

Progetto StarRoad: corridoio elettromagnetico superpesante di lancio dalla Terra allo spazio

Indice

Navigazione: [inizio](#) | [indice](#) | [fine](#)

[1. Descrizione, caratteristiche principali, capacità e filosofia](#)

[1.1. Filosofia fondamentale del progetto](#)

[1.2. Capacità](#)

[2. Vantaggi e motivazioni tecniche, economiche, geografiche e strategiche](#)

[2.1. Tecnici](#)

[2.2. Economici](#)

[2.3. Geografici](#)

[2.4. Strategici](#)

[3. Base industriale e tecnologica](#)

[3.1. Levitazione e accelerazione magnetiche \(maglev\)](#)

[3.2. Tecnologie superconduttrici e architettura distribuita](#)

[3.3. Potenza impulsiva](#)

[3.4. Tecnologie del vuoto](#)

[3.5. Aerodinamica ipersonica e protezione termica](#)

[3.6. Sistemi di energia nucleare](#)

[3.7. Costruzione dei tunnel](#)

[3.8. Sistema geotermico autonomo di energia termica](#)

[3.9. Combustione supersonica](#)

[3.10. Ciclo chiuso del combustibile del portale](#)

[3.11. Strategia di validazione tecnologica](#)

[4. Descrizione dettagliata e progressiva degli elementi e delle tecnologie di StarRoad](#)

[4.1. Tunnel di accelerazione e relative infrastrutture](#)

[4.2. Portale atmosferico \(terminale ad alta quota\)](#)

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

[5. Ciclo operativo: dalla preparazione del lancio alla manutenzione dopo l'ammarraggio](#)

[5.1. Preparazione e lancio](#)

[5.2. Accelerazione nel tunnel](#)

[5.3. Uscita attraverso il portale atmosferico](#)

[5.4. Attraversamento dell'atmosfera](#)

[5.5. Ingresso nello spazio e operazioni orbitali](#)

[5.6. Uscita dall'orbita e rientro](#)

[5.7. Ammaraggio](#)

[5.8. Rimorchio e manutenzione](#)

[6. Realizzazione, tempi, requisiti e centri industriali](#)

[6.1. Fasi del progetto](#)

[6.2. Centri industriali](#)

[6.3. Orizzonte complessivo](#)

[7. Problemi e compiti affrontati](#)

[7.1. Surriscaldamento globale](#)

[7.2. Compito economico](#)

[7.3. Obiettivo strategico](#)

[7.4. Catalizzatore tecnologico](#)

[7.5. Autonomia energetica e termica](#)

[7.6. Impronta di carbonio](#)

[7.7. Potenziale sociale e ambientale del Canale Idrotermale Principale](#)

[7.8. Rete energetica](#)

[7.9. StarRoad come arteria economica](#)

[7.10. Sicurezza delle infrastrutture critiche](#)

[7.11. Scelta e scalabilità del sito](#)

[7.12. Coordinamento politico e giuridico di un progetto transcontinentale](#)

[7.13. Crescita evolutiva del flusso merci](#)

[8. Mercati e logistica orbitale](#)

[8.1. Il problema della domanda di lanci superpesanti](#)

[8.2. Mercato iniziale: energia solare spaziale e data center orbitali](#)

[8.3. Logica climatica e industriale dell'energia solare spaziale](#)

[8.4. Sedi orbitali: GEO ed EML4/5](#)

[8.5. Fase iniziale: voli diretti di AstroLiner-S](#)

[8.6. Fase matura: relè a microonde e infrastrutture di servizio](#)

[8.7. Suddivisione del trasporto per ambiente operativo](#)

[8.8. Ruolo di AstroLiner nella logistica matura](#)

[8.9. trasporti e rimorchiatori interorbitali](#)

[8.10. Discesa sulla Terra e sugli altri pianeti](#)

[8.11. Moduli standardizzati](#)

[8.12. Gerarchia delle infrastrutture orbitali](#)

[8.13. Cantieri orbitali](#)

[8.14. Insediamenti orbitali e lunari](#)

[8.15. Analogia logistica: lo spazio come rete marittima](#)

[8.16. Economia del flusso merci](#)

[8.17. Fasi di sviluppo del mercato e della logistica](#)

[8.18. Prospettive evolutive: il successore di StarRoad](#)

[8.19. Potenziale dell'ingegneria planetaria: il Sistema solare come unico sistema di risorse](#)

[8.20. Conclusione strategica](#)

[9. Modello economico del progetto](#)

[9.1. Metodo e ipotesi principali](#)

[9.2. Costo dello scavo nelle condizioni africane](#)

[9.3. Flotta di frese meccaniche di produzione interna](#)

[9.4. Sistema geotermico autonomo di energia termica](#)

[9.5. Sistema di accumulo dell'energia](#)

[9.6. Poli industriali e logistica](#)

[9.7. R&S e prototipazione — Fase 0](#)

[9.8. Sintesi finale del CAPEX](#)

[9.9. Distribuzione per fase \(miliardi USD\)](#)

[9.10. Ritorno dell'investimento ed evoluzione del costo di trasporto](#)

[9.11. Confronto con le alternative](#)

[9.12. Conclusione economica](#)

[10. Sicurezza e modalità operative di emergenza](#)

[10.1. Filosofia della sicurezza: nessun guasto isolato è fatale](#)

[10.2. Rischi principali e sistemi di protezione](#)

[10.3. Gerarchia dei protocolli d'emergenza](#)

[10.4. Caratteristiche strutturali di sopravvivenza](#)

[10.5. Effetti acustici e dell'onda d'urto](#)

[11. Impatto culturale e psicologico](#)

[11.1. Lo spettacolo come fenomeno](#)

[11.2. Risonanza psicologica e simbolica](#)

[11.3. Conseguenze socioeconomiche](#)

[12. Conclusione](#)

1. Descrizione, caratteristiche principali, capacità e filosofia

StarRoad è un complesso di trasporto a lunga percorrenza tra la Terra e lo spazio, incentrato su un acceleratore evacuato a levitazione magnetica lungo oltre 2.050 chilometri. È progettato per immettere nello spazio navette autonome, riutilizzabili e superpesanti fino a 15.000 tonnellate, senza trasportare a bordo propellente reattivo per il lancio.

1.1. Filosofia fondamentale del progetto

Un cambiamento nel paradigma del lancio spaziale:

- **Attraversamento inerziale** dell'atmosfera. Invece di vincere l'atmosfera mediante spinta ed efficienza aerodinamica, StarRoad utilizza l'energia cinetica immagazzinata nella massa di una navetta accelerata nel vuoto fino a una velocità ipersonica di circa 11 km/s. L'atmosfera viene attraversata interamente per inerzia in 50–60 secondi.
- **La massa come vantaggio.** Una massa elevata — migliaia di tonnellate — cessa di essere un nemico e diventa portatrice di un'enorme energia cinetica, consentendo inoltre di utilizzare materiali superresistenti e refrattari per la struttura e la protezione termica.
- **Separazione delle funzioni.** L'infrastruttura energetica, l'accelerazione e il controllo di precisione sono affidati al complesso terrestre e diventano un sistema ingegneristico stazionario. La navetta diventa un modulo di trasporto specializzato, ottimizzato per il trasporto di merci, le manovre orbitali e il rientro.
- **Industrializzazione scalabile.** Il sistema non è concepito come una singola installazione, ma come la prima linea di una «ferrovia» spaziale, con la possibilità di costruire tunnel paralleli, ridondanti e aggiuntivi, ottenendo una crescita esponenziale della capacità e una riduzione dei costi.

1.2. Capacità

- **Consegna diretta oltre l'orbita geostazionaria (GEO).** Una velocità iniziale di circa 11 km/s, più circa 0,465 km/s dovuti alla rotazione equatoriale terrestre, consente alla navetta di raggiungere quasi direttamente destinazioni ad alta energia, come i punti di Lagrange L1/L2 Terra–Sole o Terra–Luna, con correzioni minime. Ciò permette di eliminare il rimorchio e il rifornimento in orbita terrestre bassa.
- **Capacità di carico utile.** In un solo volo si possono trasportare migliaia di tonnellate. Diventa così economicamente praticabile costruire centrali orbitali della classe dei gigawatt, insediamenti spaziali, complessi di estrazione delle risorse, lavorazione, assemblaggio e produzione, sistemi di difesa planetaria e veicoli interplanetari.
- **Costo.** A pieno utilizzo, il costo calcolato della consegna verso orbite alte potrebbe scendere a **1–10 dollari per chilogrammo**, diversi ordini di grandezza al di sotto dei sistemi a razzo esistenti e futuri.

2. Vantaggi e motivazioni tecniche, economiche, geografiche e strategiche

2.1. Tecnici

La maggior parte dei concetti alternativi di lancio orbitale è limitata non dalla possibilità teorica di costruzione, ma dai requisiti operativi: funzionamento continuo, sostegno dinamico attivo, affidabilità irrealisticamente elevata e conseguenze catastrofiche dei guasti. Le megastrutture cinetiche attive richiedono alimentazione ininterrotta e stabilizzazione dinamica continua per restare operative; se vengono meno l'energia o il controllo, la struttura perde il sostegno ed entra in una modalità di guasto potenzialmente catastrofica. Anche i lunghi sistemi esterni a tubo evacuato impongono requisiti eccezionalmente severi di tenuta, isolamento delle sezioni e stabilità termica. StarRoad si distingue perché la sua infrastruttura critica è sotterranea, consente un funzionamento impulsivo, circoscrive gli incidenti e rimane passivamente stabile. Ciò la rende la forma minimamente praticabile di sistema principale per il trasporto di carichi oltre la Terra. L'impiego di tecnologie reali — trasporto nel vuoto, aerodinamica ipersonica, potenza impulsiva e superconduttori — adattate alla scala di StarRoad rende inoltre realistico l'approccio.

2.2. Economici

I costi principali sono la costruzione dell'infrastruttura e l'energia. L'assenza di stadi a perdere e il consumo trascurabile di fluido di lavoro durante il lancio riducono radicalmente i costi operativi. Il progetto stimola inoltre lo sviluppo regionale, nuovi sistemi energetici e poli ad alta tecnologia.

Per valutare la fattibilità economica di StarRoad occorre considerare la scala delle infrastrutture mondiali di trasporto ed energia. Nel contesto dei flussi annuali globali di merci, volumi di vari milioni di tonnellate rappresentano una quota trascurabile, mentre investimenti di capitale dell'ordine di centinaia di miliardi di dollari sono normali per infrastrutture di scala planetaria. StarRoad non compete quindi con i sistemi di trasporto esistenti: occupa la nicchia di un corridoio ad alta energia che aggiunge nuove capacità incidendo in misura relativamente modesta sui flussi globali complessivi.

2.3. Geografici

Il tracciato dalla foce del fiume Nyanga in Gabon al monte Mohi e all'altopiano meridionale della Repubblica Democratica del Congo è quasi ideale:

- **Equatore.** Massimo incremento di velocità dalla rotazione terrestre e minima correzione dell'inclinazione orbitale.
 - **Linea di vista.** Un tracciato relativamente rettilineo attraverso regioni scarsamente popolate dell'Africa centrale.
 - **Quota del portale.** Un'altitudine di 3.400 metri riduce del 30% la densità atmosferica all'uscita, attenuando i carichi termici e d'urto.
 - **Stabilità sismica.** In quest'area il Rift dell'Africa orientale presenta un'attività minima.
 - **Logistica.** Il tracciato inizia presso l'oceano — per la produzione e il recupero delle navette — e termina ad alta quota.
- **Tracciato e sito ottimali: il percorso di circa 2.050 km dalla foce del fiume Nyanga, in Gabon, al monte Mohi, nella Repubblica Democratica del Congo.** Il lancio dalla costa **gabonese offre un'inclinazione orbitale equatoriale quasi ideale di circa 3°**, consentendo accesso diretto all'orbita geostazionaria e ai punti di Lagrange e riducendo al minimo il costo dei trasferimenti interplanetari. Il complesso del **portale si trova sul** monte Mohi, a circa 3.400 m, mentre l'ampio altopiano meridionale è riservato all'espansione. Il sito offre caratteristiche eccellenti: quota elevata, terreno pianeggiante, distanza superiore a 20 km dagli insediamenti e vicinanza ai laghi Tanganica e Kivu.
 - **Sito alternativo.** Un tracciato di riserva dal porto di Kitomb, nella Repubblica **Democratica del Congo, al monte Mohi sarebbe** lungo **circa 1.850 km** e rimarrebbe interamente all'interno di un solo paese, semplificando la logistica e il coordinamento giuridico. Tuttavia **produrrebbe un'inclinazione orbitale di circa 13°, richiedendo un delta-v aggiuntivo di ~200–300 m/s** per inviare carichi verso l'orbita geostazionaria a 0° o i punti di Lagrange. Ciò equivale a **perdere circa il 2–4% della massa utile a ogni lancio**. La scelta del tracciato internazionale più complesso ma equatoriale, **con un'inclinazione di circa 3°**, è quindi una decisione strategica volta alla massima efficienza economica per l'intera vita utile del corridoio e all'accesso diretto a tutti i nodi critici dell'infrastruttura orbitale.

2.4. Strategici

Creazione di un corridoio di trasporto spaziale operativo in ogni condizione meteorologica e ventiquattr'ore su ventiquattro. Nel lungo periodo, reti di linee simili diventano infrastruttura globale, tutela della civiltà con potenziale di evacuazione di massa e fondamento di una piena industrializzazione spaziale, trasferendo oltre la Terra le industrie ad alta intensità energetica e termica.

Anche se i sistemi a razzo raggiungessero i costi ultrabassi dichiarati per la consegna del carico utile, un lancio rimarrebbe un evento isolato con capacità limitata. In questo senso, i sistemi a razzo — indipendentemente dal prezzo per chilogrammo — sono per natura una logistica di tipo speditario. StarRoad è un corridoio infrastrutturale destinato non solo a ridurre al minimo il costo del singolo lancio, ma anche a creare un flusso di merci stabile e continuo.

3. Base industriale e tecnologica

StarRoad non richiede la scoperta di nuove leggi della fisica, ma rappresenta il culmine dell'integrazione ingegneristica fra tecnologie esistenti ed emergenti:

3.1. Levitazione e accelerazione magnetiche (maglev)

Si basa sull'esperienza di Cina, Giappone e Germania. Le accelerazioni record ottenute nei collaudi cinesi del maglev — una tonnellata da 0 a 700 km/h in due secondi — dimostrano la fattibilità fondamentale dell'accelerazione rapida di oggetti massicci.

3.2. Tecnologie superconduttrici e architettura distribuita

StarRoad utilizza un'architettura invertita: i magneti superconduttori che generano il principale campo di levitazione e stabilizzazione sono installati a bordo della navetta e raffreddati dai suoi sistemi criogenici. Il tunnel contiene avvolgimenti di «rotaia» relativamente semplici ed economici, in rame o alluminio, che fungono da guide passive e da circuito secondario per trasmettere l'energia impulsiva di accelerazione. Ciò riduce di ordini di grandezza il costo e la complessità del tunnel, trasferendo la principale complessità tecnologica sulla navetta riutilizzabile, dove può essere sottoposta a manutenzione centralizzata.

3.3. Potenza impulsiva

Stazioni di supercondensatori e batterie distribuite lungo il tracciato vengono caricate dalla rete SATEGA e forniscono impulsi dell'ordine dei gigawatt al segmento necessario dell'acceleratore.

3.4. Tecnologie del vuoto

Esperienza del Large Hadron Collider del CERN, di SpinLaunch e dei tubi evacuati di Hyperloop.

3.5. Aerodinamica ipersonica e protezione termica

Conoscenze acquisite con veicoli spaziali, veicoli di rientro manovrabili e progetti come Starship di SpaceX. Raffreddamento attivo e accumulatori termici a cambiamento di fase.

3.6. Sistemi di energia nucleare

Reattori compatti di bordo — una generazione oltre i generatori termoelettrici a radioisotopi — oppure futuri moduli a fusione, come i sistemi di Helion Energy, per alimentare la navetta in orbita.

3.7. Costruzione dei tunnel

Moderne frese meccaniche a piena sezione capaci di avanzare per decine di chilometri l'anno, con più tunnel scavati in parallelo.

3.8. Sistema geotermico autonomo di energia termica

Il progetto comprende un'infrastruttura energetica e climatica integrata, propria di StarRoad e di scala gigawatt, basata su una tecnologia modificata di sistemi geotermici avanzati (EGS). Il fluido di lavoro è anidride carbonica supercritica ($s\text{CO}_2$) ottenuta mediante cattura diretta dall'aria (DAC). Il sistema svolge tre funzioni critiche: 1) controllare attivamente il campo termico geotermico per mantenere stabile la temperatura del tunnel di accelerazione; 2) generare elettricità di base; 3) rimuovere CO_2 dall'atmosfera a lungo termine.

3.9. Combustione supersonica

La barriera gasdinamica del portale impiega motori anulari a getto supersonico alimentati da una miscela di aria e idrogeno. La combustione supersonica forma un flusso gassoso conico stabile diretto verso l'esterno lungo l'asse del tunnel. Il flusso sposta l'aria atmosferica e crea un gradiente di pressione che protegge il vuoto dell'acceleratore durante il passaggio della navetta.

3.10. Ciclo chiuso del combustibile del portale

La barriera gasodinamica usa combustibile pulito e rinnovabile. L'elettrolisi ricava idrogeno dall'acqua e i motori usano aria atmosferica come ossidante. Il principale prodotto della combustione è vapore acqueo surriscaldato. Non occorre trasportare e conservare grandi quantità di combustibile chimico in un sito montano remoto, aumentando l'affidabilità e riducendo i costi operativi.

3.11. Strategia di validazione tecnologica

Lo sviluppo del progetto procede su due binari paralleli: modellazione matematica e prove in scala reale dei gruppi critici. Ciò consente di confermare tempestivamente la fattibilità del concetto e di ottenere dati ingegneristici precisi, riducendo al minimo i rischi per il progetto principale.

4. Descrizione dettagliata e progressiva degli elementi e delle tecnologie di StarRoad

4.1. Tunnel di accelerazione e relative infrastrutture

- **Lunghezza** : circa 2.050 km.
- **Sezione** trasversale. Ellissoidale ($\sim 17,5 \times 12,5$ m), ottimizzata per la forma aerodinamica della navetta e per una levitazione magnetica stabile.
- **Profondità del tunnel**: fino a circa 8 km, o anche maggiore se le condizioni geologiche e termiche lo consentono. La profondità ammissibile potrà essere definita soltanto dopo un'indagine geologica dettagliata: perforazioni lungo il tracciato, profilo termico, valutazione dello stato tensionale e della fratturazione della roccia, nonché idrogeologia. Quanto più basse sono la temperatura e il flusso termico degli strati profondi — indicativamente fino a 200–250 °C — tanto più ampia è la fascia di profondità tecnicamente realizzabile e la libertà di ottimizzare raggi di curvatura e raccordi. In questo modo si riducono i picchi di accelerazione e i carichi dinamici mantenendo la velocità prevista.
- **Costruzione**: combinata. Il tratto iniziale, lungo circa 330 km, è un rettilineo sotterraneo a lieve pendenza che scende direttamente verso il portale per semplificare l'accelerazione. Il resto corre in un tunnel profondo o sotterraneo, assicurando stabilità termica, isolamento sotto vuoto e sicurezza.
- **Geometria del tracciato**: curva a S dopo circa 330 km.
 - **Arco discendente**: raggio di circa 6.300 km; porta gradualmente il tunnel in profondità per ottenere l'angolo necessario.
 - **Arco ascendente**: raggio di 2.500–3.500 km; riporta il tunnel al portale con un'inclinazione di circa 5–6° rispetto all'orizzontale. I raggi sono calcolati affinché l'accelerazione centripeta non superi 4 g a velocità ipersonica.
- **Sistema del vuoto**: segmentato. Ogni tratto di circa 50 km è autonomo e dispone di proprie pompe da vuoto, sensori e valvole di emergenza.

4.1.1. Sistema di accelerazione

L'accelerazione e la stabilizzazione della navetta derivano dall'interazione tra i magneti superconduttori di bordo e gli azionamenti elettromagnetici lineari distribuiti nel tunnel. Questi azionamenti sono avvolgimenti passivi segmentati in conduttori convenzionali — rame o alluminio — e non richiedono raffreddamento criogenico.

