos, astilleros, nodos industriales y grupos energéticos. Se encuentran en los vértices de triángulos equiláteros del sistema Tierra–Luna y tienen mayor estabilidad a largo plazo que los puntos colineales L1/L2. Esto es importante para la industria de masas: allí pueden instalarse grandes centrales, almacenes, astilleros, celosías de montaje y complejos residenciales sin gastar continuamente grandes cantidades de propelente en mantener la posición.

El uso de GEO y EML4/5 también reduce los conflictos con la órbita terrestre baja. Las centrales solares y otras grandes plataformas no tienen que desplegar enormes conjuntos en LEO, donde causarían contaminación lumínica, riesgos de

colisión, resistencia de la atmósfera residual e interferencias con la astronomía. La órbita baja se mantiene como zona de servicio para el descenso de cápsulas, operaciones intermedias, inspecciones y tareas específicas de baja órbita.

8.5. Etapa inicial: vuelos directos de AstroLiner-S

La etapa inicial utiliza AstroLiner-S, la variante inicial de la lanzadera, simplificada y de menor riesgo. No lleva ninguna fuente de energía nuclear o de fusión y emplea propulsión química para la inserción final, las correcciones, la salida de órbita y el regreso.

El objetivo principal de la etapa inicial es crear un flujo de carga primario sin esperar a que madure toda la infraestructura orbital. Por ello, AstroLiner-S debe poder entregar directamente grandes módulos:

- a la órbita geoestacionaria para instalar centrales solares y relés energéticos;
- a los grupos energéticos de EML4/5;
- a órbitas de alta energía para desplegar centrales solares y centros de datos.

En esta etapa, las cargas son principalmente estructuras completas o casi completas:

- centrales solares espaciales autodesplegables;
- módulos de transmisión de energía;
- grandes paneles radiadores;
- bloques de cálculo para centros de datos;
- estructuras de celosía;
- robots de montaje;
- primeras estaciones de servicio;
- reservas de propelentes y fluidos de trabajo;
- módulos de comunicaciones, navegación y control del tráfico.

Ventajas de EML4/5 y GEO frente a LEO:

- No hay problemas de contaminación lumínica por satélites en órbita baja.
- Iluminación casi continua para las centrales solares, sin un ciclo día-noche regular.
- Posición estable respecto a la Tierra y la Luna.

Cifras clave de la etapa:

- Frecuencia de lanzamiento: 1–2 al mes, o 12–24 al año.
- Carga útil por vuelo: 10.000 t.
- Flujo anual de carga: 120.000–240.000 t.
- Coste de entrega: 80–120 \$/kg.
- Órbitas objetivo: EML4/5 y GEO.

Este enfoque evita la trampa de construir toda la infraestructura espacial antes de empezar a obtener ingresos. Las primeras cargas comerciales son, ellas mismas, componentes de la infraestructura futura.

8.6. Etapa madura: relés de microondas e infraestructura de servicio

La etapa madura comienza cuando el número de centrales, centros de datos y grandes plataformas basta para mantener una red orbital en funcionamiento continuo. Entonces la tarea se amplía: además de lanzar nuevas instalaciones, hay que prestar servicio a las ya desplegadas.

Elementos principales de la etapa madura:

- una red de relés de microondas en GEO;
- nodos de servicio permanentes cerca de los principales grupos energéticos;
- naves de reparación e inspección;

- estaciones de almacenamiento;
- remolcadores orbitales;
- los primeros asentamientos permanentes y tripulaciones rotatorias en EML4/5;
- astilleros automáticos y semiautomáticos;
- un centro de transporte en EML1.

Los relés de microondas permiten distribuir la energía con mayor flexibilidad entre distintas regiones terrestres, reducir la dependencia de la geometría directa entre la central y la rectena y construir una red energética en lugar de un conjunto de centrales orbitales aisladas. En tierra, el sistema debe incluir rectenas receptoras, subestaciones de conversión, almacenamiento intermedio y conexiones a las redes eléctricas regionales.

El mantenimiento permanente prolonga la vida de las centrales solares. Esto es fundamental: sin mantenimiento, su economía queda limitada por la vida de cada módulo. Si los paneles, transmisores, radiadores, equipos electrónicos y celosías pueden sustituirse en órbita, las centrales se convierten en instalaciones energéticas mantenibles, no en satélites desechables.

8.7. División del transporte según el entorno operativo

La logística madura de StarRoad separa las funciones de transporte según el entorno en el que operan, en vez de depender de una única nave universal.

AstroLiner se ocupa del transporte de la Tierra a la órbita y de la órbita a la Tierra. Es un vehículo orbital de transporte pesado, un planeador de regreso y un portacontenedores pesado, pero no debe convertirse en una nave interplanetaria universal.

Los transportes interorbitales operan exclusivamente en el espacio. No entran en una atmósfera y, por tanto, no llevan escudo térmico de aterrizaje, alas, sistemas marítimos ni casco reforzado para amerizar. Su masa en seco es menor y su vida útil más larga porque están optimizados para viajar entre nodos orbitales.

Cápsulas especializadas descienden a los planetas y llevan personas o carga hasta la superficie. No deben formar parte del casco principal de AstroLiner: hacer bajar miles de toneladas solo para entregar a un pequeño grupo de personas o una carga reducida sería irracional.

La jerarquía del transporte es:

Entorno	Vehículo principal	Función
Tierra → órbita	AstroLiner / AstroLiner-S	transporte superpesado de carga y módulos
Órbitas altas y puntos de Lagrange	transportes y remolcadores interorbitales	transporte entre LEO, GEO y EML1/2/4/5
Órbita → superficie	cápsulas de pasajeros y de carga	descenso de personas y carga
Nodos orbitales	estaciones, almacenes y astilleros	almacenamiento, montaje, reparación y transferencia

Esta división reduce la masa en seco de cada clase de vehículo, limita los compromisos y hace que la logística espacial se parezca más al transporte marítimo, con portacontenedores, remolcadores, puertos, almacenes, astilleros y embarcaciones especializadas.

8.8. Papel de AstroLiner en la logística madura

AstroLiner no es una nave universal. Su función principal es actuar como vehículo superpesado de elevación orbital que opera por ciclos y como medio de regreso reutilizable.

Transporta hacia arriba:

- contenedores de carga;
- módulos de pasajeros;
- módulos de propelente;
- componentes de construcción;
- paneles, celosías, cables y radiadores;

- remolcadores interorbitales, montados o por piezas;
- cápsulas de descenso;
- módulos de estaciones orbitales;
- componentes de centrales y centros de datos.

Regresa principalmente vacío o con una carga de retorno limitada:

- tripulación;
- muestras;
- conjuntos caros y reparables;
- equipos electrónicos retirados;
- componentes averiados o desmontados.

La configuración de regreso debe ser lo más ligera posible. Tras completar la misión, la masa de regreso de AstroLiner debe ser muy inferior a su masa de lanzamiento, porque el planeo, la reentrada atmosférica y el amerizaje seguros exigen una masa residual mínima. Devolver miles de toneladas de carga útil a la Tierra no es una tarea habitual; de ello se encargan cápsulas especializadas o módulos de retorno independientes.

AstroLiner conserva una cantidad limitada de delta-v propio por cuatro motivos:

1. independencia de una infraestructura que todavía no se ha desplegado por completo;
2. capacidad para utilizar rutas alternativas;
3. situaciones de emergencia;
4. flexibilidad durante la fase inicial de operación.

Sin embargo, en un sistema maduro, los remolcadores y transportes especializados proporcionan la mayor parte del delta-v interorbital. Esto reduce las exigencias sobre AstroLiner, prolonga la vida de su casco y acorta el ciclo lanzamiento–descarga–regreso–mantenimiento–nuevo lanzamiento.

8.9. transportes y remolcadores interorbitales

Los transportes interorbitales constituyen la flota espacial permanente de StarRoad. Operan entre LEO, GEO, EML1, EML2, EML4/5 y otros nodos sin entrar en la atmósfera ni regresar a la Tierra.

Sus tareas incluyen:

- llevar módulos desde el punto de descarga de AstroLiner hasta sus órbitas de destino;
- remolcar centrales solares, centros de datos y grandes celosías;
- transportar propelentes y fluidos de trabajo;
- transportar módulos de pasajeros;
- mantener y sustituir componentes de las centrales;
- llevar las cápsulas a órbitas de servicio para el descenso;
- devolver remolcadores vacíos a EML1 o EML4/5;
- prestar apoyo a los astilleros orbitales.