- **Nel tratto iniziale del tunnel, da 0 a 330 km**: gli azionamenti **sono disposti soprattutto** sotto la via. Generano il campo per la levitazione, l'accelerazione iniziale a 4 g e la compensazione attiva della gravità.
- **Nel tratto intermedio , da 330 a 2 . 000 km, soprattutto nella curva a S**: gli **azionamenti** circondano il tunnel . Assicurano un'accelerazione precisa, mantengono la navetta al centro a velocità ipersonica e ne stabilizzano la traiettoria in curva. Sul pavimento della parte finale, dove le accelerazioni radiali sono elevate, si usano avvolgimenti rinforzati e strutturalmente ridondanti. Tra i chilometri 330 e 2.000 l'accelerazione diminuisce secondo una curva da 4 g a 0 g, mentre la velocità raggiunge circa 11 km/s.
- **Nel tratto finale, da 2.000 a 2.050 km**: gli ultimi 50 km servono a stabilizzare e centrare la navetta prima del passaggio nell'atmosfera attraverso il portale atmosferico. In questo tratto non vi è accelerazione.

L'energia impulsiva delle sottostazioni del sistema geotermico autonomo viene fornita ai singoli segmenti degli avvolgimenti in perfetto sincronismo **con la posizione della** navetta. Il campo magnetico viaggiante così generato interagisce con i magneti di bordo e accelera il veicolo. Questa architettura semplifica il tunnel, ne facilita la manutenzione e concentra gli elementi ad alta tecnologia sulla navetta riutilizzabile.

4.1.2. Sistema geotermico autonomo di energia termica

Per garantire stabilità termica, autonomia energetica e lunga durata, ogni tunnel di accelerazione è affiancato da sette tunnel di servizio di piccolo diametro. Insieme formano il sistema geotermico autonomo di energia termica, di seguito «sistema geotermico autonomo»:

- **Sei tunnel collettori ed energetici principali, ciascuno di 2 m di diametro.** Si trovano 30 m sotto il piano dell'acceleratore, con un interasse uniforme di 7 m. Funzionano a coppie con circolazione reversibile di CO₂ supercritica fortemente sottoraffreddata a +5 °C. Questa disposizione forma sotto l'intera sezione dell'acceleratore una piastra rocciosa raffreddata continua, spesso oltre 15 m e priva di ponti termici.
- **Un tunnel tecnico di servizio di 3 m di diametro .** Corre allo stesso livello dell'acceleratore, 3 m lateralmente, consentendo diagnosi e riparazioni continue senza fermare il traffico. I tunnel del sistema geotermico autonomo resistono insieme a una pressione interna fino a 25 MPa, alla pressione della roccia e ai **carichi dinamici. Una flotta completamente robotizzata di microfresce scava tutti e sette i tunnel. Il sistema separa** fisicamente e funzionalmente l'infrastruttura energetica da quella di trasporto, offrendo affidabilità e manutenibilità eccezionali.

4.1.3. Raffreddamento del sistema geotermico autonomo di energia termica

- **Circuito di raffreddamento** profondo. I tunnel collettori del sistema geotermico autonomo sotto l'acceleratore fanno circolare un fluido a base di CO₂ in stato denso ad alta pressione o supercritico. Nel normale regime a bassa temperatura, il flusso freddo entra nei collettori a circa +5...+15 °C. Dopo aver assorbito calore geotermico, la CO₂ può superare +100 °C in base a profondità, flusso termico della roccia e modalità di generazione. Il circuito sottrae calore, crea una zona raffreddata sotto il tunnel principale e consente di costruire in sicurezza a circa 5–8 km di profondità.

- **Canale idrotermale principale . Costruito** lungo il tracciato StarRoad, parallelo alla strada di servizio, alla linea elettrica e alle comunicazioni, collega i terminali in un unico sistema superficiale di smaltimento del calore.

Il canale è largo circa 5–8 m e profondo 2–3 m. Sul fondo corrono varie serpentine indipendenti ad alta pressione che trasportano CO₂ fra terminali vicini. L'acqua funge da tampone termico e mezzo intermedio di trasferimento del calore.

Dopo turbine, scambiatori o compressori, la CO₂ entra nelle serpentine a circa +50...+80 °C. In un tratto di circa 50 km fra terminali cede calore all'acqua e si raffredda fino a circa +22...+35 °C, secondo stagione, umidità, intensità delle piogge, raffreddamento radiativo notturno e regime operativo del canale.

In esercizio normale, l'acqua del canale resta intorno a +22...+32 °C, raggiungendo localmente +35...+45 °C nelle sezioni calde. Vicino all'ingresso del flusso caldo può salire brevemente a +50...+80 °C, riducendo parte dell'attività biologica, ma non diventa potabile senza trattamento.

Coperture selettive leggere sopra il canale riflettono la radiazione solare e consentono lo smaltimento del calore nell'infrarosso.

- **Raffreddamento ai terminali.** Ogni terminale contiene torri di raffreddamento, scambiatori, pompe, compressori ausiliari, turboespansori e refrigeratori di riserva. Nel regime normale il canale smaltisce passivamente la maggior parte del calore a bassa temperatura.

Le torri e gli scambiatori terminali abbassano la CO₂ dopo il canale da circa +22...+35 °C a +15...+25 °C. Quando necessario, i refrigeratori di riserva la portano a –5...+5 °C prima dei collettori profondi. Servono per picchi, emergenze o condizioni stagionali, non come regime principale continuo.

- **Compressione ausiliaria e turboespansione.** La CO₂ raffreddata giunge al terminale successivo a pressione elevata. Può quindi attraversare un turboespansore, recuperando parte dell'energia di compressione e raffreddandosi per espansione fino a circa –10...+5 °C, in base a pressione, portata e stato di fase richiesto.

La CO₂ entra poi nei collettori geotermici con temperatura, pressione e fase necessarie. Il ciclo non crea energia gratuita: il compressore fornisce lavoro, il canale smaltisce il calore di compressione e il turboespansore recupera solo una parte dell'energia impiegata. Il vantaggio è un flusso più freddo con minore carico sulla refrigerazione attiva.

- **Ridondanza e flusso bidirezionale.** Le serpentine sono duplicate e reversibili. Se un circuito è danneggiato, il flusso viene deviato su una condotta di riserva o un terminale vicino. La direzione della CO₂ può cambiare secondo carico termico, stato d'emergenza e disponibilità dei tratti.
- **Manutenibilità.** Paratoie dividono il canale in tratti di circa un chilometro. Se un tratto è danneggiato, viene isolato e pompato fino al livello tecnico minimo o parzialmente prosciugato. Dopo la depressurizzazione, squadre o robot accedono alle serpentine senza fermare l'intera linea. Durante la riparazione mantengono il raffreddamento i circuiti di riserva, l'inversione del flusso, il maggiore scambio nei terminali vicini e l'attivazione temporanea dei refrigeratori.
- **Funzione idrica limitata.** Come funzione secondaria, una pendenza costante da est a ovest consente un lento flusso per gravità, il lavaggio dei tratti e lo scarico controllato dell'acqua in eccesso.

Le piogge equatoriali notturne possono reintegrare il canale attraverso bacini di raccolta, vasche di decantazione, filtri e sfioratori. Poiché l'acqua non entra direttamente in contatto con la CO₂, dopo un trattamento locale può essere impiegata per irrigazione limitata, servizi tecnici dei terminali, riserve antincendio e fasce verdi di protezione.

Questa funzione resta secondaria: il prelievo d'acqua è consentito solo se non compromette il compito principale del canale, cioè raffreddare la CO₂ e mantenere la stabilità termica del sistema geotermico autonomo.

- **Importanza per StarRoad.** Collettori profondi, canale idrotermale, raffreddatori terminali, torri, compressori ausiliari, turbospansori e refrigeratori di riserva formano un unico sistema distribuito di gestione termica. Riduce la dipendenza da impianti frigoriferi locali, aumenta la tolleranza ai guasti, ridistribuisce i flussi termici fra terminali e rende più realistica la costruzione profonda dell'acceleratore.

Il raffreddamento superficiale rafforza anche il ruolo economico di StarRoad: lungo il tracciato si forma una fascia lineare di terminali, strade di servizio, nodi energetici, canale, aree industriali e terreni agricoli irrigati.

4.1.4. Importanza strategica del sistema geotermico

Oltre a fornire energia e stabilità termica, il sistema rende possibile costruire il tunnel principale a grande profondità — 5–8 km o più — in sicurezza e a costi ragionevoli. Il controllo attivo del campo termico e l'estrazione del calore geotermico eliminano i limiti di temperatura che impedirebbero tale profondità. Diventa così realizzabile la geometria ottimale a S, con grandi raggi di curvatura, necessaria per risalire gradualmente e far uscire la navetta a circa 5–6° sull'orizzontale, mantenendo le accelerazioni ammissibili per carico ed equipaggio intorno a 4 g lungo 2.050 km. Il sistema geotermico autonomo è quindi il fondamento tecnologico non solo dell'energia, ma dell'intera ottimizzazione balistica di StarRoad. Una flotta robotizzata di microfresche scava l'intero complesso.

4.1.5. Sistema di tunnel tecnici laterali perpendicolari

A sostegno di costruzione, ventilazione, riparazione ed evacuazione, lungo il tracciato vengono realizzati 40 tunnel di trasporto inclinati, a intervalli di 50 km. Ciascuno ha un'inclinazione di 30° e una sezione ellissoidale di circa 17,5 × 12,5 m. Sono scavati dalle stesse frese impiegate per il tunnel principale e collegano la superficie al corridoio principale a profondità fino a 8 km.

- **Logistica:** offrono al personale e all'equipaggio una via di evacuazione indipendente durante un arresto d'emergenza Alarm-2. A differenza di un pozzo verticale, un tunnel inclinato consente a veicoli semoventi di evacuare decine di persone in un solo viaggio.
- **Sicurezza:** forniscono una seconda via di evacuazione indipendente per personale ed equipaggio durante un arresto d'emergenza Alarm-2.
- **Scalabilità:** i tunnel inclinati preparano il collegamento di future linee StarRoad parallele. Da essi potranno essere scavati rami orizzontali verso nuovi acceleratori, trasformando la rete di accessi in un'ossatura di trasporto in continua crescita.
- **Integrazione con il sistema geotermico autonomo.** Sotto ogni tunnel inclinato vengono scavati collettori altri 10–20 m più in basso per precongellare e stabilizzare la roccia durante la costruzione e poi generare energia.
- **Complesso terminale di superficie.** Ogni tunnel inclinato termina in un terminale multifunzionale. Ciascuno dei 40 terminali è un nodo indipendente che comprende:
 - **ventilazione e depurazione** dei gas per mantenere l'ambiente del tunnel e rimuovere l'aria esausta;

- **una base di** cantiere con aree di deposito, trasbordo e stoccaggio temporaneo di moduli, materiale scavato e forniture;
 - **un edificio operativo e** residenziale per il personale a turni, con sale di controllo e riposo, officine e magazzini;
 - **una centrale geotermica e impianti di raffreddamento** integrati nel sistema geotermico autonomo, che utilizzano e controllano il fluido termovettore dei collettori profondi;
 - **una stazione di cattura e** trattamento della CO₂ mediante cattura diretta dall'aria (DAC), che chiude il ciclo: la CO₂ estratta viene liquefatta, purificata e inviata come fluido termovettore ai collettori profondi;
 - **un collegamento alle reti esterne di energia e comunicazione**, con alimentazione di riserva e connessione a banda larga.
 - **accessi** stradali o raccordi ferroviari alla rete regionale;
 - **un punto di** evacuazione in superficie dotato di presidio medico d'emergenza ed elisuperficie.
- **Flessibilità giuridica e** ambientale. I tunnel tecnici inclinati permettono di collocare i terminali fuori da parchi nazionali, riserve e bacini protetti anche se StarRoad passa in profondità sotto di essi. Si elimina il principale ostacolo giuridico senza costruire nei parchi. Ogni terminale occupa il terreno non protetto più vicino ed è collegato da un pozzo inclinato, semplificando le autorizzazioni, riducendo la pressione ambientale ed evitando effetti diretti sugli ecosistemi protetti.

4.1.6. Alimentazione e accumulo dell'energia

L'alimentazione dell'acceleratore StarRoad è organizzata come una rete a tre livelli che garantisce:

- ridondanza: il guasto di un singolo elemento non arresta il sistema;
 - velocità di scarica adattiva: da secondi all'inizio a microsecondi alla fine;
 - cavi di potenza quanto più corti possibile, per ridurre perdite e induttanza.
- **Livelli della topologia**
- Livello 0: accumulatori primari nei terminali**
- I 40 terminali dispongono di accumuli gravitazionali, impianti idroelettrici a pompaggio — microcentrali sul canale — e batterie agli ioni di litio (BESS).
 - Capacità totale per terminale: circa 5–9 GWh; circa 360 GWh per l'intera linea.
 - Uscita: corrente continua ad alta tensione, fino a 100 kV, trasmessa al tunnel tecnico mediante cavi dorsali.
- Livello 1: controllori dei segmenti da 50 km**
- Il tracciato è diviso in 41 segmenti da 50 km; l'ultimo corrisponde ai 50 km che precedono il portale.
 - Ogni segmento possiede un controllore principale di distribuzione alimentato da due terminali vicini, assicurando ridondanza incrociata.
 - Il controllore distribuisce l'energia fra blocchi da 1 km e ne sincronizza il funzionamento.
- Livello 2: blocchi energetici chilometrici.** Ogni blocco chilometrico dispone di un controllore locale che:
- riceve energia dal controllore di segmento;
 - gestisce batterie tampone agli ioni di litio poste sotto le pareti del tunnel principale;
 - gestisce gruppi commutabili di avvolgimenti collegati tramite volani e supercondensatori, installati in nicchie dietro le pareti.
- Due canali indipendenti dal controllore di segmento a ciascun blocco chilometrico garantiscono la ridondanza.
- **Architettura dei cavi**
- **Cavi dorsali, livello 0→1:** sono installati nel tunnel tecnico di 3 m che corre parallelo a quello principale, a 3 m di distanza.

- **Distribuzione lungo il tracciato:** da ogni terminale i cavi percorrono 50 km in entrambe le direzioni, 100 km in totale, sovrapponendosi alle zone dei terminali vicini. Ogni segmento riceve quindi energia da almeno due terminali e dispone di una ridondanza del 100%.
- **Ingresso nel tunnel principale:** ogni chilometro, i cavi passano dal tunnel tecnico a quello principale attraverso attraversamenti sigillati e si collegano al controllore del blocco chilometrico.
- **Distribuzione nel blocco:** dopo il controllore, l'alimentazione si divide in due percorsi paralleli:
 - percorso A:** batterie tampone agli ioni di litio, circa 0,5–1 GWh per blocco, per livellare i picchi della durata di secondi;
 - percorso B:** gruppi commutabili di avvolgimenti alimentati tramite volani e supercondensatori dietro le pareti del tunnel.
- **Adattamento a tre zone della velocità di scarica.** Il profilo di accelerazione della navetta è ottimizzato affinché la potenza di picco per gruppo di avvolgimenti sia massima all'inizio, dove non sono richiesti impulsi ultrabrevi, e diminuisca verso la fine del tracciato. Ciò consente di impiegare tecnologie diverse di accumulo e commutazione nelle tre zone:

Zona	Tratto del percorso	Tipo di scarica	Accumulo / commutazione	Motivo
Zona I — bassa velocità	0–200 km	Da secondi a millisecondi	Batterie agli ioni di litio e inverter IGBT convenzionali	La navetta si muove lentamente e impiega più di 0,1 s a percorrere un chilometro. Le BESS possono alimentare la linea senza accumulatori intermedi.
Zona II — velocità media	200–1.000 km	Da millisecondi a microsecondi	Batterie tampone agli ioni di litio, volani e inverter SiC	La navetta accelera; la commutazione deve diventare più rapida, ma è ancora possibile usare volani meccanici.
Zona III — alta velocità	1.000–2.000 km	Impulsi di microsecondi	Supercondensatori e interruttori rapidi a tiristori GTO/IGCT	Il tempo necessario per percorrere un chilometro scende a 0,09 s. Soltanto supercondensatori con risposta nell'ordine dei nanosecondi possono stabilizzare l'impulso.

Importante: l'energia richiesta per chilometro nella zona III è inferiore a quella della zona I perché l'accelerazione diminuisce. Il carico sui componenti cala nonostante la maggiore rapidità di scarica richiesta.

- **Ridondanza e resistenza alle emergenze**
 - **Controllori duplicati:** ogni controllore di segmento e chilometrico ha una riserva attiva, cioè due schede identiche con alimentazioni indipendenti.
 - **Alimentazione incrociata:** ogni blocco chilometrico può ricevere energia sia dal proprio controllore di segmento sia da quelli vicini, mediante cavi di riserva nel tunnel tecnico.
 - **Ridondanza locale degli avvolgimenti:** ogni blocco ha tre gruppi indipendenti usati a turno. Se uno è danneggiato, gli altri due continuano ad accelerare con minore efficienza, ma senza arrestare il sistema.
 - **Disconnessione d'emergenza:** se rileva un cortocircuito o un surriscaldamento, il controllore chilometrico interrompe l'alimentazione del proprio blocco e lo isola con paratie fra le sezioni, senza influire sui blocchi vicini.
- **Realizzazione materiale e conclusioni**

Elemento	Ubicazione	Funzione
Accumulatori primari	In superficie, nei terminali	Accumulo energetico di lunga durata, 360 GWh.
Cavi dorsali	Tunnel tecnico di 3 m	Trasmissione ridondante dell'energia dai terminali ai segmenti.
Controllori di segmento	Nicchie nel tunnel principale ogni 50 km	Distribuzione dell'energia fra 10 blocchi chilometrici e sincronizzazione.
Batterie tampone agli ioni di litio	Sotto le pareti del tunnel principale	Livellamento dei picchi della durata di secondi nelle zone I e II.
Volani	Dietro le pareti del tunnel, zona II	Tampone per impulsi nell'ordine dei millisecondi.
Supercondensatori	Dietro le pareti del tunnel, zona III	Stabilizzazione nell'ordine dei microsecondi e compensazione dei cali.

Elemento	Ubicazione	Funzione
Controllori locali chilometrici	In nicchie ogni 1 km	Gestione della commutazione degli avvolgimenti, monitoraggio dello stato e controllo degli accumulatori.
Avvolgimenti dell'acceleratore	Superficie interna del tunnel	Creazione del campo magnetico viaggiante che accelera la navetta.

○ **Vantaggi dell'architettura energetica**

- **Distribuzione graduale del carico.** La potenza massima non è richiesta contemporaneamente lungo tutto il tunnel: impulsi lenti all'inizio e brevi ma meno potenti alla fine.
- **Ridondanza a tutti i livelli.** Il guasto di un terminale, di un controllore o persino di un intero segmento da 50 km non arresta il sistema: terminali e segmenti vicini compensano l'energia mancante.
- **Flessibilità di espansione.** Aggiungere linee StarRoad parallele non richiede di ricostruire la rete energetica; basta installare altri cavi dorsali nel tunnel tecnico esistente.
- **Ottimizzazione dei costi.** I costosi supercondensatori e volani sono impiegati solo dove servono, nei tratti finali; all'inizio bastano batterie agli ioni di litio più economiche.

4.2. Portale atmosferico (terminale ad alta quota)

Risolve il problema dell'«ultimo miglio».

4.2.1. Ubicazione e costruzione

Il complesso del portale sorge sull'altopiano sommitale del monte Mohi, a circa 3.400 m di quota, nella Repubblica Democratica del Congo. Un vasto altopiano 16 km più a sud è riservato a future espansioni con decine di portali paralleli. La struttura massiccia comprende una chiusura meccanica principale e sistemi che generano una barriera gasdinamica. In pratica assomiglia a un motore a reazione terrestre fisso, dotato di un triplo ugello anulare inclinato verso il cielo, non per accelerare un corpo, ma per spostare l'atmosfera e creare un cuscino quando la navetta vi entra.

4.2.2. Barriera gasdinamica

Elemento operativo principale. Alcuni secondi prima dell'arrivo della navetta, il sistema crea un flusso conico di gas supersonico diretto verso l'esterno lungo l'asse del tunnel.

- **Fonte e configurazione:** tre motori a reazione anulari concentrici e indipendenti, oppure statoreattori ipersonici equivalenti a tre corone, circondano l'apertura del portale e funzionano con una miscela aria-idrogeno. L'idrogeno è prodotto sul posto mediante elettrolisi. Due corone qualsiasi bastano a formare una barriera efficace, perciò il sistema resta operativo se la terza si guasta. Ogni corona dispone di alimentazione del combustibile, controllo e accensione propri. Le corone sono disposte a gradini attorno all'esterno del portale, dalla più piccola alla più grande in posizioni progressivamente arretrate. La chiusura meccanica si trova all'interno del portale, dietro la cascata, consentendo di accendere le corone prima di aprirla.
- **Funzioni principali :**

1) creare una pressione diretta verso l'esterno che protegga il vuoto del tunnel durante il passaggio della navetta;

2) spostare e preriscaldare l'aria davanti all'uscita per stabilire un gradiente tra il vuoto del tunnel e l'atmosfera, formando una transizione graduale fra i due mezzi.