Estas naves pueden utilizar propulsión eléctrica, magnetoplasma dinámica, nuclear-eléctrica, solar-eléctrica o híbrida. Como nunca necesitan entrar en una atmósfera, pueden estar muy especializadas: grandes radiadores, celosías ligeras, depósitos voluminosos de fluido de trabajo, unidades de propulsión reemplazables y facilidad de mantenimiento en astilleros orbitales.

En la arquitectura madura, el transporte interorbital es lo que convierte a StarRoad de un sistema de lanzamiento en una red de transporte espacial.

8.10. Descenso a la Tierra y a otros planetas

El descenso corresponde a cápsulas especializadas, por lo que AstroLiner no tiene que ser un vehículo de reentrada universal para todas las tareas.

Tipos principales:

Cápsula de Pasajeros (PC) — cápsula para personas, diseñada para una entrada segura, emergencias, aterrizaje autónomo e integración con un módulo de pasajeros.

Cápsula de Carga (CCap) — cápsula para carga valiosa, muestras, equipos, material biológico, electrónica y componentes que deben regresar a una superficie.

Cápsula de Retorno Industrial (IRC) — cápsula de carga reforzada para devolver materiales a granel si ese mercado aparece en una etapa posterior.

AstroLiner lleva las cápsulas hasta la órbita. Los remolcadores interorbitales, o el propio AstroLiner durante la fase inicial, las trasladan a una órbita de servicio para el descenso. Tras separarse, cada cápsula entra en la atmósfera y aterriza de forma independiente.

La Luna, Marte, Venus y los asteroides emplean sistemas de aterrizaje distintos y adaptados a cada entorno. Ningún vehículo de descenso universal puede servir a todos los cuerpos del Sistema Solar porque sus atmósferas, gravedad, flujos térmicos, condiciones de polvo y requisitos de despegue son demasiado diferentes.

8.11. Módulos estandarizados

La estandarización es la base de la logística de StarRoad. Del mismo modo que la contenerización marítima cambió el comercio mundial, los módulos orbitales estandarizados deben transformar la economía espacial.

Tipos de módulos básicos:

Módulo de Pasajeros (PM) — módulo presurizado que puede utilizarse en AstroLiner, un transporte interorbital, una estación orbital o una cápsula de pasajeros. Contiene soporte vital, asientos o camarotes, reservas de emergencia, interfaces de acoplamiento y puntos de fijación estándar.

Contenedor de Carga (CC) — contenedor presurizado o no presurizado para paneles, celosías, radiadores, cables, equipos, sistemas robóticos, repuestos y consumibles.

Módulo de Propelente (PrM) — módulo que almacena propelente, fluido de trabajo, agua, oxígeno, hidrógeno, argón, xenón u otros consumibles para remolcadores y estaciones.

Módulo de Servicios (UM) — módulo de energía, gestión térmica, comunicaciones o control que puede incluir paneles solares, baterías, radiadores, antenas, convertidores, intercambiadores de calor y electrónica de control.

Módulo de Construcción (CM) — módulo que contiene celosías, vigas, secciones de almacén, robots de montaje, sistemas de fijación, cables de amarre, tendidos de cable y estructuras desplegables.

Módulo de Transmisión de Energía (PTM) — módulo con antenas de microondas, matrices en fase, electrónica de potencia y sistemas de orientación y control del haz.

Todos los módulos deben tener estandarizados:

- clases dimensionales;
- interfaces estructurales;
- puntos de agarre robótico;
- interfaces de acoplamiento;
- interfaces eléctricas y térmicas;
- identidad digital e historial de mantenimiento;
- intervalos permitidos de masa y centro de gravedad;
- modos de fijación y separación de emergencia.

Esto permite montar estaciones, naves, centrales y complejos industriales como combinaciones de bloques normalizados, en lugar de diseñarlos como vehículos únicos.

8.12. Jerarquía de la infraestructura orbital

La logística orbital de StarRoad se organiza como una jerarquía de nodos.

Tierra / StarRoad. Fabricación,

montaje, lanzamiento, reparación de AstroLiner, producción de módulos, preparación de propelentes, suministro de energía y control del flujo de carga.

LEO.

Zona de servicio para el descenso de cápsulas, inspecciones, emergencias, operaciones temporales y separación de cápsulas antes de la entrada. En el sistema maduro, LEO no es ni el almacén principal ni un cinturón industrial saturado.

GEO.

Zona para relés de microondas, plataformas energéticas, comunicaciones y transmisión de energía a regiones fijas de la Tierra. GEO es adecuada para integrar la energía orbital con las redes terrestres.

EML1.

Principal centro de transporte del sistema Tierra–Luna. AstroLiner puede llegar directamente para descargar módulos cuando una carga no necesita un vuelo directo hasta su destino final. Aquí se encuentran almacenes, remolcadores, control del tráfico, nodos de reparación y la estación de transferencia del ascensor lunar.

EML1 debe estar muy automatizado. No necesita una gran población residente permanente: las personas pueden permanecer en tubos de lava lunares mejor protegidos, en EML4/5 o a bordo de grandes estaciones y desplazarse a EML1 cuando sea necesario.

EML2.

Zona científica y de observación para observatorios en silencio radioeléctrico, telescopios de espacio profundo, estaciones de ensayo, comunicaciones de espacio profundo e instalaciones científicas en la cara oculta de la Luna y sus proximidades.

EML4 / EML5.

Principales centros de una civilización orbital madura: astilleros, asentamientos, estaciones industriales, grandes centrales, montaje de naves interplanetarias, almacenes, bases de reparación y centros de control para la expansión posterior.

8.13. Astilleros orbitales

Los astilleros orbitales se establecen principalmente en EML4/5. Su finalidad es montar estructuras que no pueden o no deben lanzarse enteras, ni siquiera con StarRoad.

AstroLiner les entrega materiales y estructuras como carga embalada en plano:

- paneles;
- celosías;
- perfiles estructurales;
- cables;
- radiadores;
- espejos;
- membranas;
- depósitos;
- conjuntos portantes;
- sistemas robóticos de montaje.

Los robots y teleoperadores realizan el montaje. Las personas se ocupan del mantenimiento, la supervisión, las reparaciones complejas y las decisiones excepcionales, pero no deben ejecutar manualmente la mayoría de los trabajos peligrosos de montaje.

Los astilleros construyen:

- nuevas centrales solares espaciales;
- grandes campos de radiadores;
- transportes interorbitales;
- naves interplanetarias;
- estaciones residenciales;
- complejos de procesamiento de asteroides;
- componentes de futuras megaestructuras.

En esta etapa, StarRoad deja de ser solo un sistema para lanzar desde la Tierra. Se convierte en el eslabón inferior de una cadena productiva en la que la Tierra aporta componentes complejos y el espacio asume poco a poco el montaje, el mantenimiento y parte de la fabricación.

8.14. Asentamientos orbitales y lunares

Los asentamientos permanentes no surgen como un fin en sí mismos, sino por la necesidad de mantener grandes infraestructuras. Cuando las centrales, astilleros, remolcadores, relés, nodos de producción lunar y plataformas industriales se multiplican, el mantenimiento totalmente remoto deja de ser suficiente.

La forma principal de los grandes asentamientos orbitales es una estación giratoria con gravedad artificial, como un toro de Stanford o un diseño derivado. Estas estaciones se sitúan principalmente en lugares estables y adecuados para el desarrollo a largo plazo, incluidos EML4/5, y funcionan como centros residenciales, de servicio, médicos, de reparación y administrativos de la industria orbital.

El personal permanente de las bases lunares y los asentamientos industriales no debería vivir en la propia Luna, sino en estaciones con gravedad artificial en EML4/5. Esto limita los efectos a largo plazo de la baja gravedad lunar sobre la salud y mantiene al personal cerca de la infraestructura lunar. La Luna funciona entonces principalmente como lugar de trabajo industrial con turnos rotatorios en la superficie.

EML1 se convierte en el centro principal de transferencia y logística del sistema lunar. Concentra almacenes, muelles, remolcadores, módulos de repostaje, instalaciones de reparación y control del tráfico para los flujos entre la Tierra, la Luna, EML4/5 y otras regiones orbitales. Mantener al personal cerca de la Luna simplifica los relevos, la respuesta a emergencias, las reparaciones y el control de la producción lunar frente al envío repetido de tripulaciones desde la Tierra.

Un ascensor lunar que conecte la superficie de la Luna con la región de EML1 es un componente esencial de esta arquitectura. Proporciona un movimiento regular de carga y pasajeros entre la superficie y la infraestructura orbital: regolito, oxígeno, metales, materiales de construcción y módulos industriales ascienden, mientras que equipos, consumibles y tripulaciones de relevo descienden. Ofrece a la industria lunar una conexión permanente con los astilleros orbitales, los asentamientos y la logística interorbital sin continuos lanzamientos de cohetes desde la superficie.