La barriera gasdinamica non è una protezione aerodinamica della navetta e non la scherma dall'atmosfera. La sua funzione è distribuire nel tempo il passaggio tra i due mezzi: un urto quasi istantaneo, nell'ordine dei microsecondi, contro aria fredda e ferma diventa un carico ripartito su millisecondi quando il veicolo entra in un flusso caldo concorde. Le forze aerodinamiche complessive non diminuiscono, ma si riducono nettamente la bruschezza e le componenti ad alta frequenza, limitando il rischio di danni locali e shock termico.

- **Forma del flusso:** cono a sezione ellittica corrispondente al tunnel e alla navetta, lungo da decine a centinaia di metri e proiettato verso l'esterno da tre file di ugelli anulari del portale.

La barriera gasdinamica non deve formare un cono geometricamente perfetto, stazionario o rigorosamente assialsimmetrico. Il suo regime è intrinsecamente dinamico e ammette variazioni temporali e spaziali di forma, densità e velocità.

L'unica condizione rigida è mantenere durante tutta l'uscita un gradiente positivo di pressione e quantità di moto, diretto verso l'esterno, che impedisca completamente l'ingresso di aria atmosferica nel tunnel. La preparazione gasdinamica e termica preventiva della zona di uscita aumenta sensibilmente l'affidabilità e la fattibilità del sistema.

La forma del flusso è quindi un parametro adattivo, non una grandezza obiettivo. Viene ottimizzata in tempo reale in base a caratteristiche integrali — pressione, portata massica e quantità di moto — e non secondo una geometria imposta.

- **Scalabilità e prove: a differenza** dell'acceleratore lungo migliaia di chilometri, il portale è modulare e facilmente scalabile. Le tecnologie decisive — formazione di un cono gasdinamico supersonico stabile, sincronizzazione e funzionamento delle corone a reazione — possono essere convalidate integralmente su banchi funzionali in scala 1:5 o 1:10. Ciò consente di eliminare i principali rischi tecnici prima della costruzione della linea a grandezza naturale.

4.2.3. Sistema di sicurezza

L'impiego dell'idrogeno impone requisiti più severi contro incendi ed esplosioni. L'intera infrastruttura comprende rilevamento ridondante delle perdite, spurgo inerte delle tubazioni con azoto, apparecchiature antideflagranti, separazione fisica tra elettrolizzatori, depositi e corone propulsive, oltre a condotti di ventilazione orientati che scaricano eventuali emissioni lontano dal personale e dagli impianti critici.

4.3. Navetta (AstroLiner)

4.3.1. Dimensioni e massa al lancio

Lunghezza di circa 150 m e sezione ellissoidale di circa 10×15 m. La forma è un cuneo ipersonico ottimizzato per ridurre la resistenza e il carico termico durante l'attraversamento dell'atmosfera.

- **Massa ottimale al lancio: circa 15.000 tonnellate.**

Le 15.000 tonnellate derivano dalla ricerca di un optimum tecnico-economico posto al giusto equilibrio fra limiti fisici e possibilità realizzative.

Criterio	Limite inferiore (< 8.000–10.000 t)	Optimum (15.000 t)	Limite superiore (> 20.000–25.000 t)
Aerodinamica e accelerazioni	L'atmosfera domina. La resistenza $F_d = \rho \cdot A \cdot v^2$ produce accelerazioni elevate, $a = F_d/m$, richiede una stabilizzazione attiva complessa e genera picchi di carico termico.	L'inerzia domina. La resistenza atmosferica provoca accelerazioni iniziali brevi — fino a 5 secondi e circa 3–6 g — compatibili con sistemi di smorzamento e protezione termica più semplici.	Le accelerazioni diminuiscono poco, mentre altri fattori annullano i vantaggi.
Regime termico	Bassa capacità termica. Una piccola massa m si riscalda rapidamente secondo $\Delta T = Q \cdot t / (m \cdot c)$ e richiede sistemi estremi di raffreddamento attivo.	Elevata inerzia termica. La struttura massiccia assorbe e distribuisce il picco di calore del breve attraversamento atmosferico, consentendo di combinare protezione passiva e attiva.	La capacità termica cresce, ma l'estrazione del calore da una struttura tanto massiccia diventa un problema distinto.
Energia di lancio	L'energia richiesta, $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$, è accettabile ma non compensa gli altri svantaggi.	Equilibrio ragionevole. Accelerare fino a 11 km/s richiede circa 9×10^{14} J, pari a 252 GWh, entro le possibilità del sistema geotermico autonomo distribuito e dei suoi accumulatori.	Il consumo energetico cresce linearmente e richiede aumenti sproporzionati di potenza e capacità di accumulo, diventando antieconomico.
Costruzione e logistica	È realizzabile, ma non offre il vantaggio fondamentale dell'«ariete inerziale».	Compatibile con tecnologie esistenti. Dimensioni e massa rientrano nelle capacità odierne dei cantieri navali, della saldatura industriale e del trasporto pesante.	La struttura perde rigidità; sorgono problemi di modi propri, assemblaggio e trasporto fino al punto di partenza. I costi crescono più che linearmente.
Filosofia di StarRoad	Rimane nel paradigma del «veicolo leggero», vulnerabile all'atmosfera.	Realizza il paradigma dell'«ariete inerziale»: l'atmosfera non è più una barriera, ma una perturbazione breve superata grazie alla massa e alla robustezza strutturale.	Diventa un compito fuori dalla portata dell'industria e annulla le economie di scala.

- **Fisicamente:** al di sopra della soglia di circa 10.000 t oltre la quale l'inerzia comincia a dominare gli effetti aerodinamici.
- **Energeticamente:** non determina una crescita esponenziale delle esigenze infrastrutturali.
- **Tecnologicamente:** rimane entro pratiche industriali scalabili, come la cantieristica navale e la meccanica pesante.
- **Economicamente:** bilancia la riduzione del costo di messa in orbita ottenuta con la scala e il contenimento dell'investimento iniziale.

Questa massa è quindi un **optimum calcolato che rende StarRoad fisicamente realizzabile ed economicamente giustificabile.**

4.3.2. Configurazione e sistemi

L'intera architettura interna è organizzata come una struttura longitudinale multilivello, con le funzioni separate secondo l'altezza dello scafo.

- **Le parti inferiore e posteriore** sono interamente riservate a energia e propulsione: reattore di bordo, scambiatori, circuiti di raffreddamento attivo, convertitori di potenza, accumulatori, condotte del fluido termovettore e propulsione marina. Questa disposizione abbassa il baricentro, migliora la stabilità nel volo ipersonico, nella planata e nell'ammarraggio, e semplifica la protezione termica e radiologica dei compartimenti superiori.
- **Il sistema superconduttore di levitazione e** stabilizzazione corre lungo le fiancate e in parte sul fondo. I moduli sono fissati subito dietro il rivestimento esterno e la protezione termica, riducendo la distanza dagli avvolgimenti passivi del tunnel. I magneti sono collocati:
 - lungo entrambe le fiancate per tutta la lunghezza, comprese le zone superiore e mediana fino alla linea dei portelli scorrevoli;
 - nelle parti mediana e posteriore del fondo;
 - escluse le uscite delle ali principali e le sedi meccaniche.

Questa distribuzione genera un campo uniforme, grande stabilità a velocità ipersonica e tolleranza ai danni locali.

- **La parte centrale** contiene le sedi delle ali ripiegabili e la loro struttura portante. Le ali principali rientrano nello scafo e sono isolate dai compartimenti energetici e di carico. La zona centrale anteriore ospita piccole superfici di controllo retrattili per correggere e stabilizzare la traiettoria nei regimi transitori.
- **La parte superiore** accoglie un modulo universale e intercambiabile per il carico utile. Dimensioni, punti di fissaggio, massa e intervallo ammesso del baricentro sono standardizzati; il modulo può essere configurato per merci, carburante, passeggeri o uso misto. Viene installato e rimosso nel bacino prima del lancio e può essere movimentato anche in orbita dopo l'apertura dei portelli superiori. Un elevatore idraulico o elettromeccanico integrato e apposite guide consentono di estrarre automaticamente i moduli in microgravità, senza equipaggio.
- **I portelli superiori** scorrevoli non fanno parte della struttura resistente; fungono da carenatura aerodinamica e accesso orbitale. Integrano pannelli radianti ripiegabili. Una volta completamente aperti e bloccati, i pannelli si dispiegano automaticamente e ricevono il fluido refrigerante per irradiare il calore in eccesso nel vuoto.
- **La parte anteriore** della navetta è organizzata su più livelli funzionali:
 - zona superiore: plancia, controllo, navigazione e comunicazioni;
 - zona mediana: meccanismi delle piccole ali retrattili e superfici di controllo;
 - zona inferiore: serbatoi criogenici di combustibile e refrigerante, disposti per ridurre la resistenza idraulica e fornire rapidamente il fluido al raffreddamento attivo del muso durante l'attraversamento atmosferico.

Questa disposizione accorcia i circuiti termici e idraulici, riduce l'inerzia termica del muso e aumenta l'affidabilità della protezione nella fase più gravosa. Nel complesso, la navetta adotta un'architettura rigida, modulare e scalabile,

ottimizzata per il lancio ipersonico, le operazioni orbitali, la navigazione autonoma e numerosi riutilizzi senza smontare profondamente lo scafo.

4.3.3. Protezione termica dello scafo

Il muso e il fondo ricevono una protezione termica multistrato, metallica e composita, dimensionata per i carichi termici e dinamici estremi del volo ipersonico e del successivo ammaraggio. Combina elementi passivi e attivi:

- uno strato esterno resistente al calore, capace di sopportare brevemente temperature di migliaia di gradi e un intenso riscaldamento radiativo;
- un sottostrato metallico portante che assorbe i carichi meccanici e vibratorii;
- circuiti di raffreddamento attivo che sottraggono calore alle zone più sollecitate, soprattutto il muso e il bordo anteriore del fondo;
- elementi ablativi sostituibili nei punti critici, progettati per consumarsi in modo controllato senza danneggiare la struttura principale.

La protezione tiene conto dello shock termico quando lo scafo caldo entra in contatto con l'acqua durante l'ammarraggio, compresi gradienti bruschi e sollecitazioni termiche cicliche. Gli elementi più sollecitati sono segmentati e sostituibili in modo modulare durante la manutenzione, migliorando riparabilità e durata nei riutilizzi.

4.3.4. Ali

La navetta possiede due coppie di ali retrattili per stabilizzazione, planata e ammaraggio. Si dispiegano quando il veicolo raggiunge gli strati rarefatti dell'atmosfera.

- **La coppia anteriore** corregge la traiettoria, stabilizza beccheggio e rollio e smorza le perturbazioni dinamiche. Si dispiega negli strati rarefatti per la planata.

Parametri di ciascuna ala anteriore:

- lunghezza dalla radice: circa 35 m;
- corda alla radice / all'estremità: circa 14 / 7 m;
- superficie: circa 360–400 m².

- **La coppia posteriore** costituisce la principale superficie aerodinamica della navetta.

Parametri di ciascuna ala posteriore:

- lunghezza dalla radice: circa 100 m;
- corda alla radice / all'estremità: circa 14 / 7 m;
- superficie: circa 1.000–1.100 m².

La superficie alare totale è di circa 2.800–2.900 m². La forma portante dello scafo aumenta la superficie aerodinamica effettiva di un ulteriore 20–30%.

In regime subsonico, la configurazione offre un rapporto portanza/resistenza L/D di circa 9–13, sufficiente per una planata stabile e una scelta controllata del punto di ammaraggio. Le velocità tipiche di planata e contatto sono stimate in 90–120 m/s, circa 320–430 km/h. A tali velocità la sicurezza dipende meno dalla velocità orizzontale assoluta che dalla velocità verticale al contatto, dall'angolo d'attacco e dal profilo di discesa.

4.3.5. Sistemi di paracadute

Per ridurre l'urto all'ammarraggio e ampliare la finestra ammissibile, la navetta dispone di un sistema riutilizzabile di paracadute parafoil, impiegato come circuito condizionale di atterraggio morbido.

- **Architettura e collocazione:** sono previste due postazioni parafoil:
 - una nella **parte superiore posteriore** ;
 - una nella **parte superiore anteriore** , subito dietro il muso.

Ogni postazione segue uno schema **N+1** — parafoil principale e di riserva — con imballaggi e linee di estrazione indipendenti. Le vele non sono fissate in un solo punto, ma **mediante una linea trasversale**

collegata alle ordinate portanti, riducendo i picchi locali e stabilizzando beccheggio e rollio. I due gruppi sono distanziati longitudinalmente per evitare interferenze e impigliamenti.

- **Superfici e funzionamento:** i parafoil non sostengono l'intero peso del veicolo; smorzano la velocità verticale nella fase finale e creano un contatto dolce. Valori indicativi:
 - superficie di ciascun parafoil principale: circa **4.500–6.000 m²** ;
 - superficie attiva totale dei due parafoil: circa **9 .000–12.000 m²** .

La velocità verticale prevista al contatto è $-V_z \approx 1 \text{ m/s}$.

- **Criterio di attivazione:** il sistema viene impiegato solo quando **necessario**. L'**algoritmo** di ammaraggio considera l'**accelerazione** totale , somma vettoriale delle componenti aerodinamica, inerziale e idrodinamica:
 - se l'accelerazione totale prevista al contatto **non supera** 4 g, la navetta **ammara sulle ali senza** parafoil;
 - se **vi è** rischio di **superare** 4 g, il sistema si attiva, riduce la componente verticale al valore obiettivo e instaura una discesa morbida.
- **Riutilizzo: parafoil**, funi e attacchi sono progettati per numerosi impieghi con manutenzione programmata — ispezione, asciugatura e sostituzione delle parti soggette a usura — senza smontare la struttura portante dello scafo.

4.3.6. Sistema autonomo di potenza e propulsione

La navetta possiede un sistema energetico e propulsivo completamente autonomo per l'intero ciclo di missione, dalle manovre orbitali a diversi mesi di navigazione indipendente.

- **Fonte primaria di energia: reattore nucleare di bordo.**
 - **Tipo:** reattore veloce compatto a sali fusi o reattore di nuova generazione ad alta temperatura raffreddato a gas; in futuro, un modulo compatto a fusione, per esempio a compressione di campo come quello di Helion Energy.
 - **Potenza:** 10–20 MW elettrici e 50–100 MW termici.
 - **Funzione:** alimentare tutti i sistemi di bordo, gli elementi superconduttori della levitazione, i **propulsori elettromagnetici al plasma** , il raffreddamento attivo e la **propulsione marina autonoma** . Il reattore funziona senza ricarica per l'intera vita della navetta, da 5 a 10 anni.
- **Sistema superconduttore di bordo per levitazione e** stabilizzazione. Moduli criogenici con superconduttori ad alta temperatura, raffreddati da azoto o idrogeno liquido dei sistemi di bordo, sono integrati lungo lo scafo. Il loro potente campo principale assicura levitazione e stabilizzazione attiva. Anche in caso di perdita totale dell'alimentazione esterna del tunnel, l'interazione induttiva con gli avvolgimenti passivi che fungono da «rotaie» mantiene la sospensione per effetto di specchio magnetico.

Il controllo della stabilizzazione è gerarchico:

- 1) **anello passivo**, microsecondi: l'accoppiamento induttivo fra superconduttori e avvolgimenti del tunnel genera automaticamente una forza di richiamo a ogni spostamento, senza elettronica;
- 2) **anello hardware**, da microsecondi a millisecondi: circuiti FPGA e ASIC specializzati rilevano gli squilibri e commutano le sezioni con algoritmi deterministici;
- 3) **anello software**, da millisecondi a decine di millisecondi: il calcolatore di bordo, con supporto limitato dell'IA, ridistribuisce le correnti fra le sezioni superconduttrici per compensare derive lente e squilibri locali, senza richiedere reazioni nell'ordine dei nanosecondi.

Questa architettura reagisce ai disturbi in millisecondi, diversi ordini di grandezza più rapidamente di quanto richieda la stabilità di una navetta da 15.000 tonnellate a velocità ipersonica.

- **Propulsori principali : propulsori elettromagnetici al plasma ad alta spinta.**
 - **Principio:** propulsori magnetoplasmodinamici o a impulso specifico variabile, come VASIMR, alimentati dal reattore di bordo.
 - **Spinta:** fino a 50–100 kN, equivalenti a 5–10 tonnellate-forza, in regime impulsivo; sufficiente per correzioni orbitali, deorbitazione e trasferimenti fra orbite.

- **Propellente:** riserva di xeno, argon o idrogeno liquido, utilizzato anche per il raffreddamento.
- **Autonomia:** l'IA di bordo calcola ed esegue autonomamente le manovre di attracco alle stazioni orbitali, scarico e ritorno.
- **Gestione termica :**
 - **radiatori dispiegabili:** pannelli con circuito liquido aperti nello spazio per irradiare nel vuoto il calore in eccesso del reattore e delle apparecchiature;
 - **accumulatori termici a cambiamento di fase:** elementi critici posti nel muso e in altri punti sollecitati. Assorbono picchi di diversi megajoule durante l'attraversamento atmosferico in uscita e al rientro, quindi cedono lentamente il calore attraverso i radiatori nello spazio o all'ambiente nell'oceano;
 - **raffreddamento attivo: circuito** chiuso a elio o idrogeno liquido per il raffreddamento d'emergenza dello scudo termico e degli elementi critici in volo.
- **Ridondanza e sicurezza: controlli** del reattore duplicati, circuiti di raffreddamento indipendenti e mezzi d'emergenza per dissipare il calore. Il progetto mantiene la sicurezza in qualsiasi scenario, compresa una caduta nell'oceano.

4.3.7. Sistemi autonomi di ammaraggio e navigazione marittima

Dopo l'amaraggio nella zona prevista dell'Atlantico, la navetta passa a operare come nave completamente autonoma. Utilizza:

- **propulsione marina:** due propulsori azimutali retrattili o due idrogetti, altamente manovrabili a bassa velocità;
- **energia per la navigazione:** il reattore nucleare o a fusione di **bordo alimenta propulsori e sistemi** al regime minimo. Il suo nocciolo consente traversate autonome di diversi mesi;
- **navigazione e comunicazioni :** navigazione satellitare GPS/GLONASS e inerziale, radar e lidar per riconoscere l'ambiente marittimo, più un collegamento affidabile attraverso satelliti geostazionari;
- **frenata finale: poco prima del** contatto, la velocità residua di 100–150 km/h viene ridotta da un piccolo paracadute frenante , che **stabilizza e avvia la** decelerazione, e da un breve impulso dei propulsori **principali al plasma, che regola con** precisione la velocità verticale. Il paracadute **viene sganciato dopo l'amaraggio;**

Questa configurazione consente alla navetta **di raggiungere autonomamente** il porto base o un rimorchiatore senza assistenza immediata. Può **affrontare il mare in tempesta**, compiere lunghe traversate e arrivare al bacino assegnato per la manutenzione programmata, trasformandosi da veicolo **spaziale in nave** robotizzata.

4.3.8. AstroLiner-S: versione iniziale semplificata

Nelle prime fasi di StarRoad verrà impiegata una versione iniziale della navetta, AstroLiner-S — Simplified / Start — come configurazione di base, tecnologicamente più semplice e operativamente più prudente.

Questa variante è pienamente funzionale ma semplifica l'energia e altri sistemi. È destinata alla messa in servizio iniziale, ai primi lanci cargo e con equipaggio e alla riduzione graduale dei rischi tecnici, operativi e normativi.

- **Idea centrale di AstroLiner -S:** applicare il paradigma fondamentale di StarRoad — attraversare l'atmosfera **per inerzia** — **senza una fonte nucleare o a fusione a bordo, conservando** integralmente dimensioni e massa di lancio della versione principale .

Tutte le operazioni che richiedono potenze estreme — accelerazione, levitazione e stabilizzazione nel tunnel — sono interamente affidate all'infrastruttura terrestre.

AstroLiner-S è:

- un veicolo di trasporto autonomo;
- completamente riutilizzabile;
- capace di raggiungere l'orbita, lasciarla e rientrare con mezzi propri;
- propulso esclusivamente da motori chimici fuori dal tunnel;
- privo di sorgenti di radiazioni ionizzanti ad alta potenza a bordo.
- **Energia e sistemi superconduttori: la configurazione** AstroLiner-S elimina completamente:

- gli impianti nucleari e a fusione;
- i relativi rischi radiologici, termici e accidentali;
- gli scenari di contaminazione irreversibile del tunnel e dei tratti del portale.

Gli elementi superconduttori per levitazione, stabilizzazione e interazione con la via:

- vengono precaricati di corrente prima del lancio;
- sono posti in regime persistente;
- sono isolati fra loro e controllati dal sistema di bordo.