Debido a la baja gravedad lunar, los asentamientos lunares serán principalmente bases industriales protegidas y operadas por turnos rotatorios. Sostendrán complejos mineros, de procesamiento, energéticos y constructivos, equipos automatizados, producción de oxígeno, tratamiento del regolito, montaje de componentes del ascensor lunar y preparación de cargas para EML1.

La protección radiológica de los asentamientos orbitales y lunares utiliza varias capas:

- blindaje pasivo con agua, polietileno, regolito lunar, combustible o reservas técnicas;
- ubicación de las zonas mejor protegidas en las secciones centrales e interiores;
- protección magnética activa para reducir el flujo de partículas cargadas;
- refugios de emergencia para episodios de protones solares.

El agua, el hidrógeno, el polietileno, el combustible y el regolito lunar son a la vez reservas útiles y masa de blindaje. La protección no tiene por qué ser peso muerto si se integra en el ciclo operativo de una estación, una base lunar, un ascensor lunar o un nodo EML1.

8.15. Analogía logística: el espacio como red marítima

Un sistema StarRoad maduro se parece más a la logística marítima que a un programa de lanzamiento.

En esta analogía:

- **AstroLiner** es un portacontenedores superpesado entre la Tierra y la órbita;
- **los remolcadores interorbitales** son remolcadores de maniobra portuaria y remolcadores oceánicos;
- **los transportes interorbitales** son buques de largo recorrido;
- **EML1** es un puerto de tránsito y un centro de distribución;
- **GEO** es una rada energética y de comunicaciones;
- **EML4/5** son puertos industriales, astilleros y ciudades;
- **las cápsulas** son embarcaciones especializadas de desembarco;
- **los módulos PM, CC, PrM, UM, CM y PTM** son contenedores y bloques funcionales.

Este enfoque cambia la propia cultura de los vuelos espaciales. Las misiones únicas dan paso a los horarios, la circulación de contenedores, la reparación, los seguros, las normas, los almacenes, el control del tráfico portuario y el movimiento industrial de mercancías.

8.16. Economía del flujo de carga

StarRoad invierte la regla central de la economía espacial. En la logística mediante cohetes resulta más barato ahorrar kilogramos, porque cada kilogramo es caro. En la logística de StarRoad resulta más barato estandarizar, fabricar en serie y lanzar en grandes lotes.

Esto modifica las decisiones de ingeniería:

- las estructuras pueden ser más resistentes y fáciles de reparar;
- los equipos pueden disponer de mayores márgenes;
- las estaciones pueden diseñarse como instalaciones mantenibles, no como satélites desechables;
- la masa de los radiadores, blindajes y armazones deja de ser una limitación absoluta;
- las grandes plataformas resultan más económicas que muchas naves pequeñas y de corta vida.

El efecto económico clave es que StarRoad crea un mercado de instalaciones orbitales, no solo un mercado de lanzamientos. Los ingresos pueden proceder no solo de la entrega de carga, sino también de la fabricación, propiedad y explotación de centrales, centros de datos, relés, remolcadores, astilleros y redes energéticas.

Entre los posibles modelos comerciales se encuentran:

- venta de lanzamientos a clientes externos;
- contratos a largo plazo para infraestructuras energéticas;
- propiedad y explotación de centrales solares espaciales;
- empresas conjuntas con compañías energéticas;
- alquiler de capacidad en centros de datos orbitales;
- venta de energía mediante rectenas terrestres;
- contratos de servicio para instalaciones orbitales;
- tarifas logísticas por transporte interorbital;
- seguros, reparación y prolongación de la vida de las estaciones.

Este enfoque reduce la dependencia de un único mercado. Si la demanda externa de lanzamientos es insuficiente, StarRoad crea su propio flujo de carga mediante programas energéticos y de industria orbital.

8.17. Etapas de desarrollo del mercado y la logística

El desarrollo de la demanda y la logística orbital avanza en cuatro etapas.

I. Etapa básica (10–20 años): flujo energético. AstroLiner-S lanza

centrales solares espaciales completas o casi completas, centros de datos, repetidores, módulos de servicio y los primeros remolcadores. El objetivo principal es demostrar la regularidad de los lanzamientos, crear las primeras instalaciones energéticas comerciales y formar un mercado de generación orbital.

II. Etapa madura (20–50 años): red de servicios orbitales. Aparecen

repetidores GEO, un nodo EML1, estaciones de servicio, vehículos de reparación, remolcadores y los primeros asentamientos permanentes y astilleros en EML4/5. AstroLiner pasa gradualmente de volar directamente a cada destino a actuar como elevador pesado que descarga en los nodos de la red.

III. Etapa industrial (50–100 años): fabricación fuera de la Tierra.

Comienza la construcción activa de naves interplanetarias, complejos de procesamiento de asteroides y grandes hábitats orbitales. El sistema utiliza cada vez más materiales extraterrestres y reduce su dependencia del envío de materias primas masivas desde la Tierra.

IV. Etapa evolutiva y potencial (más de 100 años): infraestructura del Sistema Solar. EML4/5

se convierten en puntos de partida para la expansión por el Sistema Solar y la construcción de megaestructuras, enjambres solares, cilindros de O'Neill, telescopios lejanos y misiones interestelares.

Esta secuencia es importante: StarRoad no necesita una civilización espacial plenamente desarrollada desde el comienzo. Empieza con una demanda clara —energía y computación— y solo después amplía una economía espacial completa.

8.18. Perspectivas evolutivas: el sucesor de StarRoad

StarRoad no tiene por qué ser la forma definitiva de la infraestructura de transporte planetario. Puede entenderse como una etapa transitoria, pero necesaria, entre la era de los cohetes y las megaestructuras maduras de astroingeniería.

Entre los sistemas hipotéticos conocidos —ascensor espacial, bucle de lanzamiento, StarTram, anillo orbital y torre espacial— solo un anillo orbital avanzado podría superar algún día a StarRoad en capacidad de carga. Sin embargo, una estructura así requiere una industria orbital potente y consolidada, enormes cantidades de materiales, astilleros, energía, montaje robótico y experiencia en el funcionamiento de megaestructuras.

Un posible sucesor de StarRoad sería un sistema de dos anillos conectados:

- un anillo de transporte que rodee la Tierra y cuyo punto más bajo se una a la superficie;
- un anillo portuario geosíncrono y un muelle espacial a la altitud de GEO;
- varios rotores de cable móviles dentro de conductos sellados en el anillo de transporte;
- una conexión entre el anillo de transporte y el anillo portuario geosíncrono en el punto más alto de la trayectoria.

Al igual que un bucle de lanzamiento, el anillo de transporte contiene rotores que se mueven a gran velocidad por canales sellados, pero podría ser más seguro. A diferencia del bucle, sus rotores de cable móviles no realizan giros bruscos y soportan cargas radiales mucho menores; en caso de rotura de emergencia, pueden diseñarse para alejarse del planeta sin destruir toda la estructura. El anillo de transporte sería una torre espacial anular dinámica que se extendería desde la superficie hasta el anillo portuario geosíncrono.

Este sistema no es una alternativa al primer StarRoad, sino un posible sucesor. Sin StarRoad o un sistema troncal comparable, no se podrían lanzar a un coste suficientemente bajo la masa, los equipos, los astilleros y la capacidad energética necesarios para un anillo orbital.

8.19. Potencial de ingeniería planetaria: el Sistema Solar como un único sistema de recursos

StarRoad podría abrir finalmente posibilidades que hoy parecen inconcebibles, incluida la astroingeniería a gran escala y la terraformación. Son escenarios civilizatorios tardíos que solo surgen cuando existe una infraestructura madura en el Sistema Solar: elevación barata de carga desde la Tierra, energía solar espacial, astilleros orbitales en EML4/5, minería de asteroides, transportes interplanetarios, una flota de buques cisterna y energía autónoma para las misiones de espacio profundo.

La idea clave es tratar a Venus y Marte no como dos programas independientes, sino como un único sistema de recursos. Marte carece de nitrógeno, hidrógeno, una atmósfera densa y protección magnética. Venus posee enormes reservas de CO₂ y nitrógeno, además de masa y gravedad parecidas a las terrestres, pero están encerradas en un entorno extremo: unos 460

°C, una presión cercana a 92 atmósferas, una atmósfera de CO₂, nubes de ácido sulfúrico, ausencia de campo magnético y una rotación retrógrada extremadamente lenta.