Batterie e accumulatori inerziali a volano alimentano elettronica, controlli e protezioni per l'intero ciclo di accelerazione nel tunnel, con margine temporale.

Durante l'accelerazione, il controllo attivo dei circuiti superconduttori è limitato a piccole correnti correttive e alle modalità d'emergenza, eliminando la necessità di una sorgente continua ad alta potenza a bordo.

In orbita si impiegano pannelli solari ripiegabili come fonte attiva di elettricità.

○ **Propulsione fuori dal tunnel**

Tutte le operazioni orbitali di AstroLiner-S utilizzano propulsione chimica.

La navetta dispone di:

- motori chimici principali a spinta media, di tipo LOX/LH₂ o LOX/LCH₄;
- sistemi ridondanti di controllo d'assetto e d'emergenza (RCS).

La propulsione consente:

- di completare l'inserimento nell'orbita obiettivo dopo l'uscita dall'atmosfera;
- di correggere i parametri orbitali;
- di lasciare l'orbita;
- di effettuare un rientro controllato e tornare.

L'assenza di propulsori elettrici e magnetoplasmatici in questa versione deriva dalla mancanza di una sorgente elettrica di bordo ad alta potenza; non costituisce un limite dell'architettura generale.

○ **Rientro e riutilizzo**

AstroLiner-S può:

- lasciare autonomamente l'orbita;
- effettuare un rientro atmosferico controllato e a bassa pendenza;
- planare aerodinamicamente;
- ammarare mediante le ali e il sistema di parafoil.

L'assenza del reattore semplifica notevolmente:

- l'impiego marittimo;
- la manutenzione programmata;
- il ripristino del veicolo dopo ammaraggi imprevisti.

○ **Ruolo di AstroLiner- S nello sviluppo di StarRoad**

AstroLiner-S è concepito come:

- la prima versione prodotta in serie della navetta StarRoad;
- una piattaforma per accumulare statistiche su lanci e guasti;
- un mezzo per anticipare l'entrata in servizio del sistema;
- il trasporto di base della prima infrastruttura orbitale.

Con l'avanzare del progetto, la comparsa di sorgenti compatte ad alta potenza e l'accumulo di esperienza operativa, AstroLiner-S potrà essere progressivamente integrato o sostituito dall'AstroLiner completo, dotato di impianti energetici di bordo e propulsori elettromagnetici al plasma.

AstroLiner-S non è quindi un compromesso, ma un primo livello logico che permette di mettere in servizio StarRoad prima, con maggiore sicurezza e minori rischi sistemici, senza modificare l'architettura fondamentale della linea.

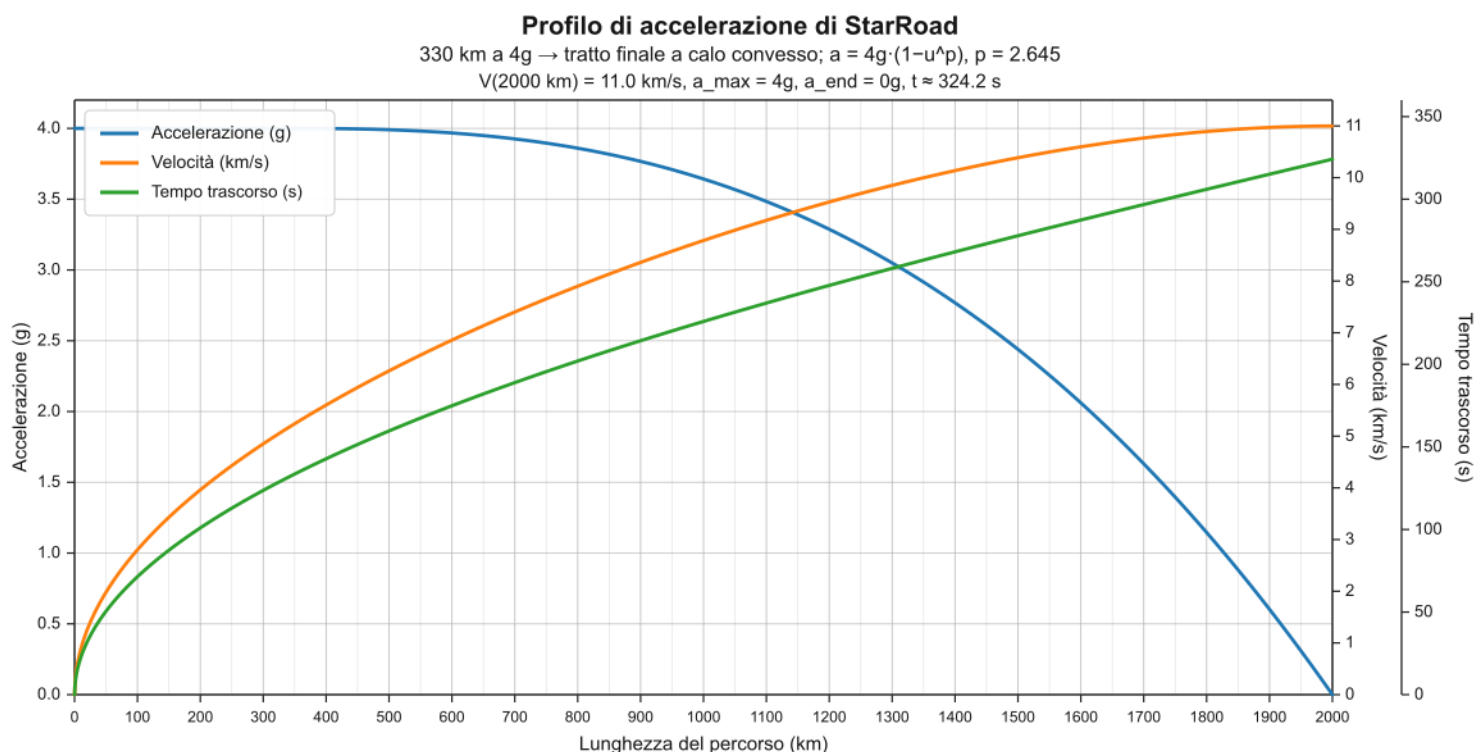
5. Ciclo operativo: dalla preparazione del lancio alla manutenzione dopo l'ammarraggio

5.1. Preparazione e lancio

La navetta carica viene collocata nella camera di lancio presso Batanga. Si collaudano prima i sistemi di bordo e poi quelli dell'acceleratore. Segue la prova pre-lancio del portale gasdinamico. I superconduttori di bordo vengono energizzati, quindi si avvia e si verifica la levitazione magnetica. Il tunnel è già sotto vuoto. Al comando di lancio inizia l'alimentazione impulsiva dei primi segmenti dell'acceleratore.

5.2. Accelerazione nel tunnel

- **0–330 km. L'accelerazione** longitudinale iniziale è di $\sim 4g$. Una parte rilevante dell'energia serve alla levitazione e a contrastare la gravità.
- **330–~1.800 km, tratto discendente della curva a S.** L'accelerazione longitudinale diminuisce gradualmente dai $4g$ iniziali fino a zero. Attraversando le curve sotterranee, la navetta subisce carichi fino a $\sim 4g$. Gli elementi elettromagnetici circostanti stabilizzano la traiettoria.
- **~1.800–2.050 km, tratto ascendente della curva a S.** L'accelerazione scende a zero avvicinandosi al portale. Negli ultimi 50 km la navetta procede per inerzia a ~ 11 km/s.



5.3. Uscita attraverso il portale atmosferico

- Grazie all'elevata quota del punto di lancio, la navetta supera i 10 km sul livello del mare già a ~ 30 km dal portale, riducendo al minimo l'effetto dell'onda d'urto sul territorio. Un minuto prima del lancio della navetta, gli anelli del portale gasdinamico vengono attivati in prova senza aprire la chiusura meccanica. Quando la navetta ha percorso il 45% del tunnel, attraverso gli anelli viene immesso un flusso supersonico di aria compressa accumulata dalle pompe dell'ultima sezione durante la creazione del vuoto. Circa 10 secondi prima del passaggio della navetta, si inietta idrogeno e si attiva la barriera gasdinamica nel regime principale di combustione, creando un flusso supersonico

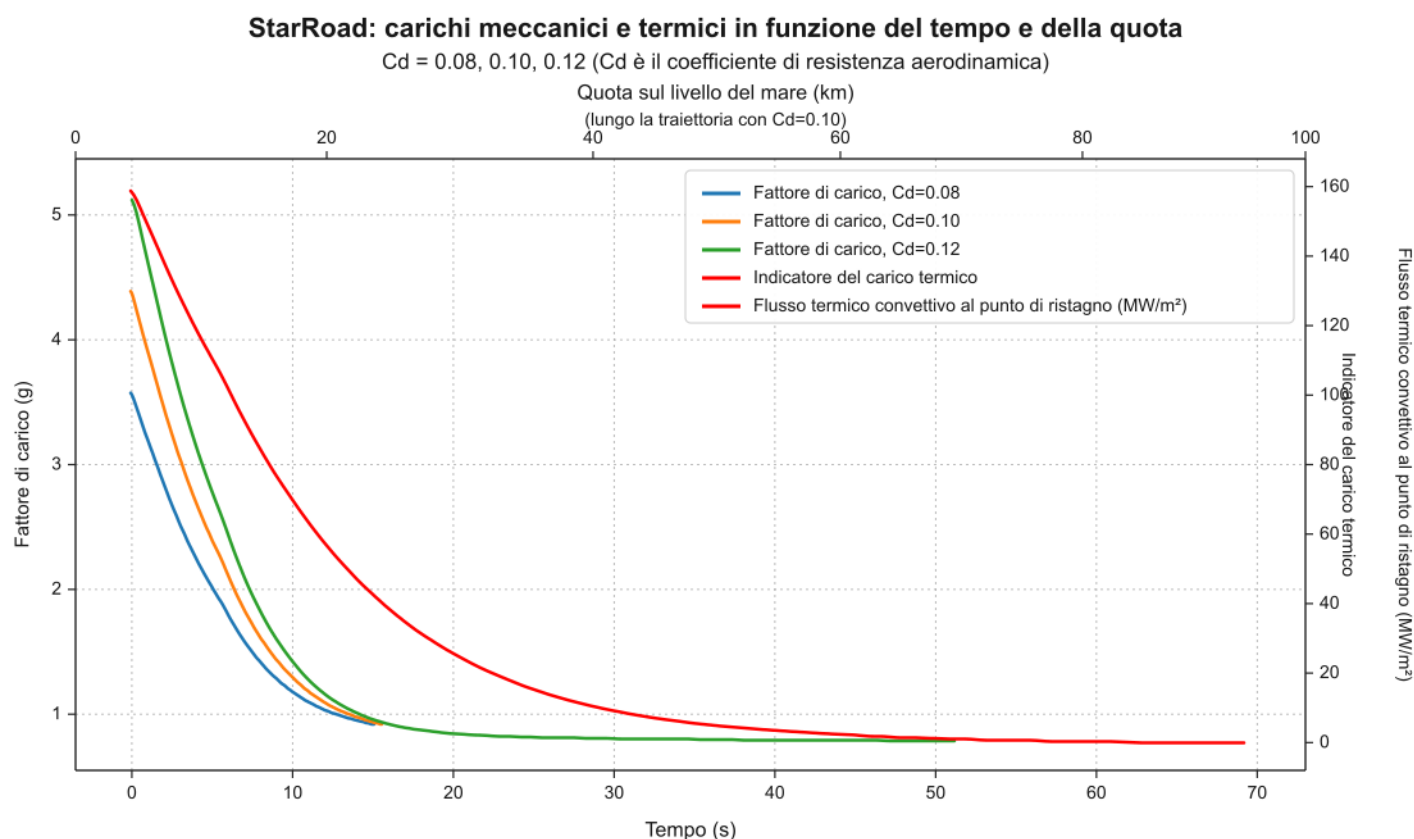
stabile e conico di gas caldo parzialmente ionizzato. Tre secondi dopo l'attivazione riuscita degli anelli e la formazione del cono caldo a gradiente di barriera, si apre il portale meccanico.

- La barriera impedisce inoltre la perdita del vuoto nel tunnel e attenua lo shock termico iniziale. In pochi millisecondi la navetta attraversa una zona predisposta di gas rarefatto e riscaldato. Questa tecnologia modifica il profilo temporale dell'azione aerodinamica iniziale ed elimina il fronte d'urto ultrabreve nel passaggio fra i due mezzi.
- La barriera gasdinamica non riduce le forze aerodinamiche complessive: porta il carico d'urto dall'ordine dei microsecondi a quello dei millisecondi, riducendo in modo decisivo le tensioni locali, le vibrazioni e lo shock termico nella struttura della navetta.
- Il portellone meccanico si apre immediatamente dopo il passaggio della navetta; gli anelli di getti vengono quindi spenti senza ritardo.

5.4. Attraversamento dell'atmosfera

Seguendo una traiettoria balistica, la navetta sfrutta la propria massa inerziale e la struttura robusta per attraversare gli strati densi dell'atmosfera. I massimi carichi termici e dinamici si concentrano nei primi 10–20 secondi.

- **Precisazione essenziale.** Uscita dalla zona della barriera gasdinamica, la navetta interagisce immediatamente con l'atmosfera normale alla quota prevista, circa 3.400 m. Tutti i calcoli di traiettoria, flusso termico e carichi assumono la piena interazione aerodinamica con l'atmosfera, senza ipotizzare uno "scudo di gas", un "canale" o un volume rarefatto che accompagni la navetta.



5.5. Ingresso nello spazio e operazioni orbitali

Dopo l'uscita dall'atmosfera si aprono i radiatori per smaltire il calore. La navetta attiva quindi i motori elettromagnetici al plasma di bordo per correggere finemente la traiettoria e raggiungere l'orbita di destinazione, spesso direttamente oltre l'orbita geostazionaria o verso i punti di Lagrange. Il carico utile viene rilasciato. Nella configurazione AstroLiner-S, l'inserimento finale e la correzione orbitale sono affidati a un sistema di propulsione chimica.

5.6. Uscita dall'orbita e rientro

Nella versione completa di AstroLiner, l'uscita dall'orbita utilizza motori elettromagnetici al plasma. Nella configurazione AstroLiner-S, la frenata per lasciare l'orbita, le correzioni e le manovre finali sono affidate al sistema di propulsione chimica.

5.7. Ammaraggio

Sopra l'Atlantico, nei pressi del Gabon, viene dispiegato un sistema di paracadute frenante per ridurre la velocità. La navetta ammara con un piccolo angolo d'attacco sul fondo rinforzato, progettato per il contatto fra la superficie riscaldata e l'acqua fredda. Dopo l'amaraggio si aprono le eliche o gli idrogetti.

5.8. Rimorchio e manutenzione

I motori propri, alimentati dal reattore di bordo, oppure i rimorchiatori di pronto intervento in caso di guasto ai sistemi della navetta, portano il veicolo al complesso portuale per l'ispezione, la manutenzione, la riparazione della protezione termica e la preparazione al volo successivo. Nella configurazione AstroLiner-S, il rientro in porto è garantito dalle batterie, da un'unità di potenza ausiliaria o dai rimorchiatori di pronto intervento.

6. Realizzazione, tempi, requisiti e centri industriali

6.1. Fasi del progetto

La realizzazione di StarRoad è organizzata in una sequenza di fasi collegate sul piano tecnologico e giustificate su quello economico. Ogni fase ha obiettivi e criteri di successo chiari e costruisce l'infrastruttura necessaria alla successiva, riducendo i rischi tecnici e finanziari.

6.1.1. Fase 0: concetto e collaudi (2–5 anni)

- **Obiettivo:** convalidare i principi fisici, sviluppare in laboratorio le tecnologie critiche e creare la base ingegneristica.
- **Attività principali**
 1. Modellazione matematica e CFD dettagliata di tutti i processi: accelerazione, funzionamento del portale e impatto aerodinamico.
 2. Costituzione di un consorzio internazionale e accordi politici e giuridici preliminari.
 3. Indagini geologiche e ambientali lungo l'intero tracciato.
 4. Creazione di siti sperimentali di ricerca al di fuori della sede principale:
 - prove al banco dei moduli di levitazione superconduttiva e dei sistemi di alimentazione a impulsi;
 - costruzione e collaudo di un prototipo del portale gasdinamico in scala 1:10 per dimostrare che è possibile formare una barriera a gradiente stabile;
 - Scavo di un breve tunnel dimostrativo evacuato di 1–2 km per convalidare l'integrazione dei sistemi a vuoto, l'accelerazione magnetica di corpi di prova leggeri e i sistemi di sicurezza.
- **Criterio di successo:** dati sperimentali che confermino la fattibilità delle soluzioni chiave — portale, levitazione e stabilizzazione — e completamento del progetto ingegneristico dettagliato della Fase 1.

6.1.2. Fase 1: infrastruttura e base energetica (5–7 anni)

- **Obiettivo:** creare la «spina dorsale energetica» e sviluppare la costruzione robotizzata in condizioni reali.
- **Attività principali**
 1. Avvio della produzione in piccola serie di sistemi robotizzati standardizzati per lo scavo di tunnel, con diametro di 2 metri.
 2. Scavo in parallelo della prima coppia di tunnel collettori principali della rete SATEGA lungo l'intero tracciato (~2.050 km), per creare il circuito iniziale di stabilizzazione termica.
 3. Costruzione delle prime centrali geotermiche a CO₂ supercritica ottenuta mediante cattura diretta dall'aria (DAC) nei punti principali del tracciato.
 4. Scavo sopra i collettori di un tunnel prototipo di piccolo diametro — D=2 m, L=2.050 km — dotato dei sistemi di base per vuoto, comunicazioni e servizio.

- **Criterio di successo:** la configurazione minima del sistema geotermico è pienamente operativa e autonoma dal punto di vista energetico; lo scavo robotizzato ad alta velocità è stato dimostrato e costituisce la base per gli ampliamenti successivi.

6.1.3. Fase 2: convalida in scala ridotta (status di «Complesso scientifico e strumentale») (4–6 anni)

- **Obiettivo:** verificare la sincronizzazione e la sicurezza dei sistemi a velocità realistiche e raccogliere dati sperimentali unici.
- **Attività principali**
 1. Nel piccolo tunnel di prova, accelerare e frenare corpi inerti di massa fino ad alcune tonnellate a velocità di 1–11 km/s.
 2. Prova in scala reale di un prototipo 1:5 del portale gasdinamico con il passaggio di una piccola navetta sperimentale.
 3. Verifica sperimentale dell'ipotesi dell'«ariete inerziale»: lanciare masse di prova con strutture e protezioni termiche differenti per misurare accelerazioni e flussi di calore.
 4. Avvio della progettazione dettagliata e della costruzione dei prototipi dei sistemi chiave di una navetta in scala reale, compresi magneti superconduttori e accumulatori termici.
- **Criterio di successo:** tutti i sistemi di sincronizzazione funzionano in modo stabile e sicuro; l'efficacia del portale gasdinamico è confermata; gli esperimenti dimostrano che i carichi specifici diminuiscono all'aumentare della massa; il progetto preliminare della navetta è completato.

6.1.4. Fase 3: sezione pienamente funzionale e prototipo della navetta (4–7 anni)

- **Obiettivo:** integrare e collaudare i sistemi nella configurazione finale su un tratto significativo e realizzare un prototipo di volo.
- **Attività principali**
 1. Costruzione di una sezione pienamente funzionale di 50–200 km del tunnel principale di accelerazione con la sezione finale di 17,5 × 12,5 m, comprendente tutti gli avvolgimenti, gli accumulatori di energia e il tunnel di servizio.
 2. Estensione del sistema geotermico sotto questo tratto fino alla configurazione completa a sette gallerie.
 3. Costruzione e prove a terra complete di un prototipo di navetta in scala reale privo di propulsione: sistemi criogenici, resistenza strutturale e protezione termica.
 4. Prove integrate nel tunnel: accelerazione e frenatura di masse rappresentative della navetta con carichi fino a 8g e velocità fino a ~4 km/s. Convalida di tutti i protocolli di emergenza (Allarme 1–3).
 5. Sviluppo, prove a terra e certificazione di un reattore nucleare compatto di bordo per la versione pienamente funzionale dell'AstroLiner.
- **Criterio di successo:** ripetuti cicli di accelerazione e arresto d'emergenza vengono completati senza danni critici; l'efficacia del recupero di energia è confermata; la navetta di volo e il reattore sono pronti per l'integrazione finale.