8.19.1. Etapa preliminar: infraestructura del Sistema Solar

Antes de iniciar la terraformación planetaria deben existir:

- StarRoad como vía económica para elevar masa desde la Tierra;
- centrales solares espaciales y enjambres solares como fuentes de energía;
- astilleros orbitales en EML4/5;
- minería avanzada de asteroides para obtener metales, agua y volátiles;
- decenas o centenares de asentamientos espaciales avanzados y autosuficientes, junto con los nodos energéticos que los abastecen;
- una flota de buques cisterna para transportar hidrógeno, agua, nitrógeno y CO₂;
- sistemas de transporte nuclear-eléctricos o de fusión para las rutas largas.

Una fecha razonable para iniciar estos programas sería no antes de 100 años o más tras la entrada en servicio de StarRoad, aunque podrían acelerarse si la infraestructura espacial creciera de forma exponencial.

8.19.2. Venus: etapas de la terraformación

Venus puede ser más adecuado que Marte para un asentamiento masivo y duradero: su gravedad es de unos 0,9g, su masa se aproxima a la de la Tierra y dispone de abundante energía solar. El problema central es su altísima barrera inicial.

1. Enfriamiento y deposición del

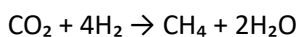
CO₂. Se instala una gran pantalla solar en el punto L1 Venus–Sol para reducir la energía entrante. Con un enfriamiento profundo, una parte considerable del CO₂ se vuelve líquida o sólida y se deposita sobre la superficie. La presión cae drásticamente, transformando un entorno infernal en otro accesible para la ingeniería y la construcción.

2. Anillo cuasisíncrono y puerto orbital. Tras el

enfriamiento, se construye un anillo sostenido dinámicamente a unos 33.400 km sobre la superficie, a la altitud de la futura órbita síncrona venusiana de 24 horas. Su circunferencia es de unos 248.000 km, la gravedad local de aproximadamente 0,021g y la velocidad circular libre de unos 2,87 km/s. Mientras Venus siga girando con demasiada lentitud, rotores activos sostienen el anillo, que funciona como puerto orbital, nodo energético y punto de recepción de buques cisterna.

3. Procesamiento atmosférico e importación de

hidrógeno. El CO₂ depositado se eleva hasta complejos de procesamiento. El hidrógeno llega del Sistema Solar exterior, de cuerpos helados y de recursos asteroidales. La reacción básica para fijar el CO₂ es:



El agua se destina a los océanos y al oxígeno; el metano sirve como combustible y materia prima química; el carbono queda fijado en materiales y depósitos de larga duración; y los compuestos de azufre se transforman en formas minerales. El nitrógeno sobrante y parte del CO₂ pueden enviarse a Marte.

4. Un Venus habitable.

La terraformación primaria puede considerarse completa cuando se hayan formado océanos, una atmósfera de nitrógeno y oxígeno, un clima controlado, protección magnética o magnetosférica y una biosfera inicial. Venus puede ser habitable incluso durante un periodo intermedio de rotación de unas 120 horas: las noches de unas 60 horas quedan moderadas por los océanos, las nubes, una atmósfera de 1,3–1,6 bar, el transporte de calor y un sistema de espejos y pantallas.

5. Corrección orbital de la rotación y día de 24 horas. Llevar a Venus

a un periodo de 24 horas no es un requisito previo para su habitabilidad, sino un perfeccionamiento técnico prolongado. Pasar de la rotación retrógrada actual a una rotación directa de 24 horas requiere aumentar el momento angular en unos $4,3 \times 10^{33} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$. Con una velocidad de escape del fluido de trabajo cercana a 100 km/s, se necesitan aproximadamente $1,1 \times 10^{21} \text{ kg}$ de fluido. Con una energía cinética ideal del chorro próxima a $5 \times 10^{30} \text{ J}$, 300 EW darían un plazo de unos 500–600 años. Al incluir pérdidas de ingeniería y una energía de 10^{31} – $3 \times 10^{31} \text{ J}$, el plazo se amplía a unos 1.000–3.000 años con 300 EW y a varios miles de años con 100–200 EW. Dos anillos de

transporte, conectados simétricamente a lados opuestos tanto del planeta como del anillo cuasisíncrono, transfieren el momento de rotación del anillo a la superficie. Dos anillos, en vez del único empleado en las configuraciones terrestre y marciana, aportan estabilización dinámica adicional durante la transferencia. Una vez alcanzado el periodo de 24 horas, el anillo se convierte en un muelle venusiano plenamente síncrono.

8.19.3. Marte: etapas de la terraformación

Marte es más sencillo para las primeras bases, pero más difícil de transformar en un entorno planetario completo. Sus limitaciones incluyen una gravedad de unos 0,38g, una atmósfera tenue, escasez de nitrógeno, pocos volátiles accesibles y una protección magnética débil. Por tanto, Marte necesita no solo ingeniería local, sino también materia importada de Venus, los asteroides y el Sistema Solar exterior.

1. Magnetosfera artificial. La

protección magnética es la primera condición para una terraformación duradera: anillos orbitales semejantes a los anillos síncrono y de transporte previstos para la Tierra, plataformas energéticas y reflectoras y sistemas magnéticos integrados en el anillo síncrono. Sin ella, la nueva atmósfera seguirá expuesta al viento solar y a una pérdida gradual. Al igual que el anillo cuasisíncrono de Venus, el anillo síncrono marciano combina funciones de transporte, orbitales, energéticas y magnetosféricas. Los paneles solares y el almacenamiento integrados alimentan el circuito magnetosférico, la electrónica de potencia y la infraestructura de control del anillo que mantienen el campo magnético artificial del planeta.

2. Importación de atmósfera

y agua. El nitrógeno y parte del CO₂ llegan de Venus; el agua procede de asteroides, cuerpos helados y el Sistema Solar exterior. Marte no se terraforma de forma aislada: la red común de recursos aporta los volátiles que le faltan. Importar atmósfera venusiana permite obtener antes un clima marciano más suave y estable que crear y calentar una atmósfera solo con recursos del propio planeta.

3. Engrosamiento de la atmósfera y calentamiento del clima

. Una vez establecida la protección magnética, el CO₂, el nitrógeno, el vapor de agua y otros agentes de efecto invernadero aumentan gradualmente la atmósfera. Una atmósfera más densa compensa parte del problema térmico de Marte, mejora el transporte de calor, eleva la presión y amplía las regiones donde puede existir agua líquida.

4. Agua, suelos y biosfera.

Se crean depósitos de agua, se procesa el regolito, se reduce la toxicidad del suelo y se establecen ecosistemas microbianos y vegetales. El desarrollo avanza por etapas: biosferas locales protegidas, después zonas climáticas regionales y solo más tarde un intento de estabilización ambiental global.

5. Un entorno utilizable a escala

planetaria. Con suficientes importaciones de nitrógeno, CO₂ y agua, Marte podría adquirir una atmósfera densa y regulada, protección magnética artificial, reservas de agua, regiones biológicamente activas y una gran infraestructura industrial. Con 0,38g, probablemente seguirá siendo menos adecuado que Venus para un asentamiento humano masivo, duradero y semejante al terrestre, pero la baja gravedad aporta sus propias ventajas: ascensos y aterrizajes más baratos, logística orbital sencilla, construcción de estructuras inmensas, fabricación en baja gravedad y una función de centro industrial, científico y de tránsito entre el Sistema Solar interior y el cinturón de asteroides.

8.19.4. Ventaja del escenario combinado

Un escenario combinado Venus–Marte–Sistema Solar exterior es más sólido que cualquiera de los enfoques aislados. Terraformar solo Marte está limitado por la falta de nitrógeno, agua, energía y protección magnética. Terraformar solo Venus obliga a procesar una enorme atmósfera de CO₂ sin un usuario externo para el excedente. El modelo compartido convierte el problema de un planeta en el recurso de otro: el nitrógeno y el CO₂ venusianos sostienen Marte, el hidrógeno y el agua del Sistema Solar exterior sostienen Venus y la industria asteroidal aporta metales y masa de construcción.

Según esta lógica, StarRoad no es una herramienta directa de terraformación, sino el primer eslabón de una cadena causal: StarRoad eleva masa a bajo coste; las centrales solares espaciales suministran energía; EML4/5 posibilita los astilleros; la minería de asteroides proporciona materias primas; una flota de buques cisterna intercambia materia entre planetas; y solo entonces se hace posible la ingeniería planetaria.

8.20. Conclusión estratégica

StarRoad y AstroLiner crean una economía espacial permanente, no un programa de lanzamiento.