6.1.5. Fase 4: estensione della lunghezza ed entrata in servizio (10–15 anni)

- **Obiettivo:** completare la prima linea, integrare la navetta e raggiungere la velocità operativa.
- **Attività principali**
 1. Estensione graduale del tunnel acceleratore fino alla lunghezza di progetto di 2.050 km mediante il lavoro parallelo di numerose frese meccaniche.
 2. Ampliamento dell'infrastruttura geotermica e degli accumulatori a impulsi lungo l'intero tracciato.
 3. Costruzione del complesso definitivo del portale atmosferico d'alta quota sul monte Mohi.
 4. Integrazione dei sistemi di bordo della navetta e prove a terra e a bassa velocità nel tunnel.
 5. Lanci gradualmente con aumento progressivo della velocità e della massa, fino al raggiungimento dei parametri di progetto di 15.000 t e ~11 km/s.

- **Criterio di successo:** il primo lancio ipersonico riuscito della navetta porta un carico nell'orbita prevista; viene raggiunta la frequenza di progetto di uno o due lanci al mese.

6.1.6. Fase 5: espansione e attività industriale (continua)

- **Obiettivo:** trasformare StarRoad in un'infrastruttura globale in continua espansione.
- **Attività principali**
 1. Esercizio della prima linea e perfezionamento dei cicli logistici: carico, manutenzione e ritorno.
 2. Avvio della seconda linea e delle successive linee parallele per aumentare il flusso di merci.
 3. Realizzazione di cantieri navali orbitali e impianti di lavorazione basati sui centri industriali del progetto.
 4. Sviluppo di una rete di diramazioni: acceleratori più brevi per persone e carichi speciali.
- **Criterio di successo:** il costo di consegna scende sotto 10 USD/kg; i lanci diventano quotidiani; esiste un piano approvato per le prossime linee principali e la loro costruzione è iniziata.

6.2. Centri industriali

- **Complesso costiero (foce del fiume Nyanga, Gabon):** costruzione delle navette, produzione dei moduli per le sezioni iniziali del tunnel e principale porto-base per la manutenzione delle navette.
- **Complesso d'altopiano (monte Mohi e altopiano meridionale, Repubblica Democratica del Congo):** produzione dei moduli per le sezioni ad alta velocità e per la curva a S finale, oltre ad assemblaggio e manutenzione del meccanismo del portale. Il sito comprende un sistema a tre canali per l'elettrolisi e lo stoccaggio dell'idrogeno; anche in emergenza, ciascun canale può alimentare tutti e tre gli anelli di motori della barriera gasdinamica del portale. L'energia per l'elettrolisi proviene da fonti locali — SATEGA, idroelettrico, solare e nucleare — integrate nella rete del progetto.

6.3. Orizzonte complessivo

Poiché il progetto richiede numerose tecnologie avanzate ma attualmente realizzabili e varie soluzioni ingegneristiche, oltre a molte frese meccaniche operanti in parallelo, la realizzazione delle infrastrutture e due centri produttivi, la costruzione del primo tunnel dall'inizio della Fase 0 al primo lancio commerciale della Fase 4 richiederà circa 25–40 anni. Il termine è paragonabile ai tempi di altri progetti di megascienza, come ITER e LIGO. In queste condizioni, i progressi dipendono soprattutto dai finanziamenti e dal coordinamento diplomatico e giuridico, non dalla fattibilità tecnica fondamentale. L'impresa è ambiziosa, ma potenzialmente realizzabile da un consorzio globale.

7. Problemi e compiti affrontati

7.1. Surriscaldamento globale

Trasferire nello spazio l'industria ad alto consumo energetico per ridurre l'inquinamento termico e la pressione sulla biosfera terrestre.

7.2. Compito economico

Ridurre radicalmente il costo di accesso allo spazio, rendendo economicamente sostenibili l'energia solare, gli asteroidi, le risorse lunari e infine quelle planetarie.

7.3. Obiettivo strategico

Creare un sistema di sollevamento resiliente e indipendente dal meteo, capace di sostenere sia l'industrializzazione orbitale sia la difesa planetaria.

7.4. Catalizzatore tecnologico

Il progetto stimolerà progressi nella potenza impulsiva, nella superconduttività, nelle tecnologie ipersoniche, nella propulsione nucleare e nello scavo robotizzato di gallerie.

7.5. Autonomia energetica e termica

Il sistema geotermico risolve entrambe le esigenze. Genera fino a circa 15 GW continui, copre l'acceleratore e crea un surplus commerciale, mantenendo un ambiente freddo prevedibile attorno alla galleria principale. Consente così costruzione ed esercizio in strati profondi e geotermicamente attivi, senza dipendere da energia esterna vulnerabile o clima imprevedibile.

7.6. Impronta di carbonio

StarRoad adotta un modello di contributo ambientale attivo. Il progetto diventerebbe il maggiore utilizzatore fisso di CO₂ atmosferica al mondo: in stato supercritico, il gas resta il fluido di lavoro del circuito geotermico chiuso. Milioni di tonnellate vengono sottratte al ciclo atmosferico e confinate nel circuito industriale per secoli. StarRoad diventa così un potente strumento di ingegneria climatica capace di compensare le emissioni di carbonio di interi settori industriali.

7.7. Potenziale sociale e ambientale del Canale Idrotermale Principale

Il canale idrotermale principale non è soltanto parte del raffreddamento geotermico, ma anche un'infrastruttura transcontinentale a duplice uso che reca benefici alla regione:

- **irrigazione:** paratoie di derivazione consentono di usare l'acqua per i terreni agricoli lungo il corridoio e trasformare aree aride in una «cintura verde» africana;
- **reintegro naturale:** le frequenti piogge equatoriali riempiono automaticamente il canale;
- **Trattamento termico** dell'acqua. Portata a +60 °C dagli scambiatori geotermici, è di fatto pastorizzata e adatta a irrigazione sicura, industria e, dopo filtrazione, usi domestici e acqua potabile.
- **flusso gravitazionale:** la pendenza naturale, da 3.400 m a est a 0 m a ovest, fa scorrere l'acqua senza pompe e garantisce una circolazione gratuita;
- **microcentrali** idroelettriche : il dislivello consente di installare una cascata di piccoli impianti che forniscano ulteriore energia rinnovabile alle reti locali e al sistema stesso.

StarRoad diventa così non solo una piattaforma di trasporto, ma anche agroenergetica, integrata nello sviluppo sostenibile della regione.

7.8. Rete energetica

Il sistema geotermico autonomo e la sua rete di centrali forniscono energia «verde» in eccesso sia all'acceleratore sia a città, industrie e aziende agricole vicine.

7.9. StarRoad come arteria economica

StarRoad come arteria economica. Da un lato, StarRoad diventa un portale planetario per il trasporto merci destinato allo sviluppo del Sistema solare; dall'altro, diventa la principale arteria economica dell'Africa e un catalizzatore di industrializzazione, indipendenza energetica e sicurezza alimentare. Il tracciato non è un'opera isolata che corre sottoterra verso il nulla. Le infrastrutture di superficie — 40 terminal, due centri industriali in Gabon e nella Repubblica Democratica del Congo, un canale idrotermale dorsale e una rete stradale — formano un distretto lineare di sviluppo sostenibile che attraversa l'Africa centrale da ovest a est. Lungo tutti i 2.050 km del tracciato nasce un paesaggio unico, in cui si alternano aree ecologiche, tecnologiche e agricole. Il distretto lineare diventa una zona economica autosufficiente in cui:

- l'energia è generata da fonti geotermiche, micro-idroelettriche e solari;
- il cibo è prodotto con agricoltura irrigua;
- si fabbricano beni industriali, inclusi componenti delle navette, moduli delle gallerie e attrezzature;
- le merci si muovono su strada e ferrovia;
- opera uno spaziorporto costituito dal complesso di lancio e dal portale atmosferico;
- la CO₂ atmosferica viene rimossa in impianti di cattura diretta dall'aria.

7.10. Sicurezza delle infrastrutture critiche

Il progetto integra fin dall'inizio misure per operare con grandi quantità di idrogeno, velocità ipersoniche ed energie di gigawatt. Protezione passiva, monitoraggio attivo e risposta automatica definiscono un nuovo standard per grandi impianti energetici e sistemi a idrogeno.

7.11. Scelta e scalabilità del sito

Il portale richiede un sito che soddisfi decine di condizioni contrastanti: quota, logistica, sicurezza, espansione e diritto. Il monte Mohi e l'altopiano vicino permettono di iniziare con un sito compatto d'alta quota e crescere fino al maggiore spazioporto del mondo senza cambiare luogo.

7.12. Coordinamento politico e giuridico di un progetto transcontinentale

Il passaggio del tracciato attraverso tre Paesi è gestito tramite un consorzio internazionale modellato su megaprogetti come CERN e ITER. Le infrastrutture sotterranee e gli asset energetici del sistema geotermico autonomo di energia termica ricevono uno status giuridico speciale e i benefici sono ripartiti chiaramente tra i partecipanti. Il progetto non è un onere che presuppone stabilità politica; attraverso l'interdipendenza e l'accesso privilegiato al futuro e alle tecnologie sviluppate durante la costruzione, diventa uno strumento intrinsecamente prezioso per creare e mantenere la stabilità.

7.13. Crescita evolutiva del flusso merci

La frequenza dei lanci cresce insieme all'industria orbitale. Una fase pionieristica con 1 lancio al mese crea cantieri orbitali; una fase industriale con 1–3 lanci alla settimana costruisce gli asset; una fase matura con lanci quotidiani sostiene la crescita esponenziale dell'economia spaziale.

8. Mercati e logistica orbitale

Questa sezione risponde alla domanda centrale sulla sostenibilità economica di StarRoad: che cosa può essere lanciato in volumi sufficienti a sfruttare un corridoio di lancio superpesante? StarRoad non va considerato un sistema per poche missioni eccezionali. Il suo obiettivo è un flusso di merci massiccio, regolare e industrializzato tra la Terra e le orbite alte.

Il principale mercato iniziale di StarRoad non è costituito dalle costellazioni di satelliti in orbita terrestre bassa né dai singoli veicoli scientifici, bensì dall'energia orbitale su vasta scala, dalle infrastrutture informatiche, dalla logistica interorbitale, dagli insediamenti orbitali, dai cantieri spaziali e dalle successive industrie extraterrestri.

8.1. Il problema della domanda di lanci superpesanti

L'economia dei razzi convenzionali è limitata non solo dal costo per chilogrammo, ma anche dalla natura stessa del lancio: i razzi consegnano merci in piccoli lotti separati, con un'elevata quota di massa ausiliaria, assemblaggi orbitali complessi e numerose operazioni individuali. Anche quando i prezzi di lancio scendono, il trasporto a razzo rimane quindi una logistica di tipo spedizionario.

StarRoad crea un mercato di natura diversa. Il suo scopo non è soltanto lanciare a minor costo i carichi di oggi, ma rendere possibili carichi che con la logistica a razzo non diventerebbero mai economicamente sostenibili.

Questi carichi comprendono:

- centrali solari spaziali di classe gigawatt complete o quasi complete;
- grandi data center orbitali;
- moduli di trasmissione dell'energia a microonde;
- grandi tralicci, radiatori, specchi e pannelli;
- cantieri spaziali e linee di assemblaggio automatizzate;
- moduli residenziali e industriali per EML4/5;
- rimorchiatori e trasporti interorbitali;
- moduli di propellente, energia e servizio;
- componenti delle future infrastrutture asteroidali e interplanetarie.

StarRoad non dipende quindi dall’attuale mercato dei lanci spaziali. Crea un nuovo mercato, così come ferrovie, trasporto containerizzato e reti elettriche non si sono limitati a soddisfare la domanda esistente, ma hanno generato nuove economie attorno a sé.

8.2. Mercato iniziale: energia solare spaziale e data center orbitali

Nella prima fase, il principale carico commerciale e strategico di StarRoad dovrebbe essere costituito da centrali solari spaziali di classe gigawatt. Sono grandi piattaforme energetiche auto-dispiegabili o parzialmente auto-dispiegabili, consegnate da AstroLiner-S direttamente nelle orbite o nei luoghi operativi di destinazione.

Le centrali solari spaziali rispondono contemporaneamente a più esigenze:

- creano una domanda massiccia e ripetibile di lanci superpesanti;
- formano un mercato energetico indipendente dal ciclo giorno-notte e dalla maggior parte delle condizioni meteorologiche;
- permettono di collocare fuori dalla superficie terrestre una quota considerevole della nuova capacità di generazione;
- forniscono la base energetica per l’industria orbitale;
- creano una motivazione economica per costruire logistica orbitale, cantieri spaziali e insediamenti di servizio.

La costante solare all’orbita terrestre è di circa **1.361,6 W/m²**. Un gigawatt di radiazione solare incidente corrisponde quindi a circa 0,74 km² di superficie captante perfettamente orientata. Con un’efficienza fotovoltaica del 25–35%, le perdite di conversione e trasmissione, gli spazi strutturali, i radiatori, l’elettronica di potenza, la ridondanza e il degrado, la superficie reale necessaria per ottenere 1 GW di elettricità utile raggiunge diversi chilometri quadrati. È enorme secondo i criteri dei veicoli spaziali convenzionali, ma naturale per StarRoad, dove massa, superficie e dimensioni strutturali cessano di essere il vincolo principale.

8.2.1. Riferimenti di massa per centrali solari spaziali di classe gigawatt

Una centrale di classe gigawatt non è un piccolo satellite. Persino le architetture contemporanee più ottimistiche stimano in diverse migliaia di tonnellate la massa di una centrale da 2 GW. I concetti più leggeri, come CASSIOPeiA, sono valutati attorno a 2.000 t, mentre studi NASA più prudenti indicano 5.900–10.000 t per un sistema equivalente da 2 GW.

Progetto / studio	Potenza	Massa	Rilevanza per StarRoad
CASSIOPeiA / Space Energy Initiative / Frazer-Nash	fino a 2 GW immessi nella rete	≈2.000 t	Il riferimento più pertinente per StarRoad: GEO/GSO, fattore di generazione del 99,7%, architettura con 1 satellite per 1 antenna raddrizzante (rectenna) e, nel migliore dei casi, potenza specifica prossima a 1 MW/t.
NASA 2024 RD1 / Innovative Heliostat Swarm	2 GW immessi nella rete	≈5.900 t	Una stima più prudente. La NASA normalizza il sistema a 2 GW immessi nella rete; RD1 dispone di circa 11,5 km² di pannelli solari.
NASA 2024 RD2 / Mature Planar Array	2 GW immessi nella rete, ma tramite più sistemi	≈10.000 t	La NASA indica una massa di circa 10 milioni di kg e una superficie di pannelli solari di circa 19 km². Poiché RD2 genera per meno tempo, servono cinque sistemi RD2 per ottenere approssimativamente lo stesso risultato energetico di un solo RD1.
JAXA / Sasaki Tethered-SPS	0,75 GW medi / 1,2 GW massimi	≈20.000 t per sistema	Un riferimento pesante. Una semplice proporzione a 2 GW di potenza media porta a circa 50.000 t o più: occorrono quindi una serie di voli e l’assemblaggio orbitale, non un singolo lancio.
Caltech SSPP / unità modulare leggera a piastrina	non una centrale completa da 2 GW, ma un’unità tecnologica	per 2 GW forniti a Terra, il solo strato attivo peserebbe teoricamente ≈1.700–3.400 t	Con 160 g/m² e un’efficienza complessiva del 7–14%, questa stima riguarda soltanto lo strato attivo. Una centrale completa necessita anche di struttura, trasmissione dell’energia, controllo d’assetto, radiatori, cablaggi, elettronica, dotazioni di manutenzione e riserve.

La tabella conduce alla conclusione centrale: **una centrale solare spaziale da 2 GW e 2.000–10.000 t rientra quasi esattamente** nella nicchia di AstroLiner. Per StarRoad equivale a un lancio superpesante o a un numero limitato di voli con un assemblaggio orbitale minimo. La logistica a razzo richiederebbe decine o centinaia di lanci di razzi superpesanti, catene di rifornimento, assemblaggio orbitale, rimorchio verso GEO o EML e un forte aumento della complessità operativa.

8.2.2. Produzione energetica di una centrale solare spaziale da 2 GW

Utilizzando le seguenti ipotesi di riferimento:

- o potenza immessa nella rete: **2 GW**;
- o disponibilità / fattore di generazione: **99,7%**;
- o vita utile di progetto: **30 anni**;

una centrale produce:

- o **≈17,47 TWh all'anno**;
- o **≈524 TWh** in 30 anni.

Questo rende fondamentale il costo di trasporto per chilogrammo. Nella logistica a razzo, il lancio rimane la barriera dominante. Con StarRoad, la componente di trasporto scende rapidamente fino a diventare una piccola parte del futuro prezzo dell'energia.

8.2.3. Componente di trasporto del costo dell'energia solare spaziale

Il calcolo seguente riguarda **esclusivamente la componente di trasporto** del costo livellato dell'energia: il costo per consegnare la massa della centrale diviso per l'energia prodotta nei suoi 30 anni di vita. Non comprende la fabbricazione della centrale, la rectenna, la manutenzione, l'assicurazione, la sostituzione dei moduli, l'infrastruttura terrestre e il profitto dell'operatore.

Formula:

Componente di trasporto del LCOE = massa della centrale × costo di consegna / produzione energetica nell'intera vita utile

Per una centrale da 2 GW, con disponibilità del 99,7% e vita utile di 30 anni, la produzione totale è di circa 524 **miliardi di kWh**.

Fase / sistema di trasporto	Costo di consegna	Centrale simile a CASSIOPEIA, 2.000 t, ¢/kWh	NASA RD1, 5.900 t, ¢/kWh	NASA RD2, 10.000 t, ¢/kWh
Logistica a razzo attuale, riferimento inferiore verso GTO	3.600–5.600 \$/kg	1,37–2,14	4,05–6,31	6,87–10,69
StarRoad, anni 1–2	80–120 \$/kg	0,0305–0,0458	0,0901–0,1351	0,1527–0,2290
StarRoad, anni 3–5	30–50 \$/kg	0,0114–0,0191	0,0338–0,0563	0,0572–0,0954
StarRoad, anni 6–10	10–20 \$/kg	0,0038–0,0076	0,0113–0,0225	0,0191–0,0382
StarRoad, anni 11–15	3–8 \$/kg	0,0011–0,0031	0,0034–0,0090	0,0057–0,0153
StarRoad, anni 16–25	0,8–3 \$/kg	0,0003–0,0011	0,0009–0,0034	0,0015–0,0057
StarRoad, dal 26° anno	0,3–1 \$/kg	0,0001–0,0004	0,0003–0,0011	0,0006–0,0019

A titolo di confronto, il LCOE delle moderne centrali terrestri di nuova costruzione è di alcuni centesimi per kWh: circa 3–4 ¢/kWh per l'eolico terrestre, 4–5 ¢/kWh per il fotovoltaico su scala industriale e 5–6 ¢/kWh per l'idroelettrico. Le stime NASA per le alternative terrestri nel 2050 sono di circa 2–5 ¢/kWh.

Ne deriva una conclusione importante: anche nel periodo pilota, la componente di trasporto dell'energia solare spaziale con StarRoad è inferiore di un ordine di grandezza al LCOE della generazione terrestre; nelle fasi mature scompare quasi come fattore principale del prezzo. Ciò non significa che il costo totale dell'energia solare spaziale sarà di millesimi di centesimo. Restano la fabbricazione della centrale e della rectenna, l'assistenza, l'elettronica, i radiatori, la sostituzione dei moduli, l'assicurazione e il profitto operativo. Significa che StarRoad elimina la barriera specifica che rende economicamente onerosa l'energia solare spaziale con una logistica a razzo.

Negli attuali scenari a razzo, il quadro completo è peggiore del semplice valore di 3.600–5.600 \$/kg. Una grande centrale non deve soltanto essere lanciata in orbita, ma anche raggiungere il punto operativo, essere assemblata e sottoposta a manutenzione; nel frattempo occorre rifornire i rimorchiatori e mantenere le infrastrutture. La NASA stima quindi **un LCOE di riferimento di circa 61 ¢/kWh** per RD1 e 159 ¢/kWh per RD2, molto superiore alle alternative terrestri. StarRoad non si limita

a ridurre il costo di lancio: cambia la natura del problema sostituendo migliaia di operazioni a razzo con uno o pochi voli infrastrutturali superpesanti.

8.2.4. I data center orbitali come secondo mercato iniziale

I data center orbitali potrebbero costituire il secondo mercato iniziale. La crescita dell'intelligenza artificiale, del cloud computing e delle infrastrutture digitali sta rendendo i data center una componente importante della domanda energetica mondiale. Secondo l'AIE, consumano già centinaia di TWh all'anno e potrebbero avvicinarsi a circa 1.000 TWh annui nel prossimo decennio.

Collocare parte dell'infrastruttura informatica vicino alle centrali solari spaziali offre diversi vantaggi:

- accesso diretto a una generazione orbitale continua;
- minore pressione sulle reti elettriche terrestri;
- possibilità di costruire grandi distese di radiatori nel vuoto;
- minore dipendenza dai vincoli locali di suolo, acqua e capacità della rete;
- condivisione con le centrali solari delle infrastrutture energetiche, di comunicazione e di servizio.

Nella fase iniziale, centrali orbitali e data center possono essere lanciati come piattaforme separate o come complessi integrati di energia e calcolo, comprendenti una centrale solare, elettronica di potenza, radiatori, un modulo di calcolo, antenne di comunicazione e un circuito di trasmissione a microonde.

8.3. Logica climatica e industriale dell'energia solare spaziale

Le centrali solari spaziali non vanno descritte soltanto come tecnologia «verde». Il loro ruolo è più ampio: sostituiscono la generazione al carbonio non riducendo il comfort e imponendo limiti ai consumi, ma creando un sistema energetico più potente.

La politica climatica classica è spesso percepita come richiesta di sacrificare comfort per ridurre le emissioni. StarRoad offre un'altra via: non ridurre la capacità della civiltà, ma trasferire nello spazio gran parte della nuova generazione e aumentare l'energia disponibile senza accrescere l'impronta del settore elettrico.

In questo modello gli idrocarburi non devono scomparire come risorsa industriale. Possono uscire gradualmente dalla produzione di massa di elettricità e calore e passare a chimica, materiali, compositi di carbonio, prodotti sintetici e filiere in cui il carbonio è materia prima, non combustibile.

Per l'attuale industria energetica del carbonio non è solo una minaccia, ma una via di transizione. Imprese, Stati e fondi legati a petrolio, gas e carbone possono avere priorità negli investimenti in energia solare spaziale, energia orbitale, chimica degli idrocarburi e materiali di carbonio. StarRoad diventa un meccanismo di conversione gestita, non un semplice concorrente.

8.3.1. Scala della sostituzione energetica

Un gigawatt elettrico continuo produce circa 8,76 TWh l'anno. **Una centrale** solare spaziale da 2 GW con disponibilità del 99,7% produce circa **17,47 TWh l'anno**.

Quindi:

- 100 GW di generazione orbitale producono circa **876 TWh/anno**;
- 1 TW produce circa **8.760 TWh/anno**;
- 3 TW producono circa **26.280 TWh/anno**, valore paragonabile al consumo elettrico mondiale attuale.

Nel 2024 la generazione elettrica mondiale è **stata circa** 30.800 TWh, di cui circa 18.200 TWh **fossili**. **La scala** è chiara: anche una sostituzione parziale richiede centinaia o migliaia di gigawatt nuovi e stabili, non decine.

8.3.2. Possibile ritmo di sostituzione se StarRoad trasporta centrali solari spaziali

La tabella indica un limite tecnico: cosa accade se una parte importante dei lanci porta in rete una centrale **da 2 GW per viaggio**. Non è una previsione né una promessa; stima un ritmo possibile solo con produzione in serie, rectenne e reti pronte, consenso politico e giuridico, finanziamento, manutenzione e mercati capaci di assorbire l'energia.

Periodo operativo di StarRoad	Lanci annui nel modello economico	Nuova potenza solare spaziale all'anno	Nuova generazione annua dopo l'installazione	Quota della generazione da combustibili fossili nel 2024, $\approx 18,2$ mila TWh/anno	Quota della produzione elettrica mondiale totale nel 2024, $\approx 30,8$ mila TWh/anno
Anni 1–2	12–24	24–48 GW/anno	210–419 TWh/anno	1,2–2,3%	0,7–1,4%
Anni 3–5	50–100	100–200 GW/anno	873–1.747 TWh/anno	4,8–9,6%	2,8–5,7%
Anni 6–10	200–300	400–600 GW/anno	3.493–5.240 TWh/anno	19–29%	11–17%
Anni 11–15	500–700	1.000–1.400 GW/anno	8.734–12.227 TWh/anno	48–67%	28–40%
Anni 16–25	1000+	2.000+ GW/anno	17.467+ TWh/anno	96%+	57%+
Anni 26+	1500+	3.000+ GW/anno	26.201+ TWh/anno	144%+	85%+

La tabella mostra perché l'energia solare spaziale è un mercato primario naturale per StarRoad. Una centrale da 2 GW per lancio crea già un flusso importante nella fase iniziale; l'esercizio maturo diventa uno strumento planetario.

Non va letta come calendario garantito di decarbonizzazione. La sostituzione reale dipende non solo dalla capacità di lancio, ma anche:

- dal ritmo di produzione delle centrali solari spaziali;
- dalla produzione di elettronica di potenza, radiatori, strutture, trasmettitori a microonde e controllo;
- dalla costruzione delle rectenne a terra;
- dalla capacità delle reti elettriche;
- dall'autorizzazione politica alla trasmissione energetica a microonde;
- dalla ripartizione internazionale di benefici e rischi;
- da assicurazione e regolamentazione dell'energia orbitale;
- da manutenzione, riparazione e dismissione delle centrali;
- dalla concorrenza di solare terrestre, eolico, nucleare, idroelettrico e geotermia.

La formula corretta è: StarRoad **rende tecnicamente possibile un ritmo paragonabile alla scala dell'elettricità fossile mondiale, ma la velocità reale dipende da produzione, reti, rectenne, politica e mercato.**

8.3.3. Conversione industriale dell'energia al carbonio

Se la produzione segue il ritmo dei lanci, in uno o due decenni può nascere energia orbitale su scala terawatt. Non elimina tutta l'energia terrestre, ma ne cambia il ruolo: reti, nucleare, idroelettrico, rinnovabili, geotermia e accumulo formano un sistema ibrido in cui l'orbita copre carico base, industria ed esportazione.

In questo scenario l'energia al carbonio non si limita a «perdere». Si apre una via di conversione:

- le centrali a carbone e gas escono gradualmente dalla generazione di base;
- parte dell'infrastruttura del gas passa a riserva, chimica e prodotti sintetici;
- le imprese petrolifere e del gas investono in energia solare spaziale, rectenne, chimica degli idrocarburi e materiali di carbonio;
- l'industria del carbone si orienta verso compositi, riducenti, materie chimiche e materiali;
- alcune imprese energetiche tradizionali diventano operatori di generazione orbitale, rectenne e distribuzione elettrica.

Il senso politico ed economico non è chiedere a settori potenti di autodistruggersi subito, ma offrire una transizione. Se l'industria del carbonio può mantenere o aumentare i margini partecipando all'energia solare spaziale e alla chimica, la resistenza può diminuire molto.

8.3.4. Differenza rispetto alla normale agenda «verde»

StarRoad propone espansione energetica, non austerità. La sua logica climatica non riduce la capacità della civiltà: la trasferisce in infrastrutture più sostenibili.

È diverso dagli approcci percepiti come «vivere peggio per il clima». Energia solare spaziale e StarRoad permettono un altro futuro:

- più energia, non meno;
- meno emissioni, non meno industria;
- più capacità di calcolo disponibile, non limiti all'economia digitale;
- più elettrificazione di trasporti, produzione e vita quotidiana;
- più opportunità per le regioni in via di sviluppo;
- meno dipendenza dai fossili come combustibile, conservando il carbonio come materia prima industriale.

Questo approccio aderisce meglio alla logica civile di StarRoad: non chiede all'umanità di ridursi, ma crea infrastrutture per crescere senza la precedente impronta di carbonio.

8.3.5. Conclusione: energia solare spaziale come mercato primario

Le centrali solari spaziali di classe gigawatt non sono un'applicazione secondaria, ma una delle basi della necessità economica di StarRoad.

Esse:

- creano domanda di massa per lanci superpesanti;
- generano ricavi commerciali chiari dalla vendita di energia;
- alimentano la futura industria orbitale;
- stimolano rectenne, ripetitori, rimorchiatori, cantieri navali e insediamenti di servizio;
- aprono una nuova nicchia d'investimento all'industria del carbonio;
- offrono un vero meccanismo di azione climatica su scala planetaria.

Nella logistica dei razzi, queste centrali restano troppo pesanti, costose e complesse. Nella logistica StarRoad diventano un carico naturale di serie: non una «missione eccezionale», ma un prodotto energetico di una grande industria infrastrutturale.

8.4. Sedi orbitali: GEO ed EML4/5

Le sedi principali per le centrali solari spaziali e le relative infrastrutture sono l'orbita geostazionaria e i punti di Lagrange Terra–Luna EML4/5.

L'orbita geostazionaria è adatta a trasmettere energia verso regioni fisse della Terra. Un satellite o una piattaforma energetica in GEO mantiene una posizione quasi costante rispetto alla superficie, semplificando il puntamento del fascio a microonde, la collocazione delle rectenne terrestri e l'integrazione con le reti regionali. L'altitudine geostazionaria è di circa 35.800 km sopra l'equatore.

EML4 ed EML5 sono adatti a grandi insediamenti, cantieri spaziali, nodi industriali e poli energetici. Si trovano ai vertici di triangoli equilateri nel sistema Terra–Luna e hanno maggiore stabilità a lungo termine rispetto ai punti collineari L1/L2. Questo è importante per l'industria di massa: vi si possono installare grandi centrali, depositi, cantieri, tralicci di assemblaggio e complessi residenziali senza consumare continuamente grandi quantità di propellente per il mantenimento della posizione.

L'uso di GEO ed EML4/5 riduce anche i conflitti con l'orbita terrestre bassa. Le centrali solari e le altre grandi piattaforme non devono collocare enormi schiere in LEO, dove causerebbero inquinamento luminoso, rischi di collisione, resistenza atmosferica residua e interferenze con l'astronomia. L'orbita bassa rimane una zona di servizio per la discesa delle capsule, le operazioni intermedie, le ispezioni e specifiche attività di bassa orbita.

8.5. Fase iniziale: voli diretti di AstroLiner-S

La fase iniziale utilizza AstroLiner-S, la variante iniziale, semplificata e meno rischiosa della navetta. Non trasporta fonti di energia nucleare o a fusione e usa la propulsione chimica per l'inserimento finale, le correzioni, il deorbiting e il ritorno.

L'obiettivo principale della fase iniziale è creare un primo flusso di merci senza attendere che tutte le infrastrutture orbitali siano mature. AstroLiner-S deve quindi poter consegnare direttamente grandi moduli:

- in orbita geostazionaria per installare centrali solari e relè energetici;
- ai poli energetici EML4/5;
- su orbite ad alta energia per dispiegare centrali solari e data center.

In questa fase i carichi sono soprattutto strutture complete o quasi complete:

- centrali solari spaziali auto-dispiegabili;
- moduli di trasmissione dell'energia;
- grandi pannelli radianti;
- unità di calcolo per data center;
- strutture a traliccio;
- robot di assemblaggio;
- prime stazioni di servizio;
- riserve di propellente e fluido di lavoro;
- moduli di comunicazione, navigazione e controllo del traffico.

Vantaggi di EML4/5 e GEO rispetto a LEO:

- Nessun problema di inquinamento luminoso causato dai satelliti in orbita bassa.
- Illuminazione quasi continua per le centrali solari, senza un regolare ciclo giorno-notte.
- Posizione stabile rispetto alla Terra e alla Luna.

Dati principali della fase:

- Frequenza dei lanci: 1–2 al mese, ossia 12–24 all'anno.
- Carico utile per volo: 10.000 t.
- Flusso annuo di merci: 120.000–240.000 t.
- Costo di consegna: 80–120 \$/kg.
- Orbite di destinazione: EML4/5 e GEO.

Questo approccio evita la trappola di costruire tutte le infrastrutture spaziali prima di ottenere ricavi. I primi carichi commerciali sono essi stessi componenti dell'infrastruttura futura.

8.6. Fase matura: relè a microonde e infrastrutture di servizio

La fase matura comincia quando il numero di centrali, data center e grandi piattaforme è sufficiente a mantenere una rete orbitale in funzionamento continuo. Il compito si estende allora dal lancio di nuove strutture all'assistenza di quelle già dispiegate.

Elementi principali della fase matura:

- una rete di relè a microonde in GEO;
- nodi di servizio permanenti presso i principali poli energetici;
- veicoli di riparazione e ispezione;
- stazioni di deposito;
- rimorchiatori orbitali;

- i primi insediamenti permanenti e gli equipaggi a rotazione in EML4/5;
- cantieri spaziali automatici e semiautomatici;
- un nodo di trasporto in EML1.

I relè a microonde consentono di distribuire l'energia in modo più flessibile tra le regioni terrestri, ridurre la dipendenza dalla geometria diretta tra centrale e rectenna e costruire una rete energetica anziché un insieme di centrali orbitali isolate. A Terra, il sistema deve comprendere rectenne riceventi, sottostazioni di conversione, accumulo tampone e collegamenti alle reti regionali.

La manutenzione permanente prolunga la vita delle centrali solari. È fondamentale: senza assistenza, la loro economia è limitata dalla durata dei singoli moduli. Se pannelli, trasmettitori, radiatori, elettronica e tralicci possono essere sostituiti in orbita, le centrali diventano impianti energetici manutenibili anziché satelliti usa e getta.

8.7. Suddivisione del trasporto per ambiente operativo

La logistica matura di StarRoad separa le funzioni di trasporto in base all'ambiente operativo, invece di affidarle a un unico veicolo universale.

AstroLiner gestisce il trasporto dalla Terra all'orbita e dall'orbita alla Terra. È un veicolo orbitale da trasporto pesante, un aliante di rientro e un portacontainer pesante, ma non deve diventare un veicolo interplanetario universale.

I trasporti interorbitali operano esclusivamente nello spazio. Non entrano in atmosfera e quindi non portano scudo termico di atterraggio, ali, sistemi marittimi o scafo rinforzato per l'ammarraggio. La loro massa a secco è minore e la vita utile più lunga, perché sono ottimizzati per i viaggi tra nodi orbitali.

Capsule specializzate scendono sui pianeti e riportano persone o merci in superficie. Non devono far parte dello scafo principale di AstroLiner: far scendere migliaia di tonnellate soltanto per consegnare un piccolo gruppo di persone o un carico ridotto è irrazionale.

La gerarchia dei trasporti è:

Ambiente	Veicolo principale	Funzione
Terra → orbita	AstroLiner / AstroLiner-S	trasporto superpesante di merci e moduli
Orbite alte e punti di Lagrange	trasporti e rimorchiatori interorbitali	trasporto tra LEO, GEO ed EML1/2/4/5
Orbita → superficie	capsule passeggeri e cargo	discesa di persone e merci
Nodi orbitali	stazioni, depositi e cantieri spaziali	stoccaggio, assemblaggio, riparazione e trasferimento

Questa suddivisione riduce la massa a secco di ogni classe di veicolo, limita i compromessi e rende la logistica spaziale più simile al trasporto marittimo, con portacontainer, rimorchiatori, porti, depositi, cantieri navali e imbarcazioni specializzate.

8.8. Ruolo di AstroLiner nella logistica matura

AstroLiner non è un veicolo spaziale universale. Il suo ruolo principale è quello di veicolo superpesante che compie cicli di trasporto verso l'orbita e di mezzo di ritorno riutilizzabile.

Trasporta verso l'alto:

- container di merci;
- moduli passeggeri;
- moduli di propellente;
- componenti da costruzione;
- pannelli, tralicci, cavi e radiatori;
- rimorchiatori interorbitali, assemblati o in parti;
- capsule di discesa;
- moduli di stazioni orbitali;
- componenti di centrali e data center.

Ritorna principalmente vuoto o con un carico di ritorno limitato:

- equipaggio;
- campioni;
- apparati costosi e riparabili;
- elettronica dismessa;
- componenti guasti o rimossi.

La configurazione di ritorno deve essere quanto più leggera possibile. Dopo la missione, la massa di ritorno di AstroLiner deve essere molto inferiore alla massa di lancio, perché il volo planato, il rientro atmosferico e l'ammarraggio in sicurezza richiedono una massa residua minima. Riportare sulla Terra migliaia di tonnellate di carico utile non è un compito ordinario; se ne occupano capsule specializzate o moduli di ritorno separati.

AstroLiner conserva una quantità limitata di delta-v proprio per quattro motivi:

1. indipendenza da infrastrutture non ancora pienamente dispiegate;
2. possibilità di utilizzare rotte alternative;
3. scenari di emergenza;
4. flessibilità nelle prime fasi operative.

In un sistema maturo, tuttavia, rimorchiatori e trasporti specializzati forniscono la maggior parte del delta-v interorbitale. Ciò riduce le sollecitazioni su AstroLiner, prolunga la vita dello scafo e abbrevia il ciclo lancio–scarico–ritorno–manutenzione–nuovo lancio.

8.9. trasporti e rimorchiatori interorbitali

I trasporti interorbitali costituiscono la flotta spaziale permanente di StarRoad. Operano tra LEO, GEO, EML1, EML2, EML4/5 e altri nodi senza entrare nell'atmosfera né tornare sulla Terra.

I loro compiti comprendono:

- portare i moduli dal punto di scarico di AstroLiner alle orbite di destinazione;
- rimorchiare centrali solari, data center e grandi tralicci;
- trasportare propellenti e fluidi di lavoro;
- trasportare moduli passeggeri;
- eseguire la manutenzione e sostituire componenti delle centrali;
- portare le capsule su orbite di servizio per la discesa;
- riportare i rimorchiatori vuoti a EML1 o EML4/5;
- supportare i cantieri orbitali.

Questi veicoli possono usare propulsione elettrica, magnetoplasmodinamica, nucleare-elettrica, solare-elettrica o ibrida. Poiché non devono mai entrare in atmosfera, possono essere altamente specializzati: grandi radiatori, tralicci leggeri, ampi serbatoi di fluido di lavoro, unità propulsive sostituibili e manutenzione nei cantieri orbitali.

Nell'architettura matura, è il trasporto interorbitale a trasformare StarRoad da sistema di lancio in rete di trasporto spaziale.

8.10. Discesa sulla Terra e sugli altri pianeti

La discesa è affidata a capsule specializzate, così AstroLiner non deve fungere da veicolo universale di rientro per ogni compito.

Tipi principali:

Capsula Passeggeri (PC) — capsula per persone, progettata per un rientro sicuro, le emergenze, l'atterraggio autonomo e l'integrazione con un modulo passeggeri.

Capsula Cargo (CCap) — capsula per merci di valore, campioni, attrezzature, materiale biologico, elettronica e componenti che devono tornare su una superficie.

Capsula di Ritorno Industriale (IRC) — capsula cargo rinforzata per riportare materiali alla rinfusa qualora tale mercato emerga in una fase successiva.

AstroLiner porta le capsule in orbita. I rimorchiatori interorbitali, o lo stesso AstroLiner nella fase iniziale, le trasferiscono su un'orbita di servizio per la discesa. Dopo la separazione, ogni capsula rientra e atterra autonomamente.

Luna, Marte, Venere e asteroidi impiegano sistemi di atterraggio distinti e adattati a ciascun ambiente. Nessun veicolo di discesa universale può servire tutti i corpi del Sistema solare, perché atmosfere, gravità, flussi termici, condizioni della polvere e requisiti di decollo differiscono troppo.

8.11. Moduli standardizzati

La standardizzazione è il fondamento della logistica di StarRoad. Come la containerizzazione marittima ha cambiato il commercio mondiale, i moduli orbitali standardizzati devono trasformare l'economia spaziale.

Tipi fondamentali di modulo:

Modulo Passeggeri (PM) — modulo pressurizzato utilizzabile in AstroLiner, in un trasporto interorbitale, in una stazione orbitale o in una capsula passeggeri. Contiene supporto vitale, sedili o cabine, riserve di emergenza, interfacce di attracco e punti di fissaggio standard.

Container Cargo (CC) — container pressurizzato o non pressurizzato per pannelli, tralicci, radiatori, cavi, attrezzature, sistemi robotici, ricambi e materiali di consumo.

Modulo Propellente (PrM) — modulo che immagazzina propellente, fluido di lavoro, acqua, ossigeno, idrogeno, argon, xenon o altri materiali di consumo per rimorchiatori e stazioni.

Modulo di Servizio (UM) — modulo energetico, termico, di comunicazione o controllo che può includere pannelli solari, batterie, radiatori, antenne, convertitori, scambiatori di calore ed elettronica di controllo.

Modulo di Costruzione (CM) — modulo contenente tralicci, travi, sezioni di telaio, robot di assemblaggio, sistemi di fissaggio, tiranti, cablaggi e strutture dispiegabili.

Modulo di Trasmissione dell'Energia (PTM) — modulo contenente antenne a microonde, array in fase, elettronica di potenza e sistemi di puntamento e controllo del fascio.

Ogni modulo deve avere standardizzati:

- classi dimensionali;
- interfacce strutturali;
- punti di presa robotici;
- interfacce di attracco;
- interfacce elettriche e termiche;
- identità digitale e registri di manutenzione;
- intervalli ammessi di massa e centro di gravità;
- modalità di fissaggio e separazione d'emergenza.