Los mercados iniciales son la energía solar espacial, los centros de datos orbitales y la infraestructura energética. Los mercados maduros son el mantenimiento, la reparación, la retransmisión de energía, la logística interorbital, los astilleros y los asentamientos. La etapa industrial crea una economía asteroidal e interplanetaria. La etapa evolutiva abre el camino a las megaestructuras, las misiones lejanas y la expansión de la civilización a largo plazo.

La idea central de esta sección es que StarRoad no busca un mercado dentro del antiguo modelo de vuelo espacial. Crea un mercado nuevo en el que el flujo masivo de carga, la energía orbital, la infraestructura informática y la industria espacial forman un único sistema logístico.

9. Modelo económico del proyecto

9.1. Metodología y supuestos principales

El modelo económico se basa en los siguientes principios:

- **Producción en serie y fabricación propia:** el escalado reduce un 30–50% el coste de tuneladoras, generadores y sistemas de almacenamiento.
- **Localización:** uso de recursos, mano de obra y materiales de construcción africanos, respaldado por Spon's African Construction Cost Handbook.
- **Precios de mercado** actuales: datos de 2025–2026 para sistemas BESS y centrales geotérmicas.
- **Tipos de cambio:** 1 USD ≈ 100 RUB / 0,90 EUR, como referencia. Todos los cálculos están en dólares constantes de 2025, sin inflación. Una incertidumbre de ±30% corresponde a una prefactibilidad.

9.2. Coste de excavación de túneles en condiciones africanas

Spon's African Construction Cost Handbook detalla costes laborales y de materiales en 13 países africanos. No ofrece un precio unitario directo para túneles de sección muy grande por la variabilidad de las condiciones, pero permite calibrar estas estimaciones.

Tipo de obra	Volumen	Coste medio por km	Coste total (miles de millones USD)	Fundamento
Túnel principal (17,5 × 12,5 m)	2.050 km	12–18 millones de dólares	\$24.6–36.9	Extrapolación de datos mundiales para grandes secciones, corregida para condiciones africanas.
Túneles colectores (6 × 2.050 km, Ø2 m)	12.300 km	3–5 millones de dólares	\$36.9–61.5	Basado en datos reales de excavaciones mineras africanas: 3.500 dólares/m para secciones pequeñas.
Túnel de servicio (Ø3 m)	2.050 km	4–6 millones de dólares	\$8.2–12.3	Como los colectores, ajustado por la mayor sección.
Túneles inclinados (40 × 16 km, 17,5 × 12,5 m)	640 km	12–22 millones de dólares	\$7.7–14.1	Como el principal, con un recargo por la inclinación de 30°.
Excavación total	17.040 km		\$77.4–124.8	

9.3. Flota de tuneladoras con fabricación propia

Un pedido en serie de 40 tuneladoras principales, 240 colectoras y 40 de servicio, junto con una línea propia de montaje en Gabón y la República Democrática del Congo, reduce el coste un 30–50%.

Tipo de escudo	Diámetro	Cantidad	Precio unitario (serie y fabricación propia)	Total (miles de millones USD)
Tuneladora principal (SR-Main)	~18 m	40 unidades	35–60 millones de dólares	\$1.4–2.4
Tuneladoras colectoras (SR-Collector)	2 m	240 unidades	0,8–1,5 millones de dólares	\$0.19–0.36
Tuneladora de servicio (SR-Service)	3 m	40 unidades	1,2–2 millones de dólares	\$0.05–0.08
Plantas de montaje (2)	—	—	1.000–2.000 millones de dólares	\$1–2
Total de tuneladoras				\$2.64–4.84

9.4. Sistema geotérmico autónomo de energía térmica

La central geotérmica real de Menengai, en Kenia, con 35 MW, costó unos 35–40 millones de dólares: 1.000–1.250 dólares/kW, incluida la perforación y el pozo de vapor. Con 40 centrales en serie y producción localizada, el coste unitario puede estimarse en 800–1.200 dólares/kW.

- Coste de una central de 2,5 GW: 2000–3000 millones de dólares.
- Coste de 40 centrales: 80 000–120 000 millones de dólares.

La estimación está respaldada por el límite inferior de las centrales geotérmicas rusas —unos 650 \$/kW según datos de Iturup— y el límite superior de proyectos complejos, unos 1500 \$/kW.

El cálculo utiliza la estimación superior de 100 GW para la potencia total del sistema geotérmico autónomo. La potencia realmente disponible solo podrá determinarse tras la prospección geológica y podría ser mucho menor, incluso de pocos gigavatios. Los fondos liberados se destinarían entonces a otras fuentes de generación.

9.5. Sistema de almacenamiento de energía

El almacenamiento tiene tres niveles:

9.5.1. Nivel primario: almacenamiento de larga duración en las terminales

Situado en 40 terminales, almacena con margen los 360 GWh necesarios para un lanzamiento. Tecnologías preferentes a precios actuales:

Tipo de almacenamiento	Coste unitario	Fuente
Almacenamiento gravitatorio	50–100 dólares/kWh	Experiencia de Energy Vault: 25 MW/100 MWh por 7,7 millones de dólares, es decir, 77 dólares/kWh. Eficiencia del 75–85% y vida útil de 30–40 años.
Bombeo hidroeléctrico y pequeña hidráulica basados en el canal troncal hidrotermal	80–150 dólares/kWh	Aprovecha el desnivel natural a lo largo de la ruta.
BESS de ion-litio	125 dólares/kWh, instalación completa	Según Ember (2025): 75 dólares/kWh por equipos chinos más 50 dólares/kWh de instalación. A una escala de 215 GWh podría bajar a 100 dólares/kWh.

La capacidad primaria total es de 360 GWh, un ciclo completo de aceleración. Para un sistema con 70% de almacenamiento gravitatorio/bombeo y 30% de BESS, el coste es:

Componente	Capacidad	Coste unitario	Coste
Gravitatorio + bombeo	250 GWh	60 dólares/kWh	15.000 millones de dólares
BESS	110 GWh	125 dólares/kWh	13.750 millones de dólares
Total del nivel primario	360 GWh		28.750 millones de dólares

Rango con incertidumbre: 22.000–35.000 millones de dólares.

9.5.2. Nivel secundario: reserva junto a los devanados y dentro del túnel

Los volantes de inercia se instalan junto a los devanados para suavizar transitorios. Cuestan 0,5–1 millón de dólares/MWh; una reserva de 1–5 GWh cuesta 500–5.000 millones.

9.5.3. Nivel de impulso: estabilización en microsegundos

Los supercondensadores compensan pulsaciones de microsegundos y estabilizan la tensión ante cambios bruscos. La capacidad total es inferior al 1% de la energía de lanzamiento, 1–3 GWh. A 300–500 dólares/kWh, cuestan 300–1.500 millones.

9.5.4. Coste total del almacenamiento

Nivel	Tecnología	Capacidad	Coste (miles de millones USD)
Primario	Gravitatorio + bombeo + BESS	360 GWh	\$22–35
Reserva	Volantes de inercia	1–5 GWh	\$0.5–5
Impulso	Supercondensadores	1–3 GWh	\$0.3–1.5
Total almacenamiento			\$22.8–41.5

9.6. Centros industriales y logística

Partida de coste	Coste (miles de millones USD)	Fundamento
Centro industrial de Gabón: fabricación de lanzaderas y módulos de lanzamiento	\$3–6	Diques de construcción naval, fábricas y grúas
Centro industrial de la República Democrática del Congo: portal atmosférico y módulos de alta velocidad	\$2–4	Complejo industrial de montaña y sistema de electrólisis
Infraestructura portuaria en Gabón y el lago Tanganica	\$1–3	Muelles, grúas y almacenes
Líneas eléctricas y carreteras a lo largo de 2.050 km	\$4–8	Líneas de 220 kV, carreteras y puentes
Canal troncal hidrotermal	\$2–5	Excavación, revestimiento y esclusas
Total	\$12–26	

9.7. I+D y prototipos — Fase 0

Partida de coste	Rango (miles de millones USD)	Fundamento
Modelización matemática y CFD	\$0.01–0.03	Referencia: gemelos digitales para un sistema hyperloop, 4,5 millones de CHF.
Prospección geológica de la ruta de 2.050 km	\$0.015–0.025	7.000–12.000 dólares/km para prospección detallada en zonas remotas.
Ingeniería y documentación BIM	\$0.02–0.05	Requisitos técnicos, anteproyectos y proyectos constructivos.
Polígono de pruebas del portal y los superconductores	\$0.01–0.03	Banco para el prototipo de cámara del portal y los módulos de levitación.
Creación del consorcio y acuerdos jurídicos	\$0.005–0.015	Negociaciones internacionales, registro y seguros.
Total Fase 0	\$0.06–0.15	

El presupuesto de I+D de 60–150 millones de dólares no es fijo. Un desarrollo más profundo, un prototipo del portal a escala real o ensayos en grandes bancos pueden elevarlo a 500–3.000 millones. Por ello, la tabla CAPEX usa 100–3.000 millones y una mediana de 1.500 millones.