Ciò consente di assemblare stazioni, veicoli spaziali, centrali e complessi industriali come combinazioni di blocchi standard, anziché come mezzi unici.

8.12. Gerarchia delle infrastrutture orbitali

La logistica orbitale di StarRoad è organizzata come una gerarchia di nodi.

Terra / StarRoad. Produzione,
assemblaggio, lancio, riparazione di AstroLiner, fabbricazione dei moduli, preparazione dei propellenti, fornitura di energia e controllo del flusso merci.

LEO.

Zona di servizio per la discesa delle capsule, le ispezioni, le emergenze, le operazioni temporanee e la separazione delle capsule prima del rientro. Nel sistema maturo, LEO non è né il deposito principale né una fascia industriale sovraffollata.

GEO.

Zona per relè a microonde, piattaforme energetiche, comunicazioni e trasmissione di energia a regioni fisse della Terra. GEO è adatta a integrare l'energia orbitale con le reti terrestri.

EML1.

Principale nodo di trasporto del sistema Terra–Luna. AstroLiner può arrivarvi direttamente per scaricare moduli quando un carico non richiede un volo diretto alla destinazione finale. Qui si trovano depositi, rimorchiatori, controllo del traffico, nodi di riparazione e la stazione di interscambio dell'ascensore lunare.

EML1 deve essere altamente automatizzato. Non occorre una grande popolazione residente permanente: le persone possono rimanere nei tubi di lava lunari meglio protetti, a EML4/5 o a bordo di grandi stazioni, e recarsi a EML1 quando necessario.

EML2.

Zona scientifica e di osservazione per osservatori in silenzio radio, telescopi dello spazio profondo, stazioni di prova, comunicazioni nello spazio profondo e strutture scientifiche sul lato nascosto della Luna e nelle sue vicinanze.

EML4 / EML5.

Principali centri di una civiltà orbitale matura: cantieri spaziali, insediamenti, stazioni industriali, grandi centrali, assemblaggio di veicoli interplanetari, depositi, basi di riparazione e centri di controllo per l'ulteriore espansione.

8.13. Cantieri orbitali

I cantieri orbitali sono realizzati soprattutto in EML4/5. Il loro compito è assemblare strutture che non possono o non devono essere lanciate intere, nemmeno con StarRoad.

AstroLiner consegna materiali e strutture come carichi in confezioni piatte:

- pannelli;
- tralicci;
- profili strutturali;
- cavi;
- radiatori;
- specchi;
- membrane;
- serbatoi;
- assiemi portanti;
- sistemi robotici di assemblaggio.

Robot e teleoperatori eseguono l'assemblaggio. Le persone si occupano di manutenzione, supervisione, riparazioni complesse e decisioni eccezionali, ma non devono svolgere manualmente la maggior parte dei lavori pericolosi di assemblaggio.

I cantieri costruiscono:

- nuove centrali solari spaziali;
- grandi distese di radiatori;
- trasporti interorbitali;
- veicoli spaziali interplanetari;
- stazioni residenziali;
- complessi di lavorazione delle risorse asteroidali;

- componenti di future megastrutture.

A questa fase, StarRoad cessa di essere soltanto un sistema per lanciare dalla Terra. Diventa l'anello inferiore di una catena produttiva in cui la Terra fornisce componenti complessi, mentre lo spazio assume gradualmente l'assemblaggio, l'assistenza e parte della produzione.

8.14. Insediamenti orbitali e lunari

Gli insediamenti permanenti non nascono come fine a sé stessi, ma dalla necessità di mantenere grandi infrastrutture. Quando centrali, cantieri, rimorchiatori, relè, nodi produttivi lunari e piattaforme industriali diventano numerosi, l'assistenza interamente remota non è più sufficiente.

La forma principale di grande insediamento orbitale è una stazione rotante con gravità artificiale, come un toro di Stanford o una sua derivazione. Queste stazioni sono collocate soprattutto in luoghi stabili e adatti allo sviluppo di lungo periodo, tra cui EML4/5, e fungono da centri residenziali, di servizio, medici, di riparazione e amministrativi per l'industria orbitale.

Il personale permanente delle basi lunari e degli insediamenti industriali dovrebbe vivere non sulla Luna stessa, ma in stazioni a gravità artificiale in EML4/5. Ciò limita gli effetti sanitari a lungo termine della bassa gravità lunare mantenendo il personale vicino alle infrastrutture della Luna. La Luna funziona così soprattutto come sito industriale con turni a rotazione sulla superficie.

EML1 diventa il principale nodo di trasferimento e logistica del sistema lunare. Concentra depositi, moli, rimorchiatori, moduli di rifornimento, strutture di riparazione e controllo del traffico per i flussi tra Terra, Luna, EML4/5 e altre regioni orbitali. Mantenere il personale vicino alla Luna semplifica i cambi di turno, la risposta alle emergenze, le riparazioni e il controllo della produzione lunare rispetto all'invio ripetuto di equipaggi dalla Terra.

Un ascensore lunare che colleghi la superficie della Luna con la regione EML1 è un elemento importante di questa architettura. Offre un movimento regolare di merci e passeggeri tra la superficie e le infrastrutture orbitali: regolite, ossigeno, metalli, materiali da costruzione e moduli industriali salgono, mentre attrezzature, materiali di consumo ed equipaggi a rotazione scendono. Fornisce all'industria lunare un collegamento permanente con i cantieri orbitali, gli insediamenti e la logistica interorbitale senza continui lanci di razzi dalla superficie.

A causa della bassa gravità lunare, gli insediamenti lunari saranno principalmente basi industriali protette, gestite da turni a rotazione. Sosterranno complessi minerari, di lavorazione, energetici e costruttivi, attrezzature automatiche, produzione di ossigeno, trattamento della regolite, assemblaggio dei componenti dell'ascensore lunare e preparazione dei carichi per EML1.

La protezione dalle radiazioni per gli insediamenti orbitali e lunari utilizza più strati:

- schermatura passiva con acqua, polietilene, regolite lunare, combustibile o scorte tecniche;
- collocazione delle aree meglio protette nelle sezioni centrali e interne;
- protezione magnetica attiva per ridurre il flusso di particelle cariche;
- rifugi d'emergenza per gli eventi protonici solari.

Acqua, idrogeno, polietilene, combustibile e regolite lunare sono sia scorte utili sia massa schermante. La protezione non deve essere peso morto quando può essere integrata nel ciclo operativo di una stazione, una base lunare, un ascensore lunare o un nodo EML1.

8.15. Analogia logistica: lo spazio come rete marittima

Un sistema StarRoad maturo assomiglia più alla logistica marittima che a un programma di lancio.

In questa analogia:

- **AstroLiner** è un portacontainer superpesante tra la Terra e l'orbita;
- **i rimorchiatori interorbitali** sono rimorchiatori portuali e d'altura;
- **i trasporti interorbitali** sono navi a lungo raggio;
- **EML1** è un porto di transito e un nodo di distribuzione;

- **GEO** è una rada energetica e di comunicazione;
- **EML4/5** sono porti industriali, cantieri e città;
- **le capsule** sono mezzi da sbarco specializzati;
- **i moduli PM, CC, PrM, UM, CM e PTM** sono container e blocchi funzionali.

Questo approccio cambia la cultura stessa del volo spaziale. Le missioni uniche lasciano il posto a orari, circolazione dei container, riparazioni, assicurazioni, standard, depositi, controllo del traffico portuale e movimentazione industriale delle merci.

8.16. Economia del flusso merci

StarRoad rovescia la regola centrale dell'economia spaziale. Nella logistica a razzo conviene risparmiare chilogrammi, perché ogni chilogrammo è costoso. Nella logistica StarRoad conviene standardizzare, produrre in serie e lanciare in grandi lotti.

Questo modifica le scelte ingegneristiche:

- le strutture possono essere più robuste e più facili da riparare;
- le apparecchiature possono disporre di margini maggiori;
- le stazioni possono essere progettate come strutture manutenibili anziché satelliti usa e getta;
- la massa di radiatori, schermature e telai cessa di essere un vincolo assoluto;
- le grandi piattaforme diventano più economiche di molti piccoli veicoli di breve durata.

L'effetto economico principale è che StarRoad crea un mercato delle strutture orbitali, non soltanto un mercato dei lanci. I ricavi possono derivare non solo dalla consegna delle merci, ma anche dalla produzione, proprietà e gestione di centrali, data center, relè, rimorchiatori, cantieri e reti energetiche.

Tra i possibili modelli commerciali:

- vendita di lanci a clienti esterni;
- contratti a lungo termine per infrastrutture energetiche;
- proprietà e gestione di centrali solari spaziali;
- joint venture con imprese energetiche;
- locazione di capacità nei data center orbitali;
- vendita di energia tramite rectenne terrestri;
- contratti di servizio per strutture orbitali;
- tariffe logistiche per il trasporto interorbitale;
- assicurazione, riparazione e prolungamento della vita delle stazioni.

Questo approccio riduce la dipendenza da un singolo mercato. Se la domanda esterna di lanci è insufficiente, StarRoad crea un proprio flusso di merci mediante programmi energetici e industriali orbitali.

8.17. Fasi di sviluppo del mercato e della logistica

Lo sviluppo della domanda e della logistica orbitale procede in quattro fasi.

I. Fase di fondazione (10–20 anni) — flusso di carichi energetici.

AstroLiner-S lancia centrali solari spaziali complete o quasi complete, centri dati, ripetitori, moduli di servizio e i primi rimorchiatori. L'obiettivo principale è dimostrare la regolarità dei lanci, creare i primi impianti energetici commerciali e sviluppare un mercato per la generazione orbitale di energia.

II. Fase matura (20–50 anni) — rete di servizi orbitali. Compagno

ripetitori in GEO, un nodo in EML1, stazioni di servizio, veicoli di riparazione, rimorchiatori e i primi insediamenti permanenti e cantieri navali in EML4/5. AstroLiner passa gradualmente dai voli diretti verso ogni destinazione al ruolo di sistema di trasporto pesante che scarica nei nodi della rete.

III. Fase industriale (50–100 anni) — produzione extraterrestre. Inizia

la costruzione attiva di veicoli interplanetari, complessi per la lavorazione degli asteroidi e grandi habitat orbitali. Il sistema utilizza sempre più materiali extraterrestri, riducendo la dipendenza da massicce spedizioni di materie prime dalla Terra.

IV. Fase evolutiva e potenziale (oltre 100 anni) — infrastruttura del Sistema solare. EML4/5

diventano punti di partenza per l'espansione nel Sistema solare, la costruzione di megastrutture, sciame solari, cilindri di O'Neill, telescopi per lo spazio profondo e missioni interstellari.

Questa sequenza è importante: StarRoad non richiede una civiltà spaziale pienamente sviluppata fin dall'inizio. Parte da fonti di domanda ben definite — energia e calcolo — e solo successivamente si espande fino a diventare un'economia spaziale completa.

8.18. Prospettive evolutive: il successore di StarRoad

StarRoad non deve necessariamente essere la forma definitiva delle infrastrutture di trasporto planetario. Può essere considerato una fase transitoria ma necessaria tra l'era dei razzi e le megastrutture mature dell'astroingegneria.

Tra i sistemi ipotetici noti — ascensore spaziale, anello di lancio, StarTram, anello orbitale e torre spaziale — soltanto un anello orbitale avanzato potrebbe infine superare StarRoad per capacità di carico. Una struttura simile richiede però un'industria orbitale potente e già consolidata, immense quantità di materiali, cantieri, energia, assemblaggio robotico ed esperienza nella gestione di megastrutture.

Un possibile successore di StarRoad è un sistema di due anelli collegati:

- un anello di trasporto che circonda la Terra e il cui punto più basso incontra la superficie;
- un anello portuale geosincrono e un bacino spaziale all'altitudine GEO;
- diversi rotori a cavo mobili all'interno di condotti sigillati nell'anello di trasporto;
- un collegamento tra l'anello di trasporto e quello portuale geosincrono nel punto più alto della traiettoria.

Come un anello di lancio, l'anello di trasporto contiene rotori che si muovono rapidamente in canali sigillati, ma potrebbe essere più sicuro. A differenza dell'anello di lancio, i suoi rotori a cavo mobili non compiono curve strette e subiscono carichi radiali molto inferiori; in caso di rottura possono essere progettati per allontanarsi dal pianeta senza distruggere l'intera struttura. L'anello di trasporto sarebbe una torre spaziale anulare dinamica, estesa dalla superficie all'anello portuale geosincrono.

Questo sistema non è un'alternativa al primo StarRoad, ma un possibile successore. Senza StarRoad o un sistema dorsale paragonabile, la massa, le attrezzature, i cantieri e la capacità energetica necessari a un anello orbitale non potrebbero essere lanciati a costi sufficientemente bassi.

8.19. Potenziale dell'ingegneria planetaria: il Sistema solare come unico sistema di risorse

StarRoad potrebbe infine aprire possibilità oggi impensabili, tra cui l'astroingegneria su larga scala e la terraformazione. Sono scenari tardi della civiltà, possibili solo dopo la nascita di infrastrutture mature nel Sistema solare: sollevamento economico di merci dalla Terra, energia solare spaziale, cantieri orbitali in EML4/5, estrazione dagli asteroidi, trasporti interplanetari, una flotta di navi cisterna ed energia autonoma per le missioni nello spazio profondo.

L'idea chiave è considerare Venere e Marte non come due programmi indipendenti, ma come un unico sistema di risorse. Marte è privo di azoto, idrogeno, atmosfera densa e protezione magnetica. Venere possiede enormi riserve di CO₂ e azoto e massa e gravità simili a quelle terrestri, ma sono bloccate in un ambiente estremo: circa 460 °C, circa 92 atmosfere di pressione, atmosfera di CO₂, nubi di acido solforico, assenza di campo magnetico e rotazione retrograda estremamente lenta.

8.19.1. Fase preliminare: infrastrutture del Sistema solare

Prima di iniziare la terraformazione planetaria devono esistere:

- StarRoad come canale economico per sollevare massa dalla Terra;
- centrali solari spaziali e sciame solari come fonti di energia;
- cantieri orbitali in EML4/5;
- estrazione avanzata dagli asteroidi di metalli, acqua e sostanze volatili;

- decine o centinaia di insediamenti spaziali avanzati e autosufficienti, con i nodi energetici che li alimentano;
- una flotta di navi cisterna che trasporta idrogeno, acqua, azoto e CO₂;
- sistemi di trasporto nucleare-elettrici o a fusione per le lunghe rotte.

Una data ragionevole per l'avvio di questi programmi non è anteriore a oltre 100 anni dall'entrata in servizio di StarRoad, con una possibile accelerazione se le infrastrutture spaziali cresceranno esponenzialmente.

8.19.2. Venere: fasi della terraformazione

Venere può essere più adatta di Marte a un insediamento umano massiccio e duraturo: la sua gravità è circa 0,9g, la massa è vicina a quella terrestre e l'energia solare è abbondante. Il problema centrale è la barriera iniziale estremamente elevata.

1. Raffreddamento e deposizione

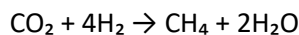
della CO₂. Un grande schermo solare viene collocato nel punto L1 Venere–Sole per ridurre l'energia in arrivo. Con un raffreddamento profondo, una parte considerevole della CO₂ diventa liquida o solida e si deposita sulla superficie. La pressione cala nettamente, trasformando un ambiente infernale in uno accessibile all'ingegneria e alla costruzione.

2. Anello quasi sincrono e porto orbitale. Dopo

il raffreddamento viene costruito un anello a sostegno dinamico circa 33.400 km sopra la superficie, all'altitudine della futura orbita sincrona di 24 ore di Venere. La circonferenza è circa 248.000 km, la gravità locale circa 0,021g e la velocità circolare libera circa 2,87 km/s. Finché Venere ruota troppo lentamente, rotori attivi sostengono l'anello, che funge da porto orbitale, nodo energetico e punto di ricezione delle navi cisterna.

3. Trattamento dell'atmosfera e importazione di

idrogeno. La CO₂ depositata viene sollevata fino ai complessi di trattamento. L'idrogeno arriva dal Sistema solare esterno, dai corpi ghiacciati e dalle risorse asteroidali. La reazione fondamentale per fissare la CO₂ è:



L'acqua viene usata per formare gli oceani e produrre ossigeno; il metano serve da combustibile e materia prima chimica; il carbonio viene fissato nei materiali e nei depositi di lunga durata; i composti dello zolfo vengono trasformati in forme minerali. L'azoto in eccesso e parte della CO₂ possono essere inviati su Marte.

4. Una Venere abitabile

. La terraformazione primaria può considerarsi completa dopo la formazione di oceani, atmosfera di azoto e ossigeno, clima controllato, protezione magnetica o magnetosferica e una biosfera iniziale. Venere può essere abitabile anche con un periodo di rotazione intermedio di circa 120 ore: notti di circa 60 ore sono mitigate dagli oceani, dalle nubi, da un'atmosfera di 1,3–1,6 bar, dal trasporto del calore e da un sistema di specchi e schermi.

5. Correzione orbitale della rotazione e giornata di 24 ore. Portare

Venere a un periodo di 24 ore non è un requisito per l'abitabilità, ma un lungo perfezionamento ingegneristico. Passare dall'attuale rotazione retrograda a una rotazione diretta di 24 ore richiede un aumento del momento angolare di circa $4,3 \times 10^{33} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$. Con una velocità di espulsione del fluido di lavoro di circa 100 km/s, servono circa $1,1 \times 10^{21} \text{ kg}$ di fluido. Con un'energia cinetica ideale del getto prossima a $5 \times 10^{30} \text{ J}$, 300 EW danno un tempo di circa 500–600 anni. Considerando le perdite ingegneristiche e un'energia di 10^{31} – $3 \times 10^{31} \text{ J}$, il periodo sale a circa 1.000–3.000 anni a 300 EW e a diverse migliaia di anni a 100–200 EW. Due anelli di trasporto, collegati simmetricamente sui lati opposti sia del pianeta sia dell'anello quasi sincrono, trasferiscono il momento rotazionale dall'anello alla superficie. Due anelli, anziché l'unico impiegato nelle configurazioni terrestri e marziane, offrono ulteriore stabilizzazione dinamica durante il trasferimento. Raggiunto il periodo di 24 ore, l'anello diventa un bacino venusiano pienamente sincrono.

8.19.3. Marte: fasi della terraformazione

Marte è più semplice per le prime basi, ma più difficile da trasformare in un ambiente planetario completo. I suoi limiti comprendono gravità di circa 0,38g, atmosfera rarefatta, poco azoto, scarse sostanze volatili accessibili e debole protezione magnetica. Marte richiede quindi non solo interventi locali, ma anche materia importata da Venere, dagli asteroidi e dal Sistema solare esterno.

1. Magnetosfera artificiale.

La protezione magnetica è la prima condizione per una terraformazione duratura: anelli orbitali simili agli anelli

sincrono e di trasporto previsti per la Terra, piattaforme energetiche e riflettenti e sistemi magnetici integrati nell'anello sincrono. Senza di essa, la nuova atmosfera rimane esposta al vento solare e alla perdita graduale. Come l'anello quasi sincrono venusiano, l'anello sincrono marziano unisce funzioni di trasporto, orbitali, energetiche e magnetosferiche. Pannelli solari e sistemi di accumulo integrati alimentano il circuito magnetosferico, l'elettronica di potenza e le infrastrutture di controllo dell'anello che mantengono il campo magnetico artificiale del pianeta.

2. Importazione di atmosfera

e acqua. L'azoto e parte della CO₂ arrivano da Venere; l'acqua proviene dagli asteroidi, dai corpi ghiacciati e dal Sistema solare esterno. Marte non viene terraformato isolatamente: la rete comune di risorse fornisce le sostanze volatili mancanti. Importare l'atmosfera venusiana offre a Marte un clima più mite e stabile prima di quanto permetterebbe creare e riscaldare un'atmosfera usando soltanto le risorse del pianeta.

3. Ispessimento dell'atmosfera e riscaldamento del

clima. Una volta presente la protezione magnetica, CO₂, azoto, vapore acqueo e altri agenti serra aumentano gradualmente l'atmosfera. Un'atmosfera più densa compensa parte del problema termico marziano, migliora il trasporto del calore, aumenta la pressione e amplia le regioni in cui può esistere acqua liquida.

4. Acqua, suoli e biosfera.

Si creano bacini idrici, si tratta la regolite, si riduce la tossicità del suolo e si avviano ecosistemi microbici e vegetali. Lo sviluppo procede per fasi: biosfere locali protette, poi zone climatiche regionali e solo in seguito un tentativo di stabilizzazione ambientale globale.