9.8. Tabla CAPEX final consolidada

Partida de coste	Rango (miles de millones USD)	Mediana (miles de millones USD)	Proporción del CAPEX (%)
Excavación de túneles	\$77.4–124.8	\$101.1	41%
Flota y fabricación de tuneladoras	\$2.64–4.84	\$3.74	1.5%
Sistema geotérmico autónomo: 40 centrales de 2,5 GW	\$80–120	\$100	40%
Almacenamiento en tres niveles	\$22.8–41.5	\$32.2	13%
Centros industriales y logística	\$12–26	\$19	8%
I+D, licencias y administración	\$0,1–3	\$1.5	0.6%
Reserva para imprevistos (15%)	\$31–49	\$40	16%
CAPEX TOTAL	\$225–365	\$295	100%

Conclusión clave: el coste mediano estimado de StarRoad es de unos 300.000 millones de dólares.

9.9. Distribución por fases (miles de millones USD)

Partida de coste	Fase 0	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
Excavación de túneles	—	—	\$5	\$20	\$70	\$6
Tuneladoras	—	\$2	\$0.7	\$0.8	\$0.2	\$0.1
Sistema geotérmico autónomo de energía térmica	—	\$60	\$20	\$20	—	—
Almacenamiento	—	\$10	\$10	\$8	\$3	\$1

Partida de coste	Fase 0	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
Centros industriales y logística	—	\$5	\$3	\$3	\$5	\$3
I+D y licencias	\$1.5	\$0.2	\$0.1	\$0.1	\$0.05	\$0.05
Reserva (15%)	\$0.23	\$11.6	\$5.8	\$7.8	\$11.7	\$1.5
TOTAL por fase	\$1.73	\$88.8	\$44.6	\$59.7	\$90	\$11.7
Total acumulado	\$1.73	\$90.5	\$135.1	\$194.8	\$284.8	\$296.5

9.10. Amortización y evolución del coste de transporte

Todos los datos de este apartado son estrictamente teóricos.

9.10.1. Evolución de la frecuencia de lanzamiento y del coste por kilogramo

StarRoad no alcanza su capacidad máxima de inmediato. La frecuencia y el coste de transporte evolucionan al entrar nuevas líneas, crecer la flota y desplegarse la infraestructura orbital.

Modelo de coste a GSO y más allá, dólares/kg:

Periodo	Líneas	Lanzamientos al año	Frecuencia	Coste de transporte (\$/kg)	Comentario
Años 1–2, piloto	1	12–24	1–2 al mes	\$80–120	Primeros lanzamientos comerciales. Puesta a punto de operaciones, costes indirectos altos y serie pequeña.
Años 3–5	1	50–100	1–2 por semana	\$30–50	Comienza la explotación en serie. La flota crece a 3–5 lanzaderas y las economías de escala reducen costes.
Años 6–10	1	200–300	~1 al día	\$10–20	La primera línea alcanza su capacidad de diseño y el mantenimiento se automatiza por completo.
Años 11–15	2	500–700	~2 al día	\$3–8	Entra la segunda línea; los costes fijos se reparten entre dos aceleradores.
Años 16–25	3–4	1000+	3–5 al día	\$0.8–3	Escalado a 3–4 líneas paralelas. Centrales solares espaciales de más de 1 GW suministran energía orbital para maniobras y tratamiento de cargas.
Años 26+	5+	1500+	5–10 al día	\$0.3–1	Infraestructura madura. Las centrales espaciales alimentan el acelerador y las fábricas orbitales; el coste marginal de la energía es casi nulo.

9.10.2. Cálculo del coste de un lanzamiento (\$/kg)

Fórmula por periodo: $C_{kg} = (C_{energía} + C_{mantenimiento} + C_{amortización} + C_{operación}) / M_{carga}$, donde:

- Cenergía: electricidad, refrigeración y sistemas auxiliares.
- Cmantenimiento: mantenimiento de lanzaderas e infraestructura.
- Camortización: amortización de 300.000 millones de dólares de CAPEX durante 50 años.
- Coperación: personal, logística, seguros y otros gastos operativos.
- Mcarga: masa útil por lanzamiento, 10.000 t.

Parámetros finales por periodo:

Periodo	Lanzamientos /año	Energía (\$/kg)	Mantenimiento (\$/kg)	Amortización (\$/kg)	Operación (\$/kg)	Coste total (\$/kg)
Años 1–2	12	1.8	6.63	50	3.57	62
Años 3–5	50	1	1.25	12	0.67	14.92
Años 6–10	250	0.36	0.23	2.4	0.13	3.12
Años 11–15, 2 líneas	600	0.12	0.113	1	0.061	1.29
Años 16–25, 3–4 líneas	1200	0.045	0.049	0.5	0.026	0.62
Años 26+, 5+ líneas y energía solar espacial	2000	0.015	0.015	0.3	0.008	0.34

9.10.3. Estructura del coste de lanzamiento en cifras absolutas

Para un año medio de cada periodo, con 10.000 t de carga útil:

Periodo	Número de lanzamientos	Energía por lanzamiento (millones USD)	Mantenimiento (millones USD)	Amortización (millones USD)	Gastos operativos (millones USD)	Total por lanzamiento (millones USD)
Años 1–2	12	18	66.3	500	35.7	620
Años 3–5	50	10	12.5	120	6.7	149.2
Años 6–10	250	3.6	2.34	24	1.26	31.2
Años 11–15	600	1.2	1.13	10	0.61	12.93
Años 16–25	1200	0.45	0.49	5	0.26	6.2
Años 26+	>2000	0.15	0.146	3	0.079	3.38

9.10.4. Supuestos principales del cálculo

- Energía:** precio inicial de 0,05 dólares/kWh; hacia el año 26+ baja a 0,005 dólares/kWh gracias a la energía solar espacial y la capacidad geotérmica propia.
- Mantenimiento:** alto en el piloto por reparaciones, puesta a punto y exceso de personal; hacia el año 10 se convierte en mantenimiento automatizado en cadena.
- Amortización:** 300.000 millones de CAPEX en 50 años son 6.000 millones/año. Con 250 lanzamientos/año, 24 millones por lanzamiento. Es una estimación conservadora sin compensar otros ingresos. También puede tratarse esa recuperación anual de 6.000 millones como inversión creciente para nuevas ramas de StarRoad.
- Energía solar espacial:** desde el año 16 alimenta fábricas orbitales y parte del acelerador, reduce costes energéticos y multiplica los ingresos por venta de energía.

9.10.5. Dinámica integrada: ingresos frente a coste

Periodo	Lanzamientos/año	Precio medio de mercado (\$/kg)	Ingresos por lanzamientos (miles de millones USD/año)	Coste (miles de millones USD/año)	Beneficio bruto (miles de millones USD/año)
Años 1–2	12	\$100	12	7.44	4.56
Años 3–5	50	\$39	19.5	7.45	12.04
Años 6–10	250	\$9.6	24	7.8	16.2
Años 11–15	600	\$3.9	23.4	7.76	15.64
Años 16–25	1200	\$1.6	19.2	7.44	11.76
Años 26+	2000	\$0.5	10	6.75	3.25

Nota: la venta de energía del sistema geotérmico, 35.000–44.000 millones de dólares/año, no aparece en la tabla. Es un flujo separado que cubre amortización y operación de la infraestructura.

9.10.6. Conclusión sobre la evolución del coste

StarRoad empieza en 80–120 dólares/kg a GSO y más allá: ya es 10–15 veces más barato que Falcon Heavy a LEO, 1.400 dólares/kg, y comparable al objetivo de Starship, 200 dólares/kg. En el año 10 baja a 10 dólares/kg; en el 25, a 1 dólar/kg; y en el 30, con 5+ líneas y energía solar espacial, a menos de 0,5 dólares/kg. Así, la energía solar y los metales de asteroides se vuelven accesibles para la industria terrestre.

Conclusión clave: StarRoad es competitivo incluso en el piloto. El escalado y la sinergia con la energía solar espacial reducen el precio dos órdenes de magnitud en 30 años.

9.11. Comparación con alternativas

Proyecto	Tipo	Inversión (CAPEX / I+D)	Amortización	Coste / LCOE	Nota
StarRoad, componente energético: sistema geotérmico + almacenamiento	Energía	100.000–150.000 millones de dólares	5–7 años, por venta de energía	0,05 dólares/kWh	Solo generación geotérmica y almacenamiento. Se amortiza como proyecto energético independiente.
StarRoad, componente de transporte: túnel, portal y lanzaderas	Transporte	150.000–200.000 millones de dólares	8–12 años, incluidos los ingresos por carga	1–10 dólares/kg	Acelerador, portal y lanzaderas. Se amortiza con el transporte y usa energía del primer componente.
StarRoad, sistema completo	Energía + transporte	~300.000 millones de dólares	8–12 años, ingresos combinados	0,05 dólares/kWh y 1–10 dólares/kg	Proyecto integrado, con ingresos de energía y carga.
Falcon Heavy, desarrollo	Transporte	~5.000 millones de dólares en I+D	~10–15 años con frecuencia comercial	~1.400 dólares/kg	Cohete operativo. Aquí el CAPEX es desarrollo, no infraestructura.

Proyecto	Tipo	Inversión (CAPEX / I+D)	Amortización	Coste / LCOE	Nota
Starship, desarrollo	Transporte	~10.000 millones de dólares en I+D	~10–15 años con el mercado objetivo	Objetivo 200 dólares/kg; potencial 50–100 dólares/kg	En desarrollo. La inversión es I+D, no infraestructura permanente.
Gran Inga, hidroeléctrica en la República Democrática del Congo	Energía	80.000–100.000 millones de dólares	15–25 años	0,03–0,05 dólares/kWh	Gran central hidroeléctrica; solo energía.
Gran central nuclear, 2 unidades y ~2,4 GW	Energía	15.000–20.000 millones de dólares	20–30 años	0,05–0,08 dólares/kWh	Central nuclear típica; solo energía.

9.12. Conclusión económica

El modelo muestra que StarRoad es realizable, con un CAPEX mediano cercano a 300.000 millones de dólares.

Factores principales:

1. El sistema geotérmico, 80.000–120.000 millones, es el componente más caro, pero se amortiza como proyecto energético independiente en 5–7 años.
2. La excavación, 77.000–125.000 millones, es técnicamente abordable con tuneladoras en serie y fabricación propia.
3. El almacenamiento, 23.000–42.000 millones, se basa en la caída de BESS a 125 dólares/kWh y en sistemas gravitatorios de mejores prácticas mundiales.
4. La I+D, 100–3.000 millones, corresponde al prototipado real, no a la construcción completa.

Atractivo económico: con 0,05 dólares/kWh, StarRoad obtiene 35.000–44.000 millones al año solo por energía. Esto cubre la operación y permite recuperar capital mediante exportación energética antes de los lanzamientos espaciales a gran escala.

10. Seguridad y modos de operación de emergencia

StarRoad se diseña según un principio **extremo de continuidad tras el fallo: la avería** de cualquier componente, y a menudo de varios, no provoca una catástrofe. La seguridad se basa en redundancia **física, separación funcional y protocolos de varias capas que abarcan todo** el ciclo, desde la preparación hasta el vuelo.

10.1. Filosofía de seguridad: ningún fallo aislado es fatal

- **Redundancia de sistemas críticos.** Los elementos esenciales —reactores de a bordo, alimentación de los tramos del acelerador y anillos de reacción del portal— tienen redundancia triple o cuádruple.
- **Segmentación y aislamiento.** El túnel se divide en secciones autónomas de 50–200 km con alimentación y vacío independientes y **compuertas mecánicas de emergencia** entre ellas. Si una sección vecina pierde el vacío, la compuerta solo **se cierra cuando no hay una lanzadera** dentro, evitando una avería en cascada.
- **Control activo y pasivo de la levitación.** El sistema principal de estabilización y compensación **está a bordo**. Grandes circuitos superconductores y unidades de potencia redistribuyen energía en microsegundos para contrarrestar fallos locales en tierra. En las curvas, a velocidad hipersónica, la sección elíptica y la fuerza centrífuga estabilizan además la lanzadera contra la superficie de guiado.
- **La lanzadera y la tripulación primero.** Ante una emergencia durante el lanzamiento, los protocolos priorizan salvar la nave aunque se dañe localmente la infraestructura del túnel.

10.2. Riesgos principales y sistemas de protección

Riesgo	Causa	Protecciones y protocolo
Pérdida de levitación o asimetría de campo a velocidad hipersónica	Fallo de un tramo de alimentación o daño en un bobinado.	1. Estabilización de a bordo con respuesta en nanosegundos. 2. Frenado inductivo: a velocidad hipersónica la propia lanzadera induce corriente en los bobinados pasivos del túnel y genera un efecto estabilizador. 3 . La segmentación confina el impacto y los daños a una sola sección.
Fallo de la barrera gasodinámica del portal	Fallo de uno o varios anillos de reacción.	1. Tres anillos redundantes, cada uno protegido contra explosiones. 2. Prueba 60 segundos antes del lanzamiento: se comprueba el cono gaseoso sin abrir el cierre principal y se aíslan los anillos

Riesgo	Causa	Protecciones y protocolo
		defectuosos . 3. Alarm-1 cancela el lanzamiento ante cualquier fallo.
Pérdida de vacío en el túnel	Despresurización por accidente o daño.	1. Red de sensores de presión en todo el túnel. 2. Compuertas de emergencia entre secciones para confinar la fuga. 3. Activación automática de la parada de emergencia, Alarm-1 o Alarm-2, si se detecta despresurización por delante de la lanzadera.
Avería detectada cuando ya no es posible detenerse	Fallo crítico descubierto en el tramo final de aceleración, entre el 60 y el 100% del trazado.	Alarm-3: frenado máximo, hasta 8g, para reducir la velocidad. Se prioriza colocar la lanzadera en una trayectoria suborbital aunque se pierda el portal. La carga se expulsa para aligerar la nave y permitir un aterrizaje posterior seguro en el océano.

10.3. Jerarquía de protocolos de emergencia

- **Alarm-1, emergencia previa al lanzamiento.** Se **activa antes de la salida** si se detectan pérdida de vacío, fallos del campo magnético, avería de cualquier anillo del portal o formación anómala del cono gaseoso. **Acciones:** cancelar inmediatamente, aislar con compuertas las secciones defectuosas, diagnosticar y reparar.
- **Alarm-2, emergencia en el tramo inicial o medio, 0–60%.** Se activa **después** de la salida si se descubre una avería por **delante**. Acciones: frenado de emergencia y parada dentro del túnel. Si el problema está más adelante, la lanzadera regresa por sus propios medios; en caso contrario queda aislada por compuertas en la sección actual. Se introduce aire y tripulación y pasajeros evacuan por el **túnel técnico y los pozos** de superficie.
- **Alarm-3, emergencia en el tramo final, 60–100%.** Se **activa** cuando detenerse dentro del túnel es imposible y es probable que fallen el portal o el tramo terminal. **Acciones:**
 - 1) **Frenado de emergencia máximo, hasta 8g,** para reducir la velocidad.
 - 2) **Prioridad a la integridad de la lanzadera;** el portal permanece abierto.
 - 3) **Entrada en una trayectoria suborbital de emergencia** y expulsión de la carga en el apogeo para aligerar la nave.
 - 4) **Aterrizaje de emergencia** en una zona prevista del Índico o del Pacífico usando todos los sistemas principales y de reserva. La estructura soporta las sobrecargas y la destrucción parcial del portal.

10.4. Características estructurales de supervivencia

- **Lanzadera.** A futuro, dos reactores independientes a bordo; levitación superconductora distribuida y casco reforzado para sobrecargas extremas y choque térmico.
- **Portal atmosférico.** Tres motores de reacción anulares independientes en envolventes antiexplosión. Un cierre mecánico soporta la onda de choque de una barrera gaseosa parcialmente deshecha. Aberturas en forma de embudo en las paredes interiores descargan presión de inmediato y conducen pasivamente el gas a cámaras de vacío de reserva. Así se minimiza la entrada de aire en túnel y portal, se limitan los daños incluso tras un fallo total y se evita que el pulso de presión de la lanzadera hipersónica rompa la estructura.
- **Túnel.** Segmentación, compuertas de emergencia, alimentación duplicada y túnel técnico para evacuación y reparación.

10.5. Efectos acústicos y de onda de choque

La salida hipersónica produce una potente explosión sónica en forma de onda N. La mayor parte de la energía viaja en una franja estrecha a lo largo de la trayectoria, reduciendo el efecto sobre la infraestructura próxima al portal. Aun así, se establece una zona sanitaria cerrada cuyo radio se calcula mediante modelos y se confirma con pruebas a escala real.

La exposición admisible en superficie se define mediante dos umbrales de sobrepresión máxima Δp :

$\Delta p \leq 2$ psf, unos 96 Pa: se consideran improbables los daños en edificios y cristales.

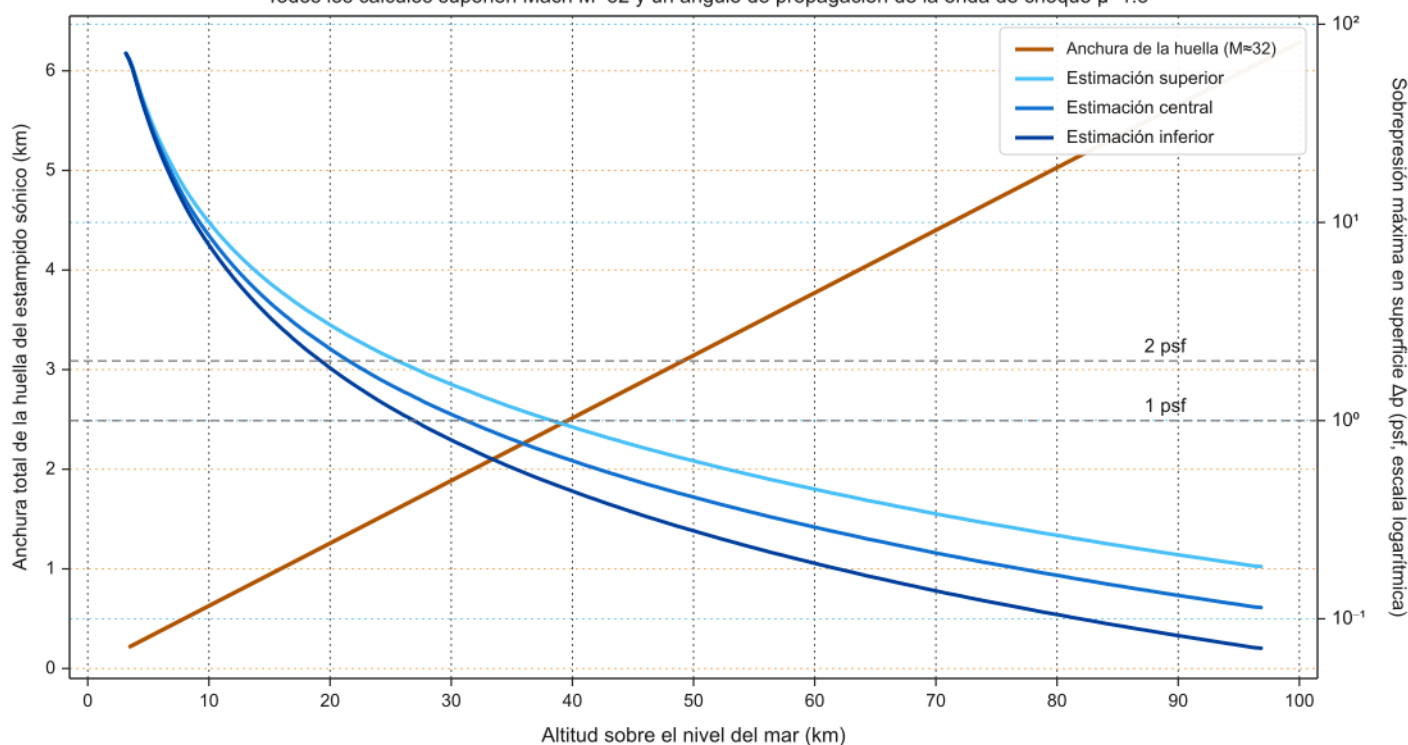
$\Delta p \leq 1$ psf, unos 48 Pa: objetivo para núcleos habitados, con riesgo mínimo de molestias y sin daños.

El diseño y las restricciones operativas —corredor de exclusión, ventanas meteorológicas y límites de altitud— incorporan margen suficiente para cumplir estos umbrales.

StarRoad: anchura de la huella del estampido sónico y sobrepresión según la altitud

Intervalo estimado de Δp (calibrado con datos del transbordador espacial)

Todos los cálculos suponen Mach $M \approx 32$ y un ángulo de propagación de la onda de choque $\mu \approx 1.8^\circ$



Conclusión: la seguridad de StarRoad no se basa en creer que nada fallará, sino **en admitir cualquier fallo posible y disponer de respuestas automáticas definidas de antemano. Así deja de ser un trazado hipotético y se convierte en un sistema de ingeniería prudente, fiable y, sobre todo, digno de confianza.**

11. Influencia cultural y psicológica

Además de sus efectos tecnológicos y económicos, StarRoad influirá profundamente en la cultura y la conciencia colectiva de la humanidad. Cada lanzamiento dejará de ser una operación técnica para convertirse en un **gran acontecimiento público, casi sagrado**.

11.1. El espectáculo como fenómeno

La salida hipersónica de la lanzadera creará un fenómeno astronómico artificial único: la Flecha Solar. Para un observador situado en una zona segura, aparecerá como un destello instantáneo en el horizonte, seguido del rápido ascenso de una estela de plasma deslumbrante que dibujará una línea recta en el cielo. Decenas de segundos después, en lugar del rugido familiar de los motores, llegará un estruendoso doble estampido sónico: la sensación física de toda una ciudad voladora, no de una simple máquina, atravesando las barreras sónica y térmica. Los lanzamientos nocturnos iluminarán el paisaje como un cometa en movimiento y parecerán una aurora tecnológica antinatural.

11.2. Resonancia psicológica y simbólica

- **Escala tangible.** Un programa espacial abstracto se convierte en un espectáculo diario o semanal, visible desde cientos de kilómetros, y transforma la expansión espacial de un conjunto de gráficos en un hecho **físico de la vida cotidiana**.
- **Un nuevo arquetipo.** La imagen de una gigantesca flecha luminosa disparada por la Tierra hacia el espacio se convierte en un poderoso arquetipo de progreso, voluntad y aspiración. En la cultura popular sustituye al cohete vertical arcaico y simboliza la transición a la era de los **corredores de transporte** espacial.
- **Unidad y orgullo.** Del mismo modo que los lanzamientos de Soyuz y Apolo reunieron en su día al planeta ante las pantallas de televisión, los vuelos regulares de StarRoad se convierten en acontecimientos mediáticos mundiales que demuestran la capacidad de la humanidad para cooperar en objetivos inmensos.

11.3. Consecuencias socioeconómicas

- **Turismo. Los complejos de observación** contruidos en los límites seguros de la zona de exclusión se convierten en centros de una nueva forma de turismo espacial. Ver un lanzamiento podría rivalizar en atractivo con visitar las maravillas del mundo antiguo.
- **Impulso educativo. El espectáculo** se convierte en una herramienta sin igual para inspirar vocaciones y anima a millones de niños a estudiar física, ingeniería y astronáutica.
- **Desmitificación del espacio.** El carácter regular, previsible e industrial del lanzamiento elimina del vuelo espacial el aura de excepcionalidad y riesgo mortal, y lo presenta **como una operación logística normal, aunque** inmensa.

Por tanto, StarRoad no solo creará la infraestructura física para llegar al espacio, sino también el **relato cultural y la base emocional que la humanidad necesita** para aceptar su nuevo papel: el de una civilización que construye activamente su futuro más allá de la cuna. La aparición regular de la Flecha Solar recordará cada día que el camino hacia las estrellas no solo está abierto, sino que ya se utiliza.

12. Conclusión

StarRoad es más que un megaproyecto de ingeniería: es una estrategia para la transición hacia una civilización espacial industrial. Al sustituir el paradigma del «cohetes» por el del «corredor», el proyecto ofrece una vía para superar las dos barreras principales: el coste de transportar carga y la baja capacidad de flujo.

El corredor hipersónico se convierte en una columna vertebral que enlaza energía, agricultura, industria, logística y tecnologías espaciales. África también tiene la oportunidad de dar un salto industrial y tecnológico utilizando su geografía y sus recursos para construir un camino al espacio, y no limitarse a exportar materias primas.

Mediante la integración y ampliación de tecnologías probadas, StarRoad sienta las bases de una economía en la que los recursos del Sistema Solar están disponibles para resolver problemas terrestres, mientras que la propia infraestructura sirve de seguro y trampolín para el futuro de la humanidad. Su realización exigirá una cooperación internacional sin precedentes, inversión a largo plazo y voluntad de ingeniería; la recompensa será la llave de una auténtica era espacial, recursos extraterrestres casi ilimitados y energía abundante.