5. Un ambiente utilizzabile su

scala planetaria. Con sufficienti importazioni di azoto, CO₂ e acqua, Marte potrebbe acquisire un'atmosfera densa e regolata, protezione magnetica artificiale, riserve idriche, regioni biologicamente attive e grandi infrastrutture industriali. A 0,38g rimarrà probabilmente meno adatto di Venere a un insediamento umano massiccio, duraturo e simile a quello terrestre, ma la bassa gravità offre vantaggi propri: salita e atterraggio più economici, agevole logistica orbitale, costruzione di strutture immense, produzione in bassa gravità e ruolo di nodo industriale, scientifico e di transito tra il Sistema solare interno e la fascia degli asteroidi.

8.19.4. Vantaggio dello scenario combinato

Uno scenario combinato Venere–Marte–Sistema solare esterno è più solido di entrambi gli approcci isolati. La terraformazione del solo Marte è limitata dalla carenza di azoto, acqua, energia e protezione magnetica. Quella della sola Venere richiede di trattare un'immensa atmosfera di CO₂ senza un utilizzatore esterno per l'eccedenza. Il modello comune trasforma il problema di un pianeta nella risorsa dell'altro: azoto e CO₂ venusiani sostengono Marte, idrogeno e acqua del Sistema solare esterno sostengono Venere e l'industria degli asteroidi fornisce metalli e massa da costruzione.

In questa logica, StarRoad non è uno strumento diretto di terraformazione, ma il primo anello di una catena causale: StarRoad solleva massa a basso costo; le centrali solari spaziali forniscono energia; EML4/5 rende possibili i cantieri; l'estrazione dagli asteroidi fornisce materie prime; una flotta di navi cisterna scambia materia tra i pianeti; solo allora diventa possibile l'ingegneria planetaria.

8.20. Conclusione strategica

StarRoad e AstroLiner creano un'economia spaziale permanente, non un programma di lancio.

I mercati iniziali sono l'energia solare spaziale, i data center orbitali e le infrastrutture energetiche. I mercati maturi sono assistenza, riparazione, ritrasmissione dell'energia, logistica interorbitale, cantieri e insediamenti. La fase industriale crea un'economia asteroidale e interplanetaria. La fase evolutiva apre la strada a megastrutture, missioni lontane ed espansione della civiltà nel lungo periodo.

L'idea centrale della sezione è che StarRoad non cerca un mercato nel vecchio modello del volo spaziale. Crea un nuovo mercato in cui flusso massiccio di merci, energia orbitale, infrastrutture informatiche e industria spaziale formano un unico sistema logistico.

9. Modello economico del progetto

9.1. Metodo e ipotesi principali

Il modello economico si basa sui seguenti principi:

- **Produzione in serie e interna:** le economie di scala riducono del 30–50% il costo di frese meccaniche, generatori e sistemi di accumulo.
- **Localizzazione:** impiego di risorse, manodopera e materiali africani, calibrato sul Spon's African Construction Cost Handbook.
- **Prezzi di mercato** correnti: dati 2025–2026 per BESS e centrali geotermiche.
- **Cambio indicativo:** 1 USD ≈ 100 RUB / 0,90 EUR. Tutti i calcoli sono in dollari costanti del 2025, senza inflazione. Un'incertezza di ±30% è normale in uno studio di prefattibilità.

9.2. Costo dello scavo nelle condizioni africane

Il Spon's African Construction Cost Handbook dettaglia i costi di manodopera e materiali in 13 paesi africani. Non fornisce un costo unitario diretto per gallerie di grandissima sezione, perché le condizioni variano troppo, ma consente di calibrare le stime.

Tipo di opera	Estensione	Costo medio per km	Costo totale (miliardi USD)	Motivazione
Galleria principale (17,5 × 12,5 m)	2.050 km	12–18 milioni di dollari	\$24.6–36.9	Estrapolazione dei dati mondiali sulle grandi sezioni, corretta per le condizioni africane.
Gallerie collettori (6 × 2.050 km, ø2 m)	12.300 km	3–5 milioni di dollari	\$36.9–61.5	Basato su lavori minerari reali in Africa: 3.500 dollari/m per piccole sezioni.
Galleria di servizio (ø3 m)	2.050 km	4–6 milioni di dollari	\$8.2–12.3	Come i collettori, con correzione per la sezione maggiore.
Gallerie inclinate (40 × 16 km, 17,5 × 12,5 m)	640 km	12–22 milioni di dollari	\$7.7–14.1	Come la galleria principale, con maggiorazione per la pendenza di 30°.
Scavo totale	17.040 km		\$77.4–124.8	

9.3. Flotta di frese meccaniche di produzione interna

Un ordine in serie di 40 frese principali, 240 per i collettori e 40 di servizio, con linee di montaggio in Gabon e nella Repubblica Democratica del Congo, riduce i costi del 30–50%.

Tipo di scudo	Diametro	Quantità	Prezzo unitario, serie e produzione interna	Totale (miliardi USD)
Fresa principale (SR-Main)	circa 18 m	40 unità	35–60 milioni di dollari	\$1.4–2.4
Fresa per collettori (SR-Collector)	2 m	240 unità	0,8–1,5 milioni di dollari	\$0.19–0.36
Fresa di servizio (SR-Service)	3 m	40 unità	1,2–2 milioni di dollari	\$0.05–0.08
Stabilimenti di montaggio (2)	—	—	1–2 miliardi di dollari	\$1–2
Totale frese meccaniche				\$2.64–4.84

9.4. Sistema geotermico autonomo di energia termica

La centrale geotermica reale di Menengai, in Kenya, da 35 MW è costata circa 35–40 milioni di dollari, pari a 1.000–1.250 dollari/kW, inclusi perforazioni e pozzi di vapore. Con 40 impianti costruiti in serie e produzione locale, il costo unitario è stimabile in 800–1.200 dollari/kW.

- Costo di una centrale da 2,5 GW: 2–3 miliardi di dollari.
- Costo di 40 centrali: 80–120 miliardi di dollari.

La stima è delimitata dal costo inferiore delle centrali geotermiche russe — circa 650 \$/kW secondo i dati di Iturup — e da quello superiore dei progetti complessi, circa 1.500 \$/kW.

Il calcolo assume la stima massima di 100 GW per la potenza totale del sistema geotermico autonomo. La potenza realmente disponibile potrà essere valutata solo dopo l'indagine geologica e potrebbe essere molto inferiore, fino a pochi gigawatt. Le risorse liberate sarebbero allora destinate ad altre fonti di generazione.

9.5. Sistema di accumulo dell'energia

L'accumulo è articolato su tre livelli:

9.5.1. Livello primario: accumulo di lunga durata ai terminali

Distribuito tra 40 terminali, conserva con margine i 360 GWh necessari a un lancio. Le tecnologie preferite ai prezzi attuali sono:

Tecnologia di accumulo	Costo unitario	Fonte
Accumulo gravitazionale	50–100 dollari/kWh	Esperienza Energy Vault: 25 MW/100 MWh per 7,7 milioni di dollari, cioè 77 dollari/kWh. Rendimento 75–85% e vita utile 30–40 anni.
Pompaggio idroelettrico e piccolo idroelettrico sul Canale Idrotermale Principale	80–150 dollari/kWh	Sfrutta il dislivello naturale lungo il tracciato.
BESS agli ioni di litio	125 dollari/kWh, installazione completa	Secondo Ember (2025): 75 dollari/kWh per apparecchiature cinesi più 50 dollari/kWh di installazione. Alla scala di 215 GWh, il costo potrebbe scendere a 100 dollari/kWh.

La capacità primaria totale è di 360 GWh, pari a un ciclo completo di accelerazione. Con il 70% di accumulo gravitazionale/pompaggio e il 30% di BESS, il costo è:

Componente	Capacità	Costo unitario	Costo
Gravitazionale + pompaggio	250 GWh	60 dollari/kWh	15 miliardi di dollari
BESS	110 GWh	125 dollari/kWh	13,75 miliardi di dollari
Totale livello primario	360 GWh		28,75 miliardi di dollari

Intervallo con incertezza: 22–35 miliardi di dollari.

9.5.2. Livello secondario: buffer presso le bobine e nel tunnel

I volani accanto alle bobine smorzano i transitori. Costo unitario: 0,5–1 milione di dollari/MWh; un buffer da 1–5 GWh costa 0,5–5 miliardi.

9.5.3. Livello impulsivo: stabilizzazione al microsecondo

I supercondensatori compensano soltanto impulsi di pochi microsecondi e stabilizzano la tensione nei bruschi cambi di carico. La capacità totale è inferiore all’1% dell’energia di lancio, cioè 1–3 GWh. A 300–500 dollari/kWh costa 0,3–1,5 miliardi.

9.5.4. Costo totale dell’accumulo

Livello	Tecnologia	Capacità	Costo (miliardi USD)
Primario	Gravitazionale + pompaggio + BESS	360 GWh	\$22–35
Buffer	Volani	1–5 GWh	\$0.5–5
Impulsivo	Supercondensatori	1–3 GWh	\$0.3–1.5
Totale accumulo			\$22.8–41.5

9.6. Poli industriali e logistica

Voce di costo	Costo (miliardi USD)	Motivazione
Polo industriale del Gabon: produzione delle navette e dei moduli di lancio	\$3–6	Bacini di costruzione, fabbriche e gru
Polo industriale della Repubblica Democratica del Congo: portale atmosferico e moduli ad alta velocità	\$2–4	Polo industriale montano e sistema di elettrolisi
Infrastrutture portuali in Gabon e sul lago Tanganica	\$1–3	Banchine, gru e magazzini
Linee elettriche e strade lungo i 2.050 km	\$4–8	Linee da 220 kV, strade e ponti
Canale Idrotermale Principale	\$2–5	Movimenti terra, rivestimento e chiuse
Totale	\$12–26	

9.7. R&S e prototipazione — Fase 0

Voce di costo	Intervallo (miliardi USD)	Motivazione
Modellazione matematica e CFD	\$0.01–0.03	Riferimento: sviluppo di gemelli digitali per hyperloop, 4,5 milioni di CHF.
Rilievo geologico del tracciato di 2.050 km	\$0.015–0.025	7.000–12.000 dollari/km per il rilievo dettagliato delle aree difficili da raggiungere.
Progettazione e documentazione BIM	\$0.02–0.05	Capitolati, progetti preliminari ed esecutivi.
Impianto di prova per portale e superconduttori	\$0.01–0.03	Banco prova per una camera-portale prototipo e moduli di levitazione.
Costituzione del consorzio e accordi legali	\$0.005–0.015	Negoziati internazionali, registrazione e assicurazione.
Totale Fase 0	\$0.06–0.15	

Il budget R&S di 0,06–0,15 miliardi di dollari non è fisso. Studi approfonditi, un prototipo di portale a grandezza naturale o banchi prova su larga scala possono portarlo a 0,5–3 miliardi. La sintesi CAPEX adotta quindi 0,1–3 miliardi e una mediana di 1,5 miliardi.

9.8. Sintesi finale del CAPEX

Voce di costo	Intervallo (miliardi USD)	Mediana (miliardi USD)	Quota CAPEX (%)
Scavo delle gallerie	\$77.4–124.8	\$101.1	41%
Flotta e produzione delle frese	\$2.64–4.84	\$3.74	1.5%
Sistema geotermico autonomo: 40 centrali da 2,5 GW	\$80–120	\$100	40%
Accumulo su tre livelli	\$22.8–41.5	\$32.2	13%
Poli industriali e logistica	\$12–26	\$19	8%
R&S, licenze e amministrazione	\$0,1–3	\$1.5	0.6%
Riserva per imprevisti (15%)	\$31–49	\$40	16%
CAPEX TOTALE	\$225–365	\$295	100%

Conclusione principale: il costo mediano stimato di StarRoad è di circa 300 miliardi di dollari.

9.9. Distribuzione per fase (miliardi USD)

Voce di costo	Fase 0	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
Scavo delle gallerie	—	—	\$5	\$20	\$70	\$6
Frese meccaniche	—	\$2	\$0.7	\$0.8	\$0.2	\$0.1
Sistema geotermico autonomo di energia termica	—	\$60	\$20	\$20	—	—
Accumulo	—	\$10	\$10	\$8	\$3	\$1
Poli industriali + logistica	—	\$5	\$3	\$3	\$5	\$3
R&S e licenze	\$1.5	\$0.2	\$0.1	\$0.1	\$0.05	\$0.05
Riserva (15%)	\$0.23	\$11.6	\$5.8	\$7.8	\$11.7	\$1.5
TOTALE per fase	\$1.73	\$88.8	\$44.6	\$59.7	\$90	\$11.7
Totale cumulato	\$1.73	\$90.5	\$135.1	\$194.8	\$284.8	\$296.5

9.10. Ritorno dell’investimento ed evoluzione del costo di trasporto

Tutti i dati di questa sottosezione sono strettamente teorici.

9.10.1. Evoluzione della frequenza di lancio e del costo al chilogrammo

StarRoad non raggiunge subito la piena capacità. Frequenza e costo del trasporto evolvono con l’entrata in servizio di nuove linee, l’aumento della flotta e lo sviluppo dell’infrastruttura orbitale.

Modello del costo verso l’orbita geostazionaria e oltre, dollari/kg:

Periodo	Linee	Lanci all'anno	Frequenza	Costo del trasporto (\$/kg)	Commento
Anni 1–2, pilota	1	12–24	1–2 al mese	\$80–120	Primi lanci commerciali. Messa a punto operativa, costi generali elevati e piccola serie.
Anni 3–5	1	50–100	1–2 a settimana	\$30–50	Inizio dell'esercizio in serie. La flotta cresce a 3–5 navette e le economie di scala riducono i costi.
Anni 6–10	1	200–300	circa 1 al giorno	\$10–20	La prima linea raggiunge la capacità di progetto e la manutenzione è completamente automatizzata.
Anni 11–15	2	500–700	circa 2 al giorno	\$3–8	Entra in servizio la seconda linea; i costi fissi si dividono fra due acceleratori.
Anni 16–25	3–4	1000+	3–5 al giorno	\$0.8–3	Espansione a 3–4 linee parallele. Centrali solari spaziali oltre 1 GW forniscono energia orbitale per manovre e trattamento dei carichi.
Anni 26+	5+	1500+	5–10 al giorno	\$0.3–1	Infrastruttura matura. Le centrali spaziali alimentano acceleratore e fabbriche orbitali; il costo marginale dell'energia è quasi nullo.

9.10.2. Calcolo del costo di un lancio (\$/kg)

Formula per periodo: $C_{kg} = (C_{energia} + C_{manutenzione} + C_{ammortamento} + C_{gestione}) / M_{carico}$, dove:

- $C_{energia}$ comprende elettricità, raffreddamento e sistemi ausiliari.
- $C_{manutenzione}$ riguarda navette e infrastruttura.
- $C_{ammortamento}$ è l'ammortamento di 300 miliardi di dollari di CAPEX in 50 anni.
- $C_{gestione}$ comprende personale, logistica, assicurazione e altri costi operativi.
- M_{carico} è la massa utile per lancio: 10.000 t.

Parametri finali per periodo:

Periodo	Lanci/anno	Energia (\$/kg)	Manutenzione (\$/kg)	Ammortamento (\$/kg)	Gestione (\$/kg)	Costo totale (\$/kg)
Anni 1–2	12	1.8	6.63	50	3.57	62
Anni 3–5	50	1	1.25	12	0.67	14.92
Anni 6–10	250	0.36	0.23	2.4	0.13	3.12
Anni 11–15, 2 linee	600	0.12	0.113	1	0.061	1.29
Anni 16–25, 3–4 linee	1200	0.045	0.049	0.5	0.026	0.62
Anni 26+, 5+ linee ed energia solare spaziale	2000	0.015	0.015	0.3	0.008	0.34

9.10.3. Struttura del costo di lancio in valori assoluti

Per un anno medio di ciascun periodo, con 10.000 t di carico utile:

Periodo	Numero di lanci	Energia per lancio (milioni USD)	Manutenzione (milioni USD)	Ammortamento (milioni USD)	Costi operativi (milioni USD)	Totale per lancio (milioni USD)
Anni 1–2	12	18	66.3	500	35.7	620
Anni 3–5	50	10	12.5	120	6.7	149.2
Anni 6–10	250	3.6	2.34	24	1.26	31.2
Anni 11–15	600	1.2	1.13	10	0.61	12.93
Anni 16–25	1200	0.45	0.49	5	0.26	6.2
Anni 26+	>2000	0.15	0.146	3	0.079	3.38

9.10.4. Ipotesi principali dei calcoli

1. **Energia:** prezzo iniziale di 0,05 dollari/kWh; dal 26° anno scende a 0,005 dollari/kWh grazie alle centrali solari spaziali e alla capacità geotermica propria.
2. **Manutenzione:** alta nel pilota per riparazioni, messa a punto e personale in eccesso; entro il decimo anno diventa manutenzione automatizzata in linea.

- 3. Ammortamento:** 300 miliardi di CAPEX in 50 anni equivalgono a 6 miliardi l'anno. Con 250 lanci annui sono 24 milioni per lancio. È una stima prudente senza compensare altri ricavi. In alternativa, i 6 miliardi recuperati ogni anno possono alimentare gli investimenti in nuove diramazioni StarRoad.
- 4. Centrali solari spaziali:** dal sedicesimo anno alimentano fabbriche orbitali e parte dell'acceleratore, riducono i costi energetici e moltiplicano i ricavi dalla vendita di energia.

9.10.5. Andamento integrato: ricavi e costi

Periodo	Lanci/anno	Prezzo medio di mercato (\$/kg)	Ricavi da lancio (miliardi USD/anno)	Costo (miliardi USD/anno)	Utile lordo (miliardi USD/anno)
Anni 1–2	12	\$100	12	7.44	4.56
Anni 3–5	50	\$39	19.5	7.45	12.04
Anni 6–10	250	\$9.6	24	7.8	16.2
Anni 11–15	600	\$3.9	23.4	7.76	15.64
Anni 16–25	1200	\$1.6	19.2	7.44	11.76
Anni 26+	2000	\$0.5	10	6.75	3.25

Nota: i 35–44 miliardi di dollari annui dalla vendita di energia geotermica non sono inclusi. Sono un flusso separato che copre ammortamento e costi operativi dell'infrastruttura.

9.10.6. Conclusione sull'evoluzione del costo

StarRoad parte da 80–120 dollari/kg verso l'orbita geostazionaria e oltre: già 10–15 volte meno dei 1.400 dollari/kg di Falcon Heavy verso l'orbita bassa e paragonabile all'obiettivo Starship di 200 dollari/kg. Scende a 10 dollari/kg al decimo anno, a 1 dollaro/kg al venticinquesimo e sotto 0,5 dollari/kg verso il trentesimo, con 5+ linee ed energia solare spaziale. Energia solare e metalli asteroidali diventano così accessibili all'industria terrestre.

Conclusione principale: StarRoad è competitiva già nel periodo pilota. Scala e sinergia con l'energia solare spaziale riducono il prezzo di due ordini di grandezza in trent'anni.

9.11. Confronto con le alternative

Progetto	Tipo	Investimento (CAPEX / R&S)	Ritorno	Costo / LCOE	Nota
StarRoad, componente energetica: geotermia + accumulo	Energia	100–150 miliardi di dollari	5–7 anni con la vendita di energia	0,05 dollari/kWh	Solo generazione geotermica e accumulo. Si ripaga come progetto energetico autonomo.
StarRoad, componente di trasporto: galleria, portale e navette	Trasporto	150–200 miliardi di dollari	8–12 anni, compresi i ricavi del carico	1–10 dollari/kg	Acceleratore, portale e navette. Si ripaga con il trasporto e usa l'energia della prima componente.
StarRoad, sistema completo	Energia + trasporto	circa 300 miliardi di dollari	8–12 anni, ricavi combinati	0,05 dollari/kWh e 1–10 dollari/kg	Progetto integrato con ricavi da energia e carico.
Falcon Heavy, sviluppo	Trasporto	circa 5 miliardi di dollari in R&S	circa 10–15 anni a frequenza commerciale	circa 1.400 dollari/kg	Razzo esistente. Qui il CAPEX è sviluppo, non infrastruttura.
Starship, sviluppo	Trasporto	circa 10 miliardi di dollari in R&S	circa 10–15 anni con il mercato obiettivo	obiettivo 200 dollari/kg; potenziale 50–100 dollari/kg	In sviluppo. L'investimento riguarda la R&S, non un'infrastruttura permanente.
Grand Inga, idroelettrico nella Repubblica Democratica del Congo	Energia	80–100 miliardi di dollari	15–25 anni	0,03–0,05 dollari/kWh	Grande centrale idroelettrica; solo energia.
Grande centrale nucleare, 2 unità per circa 2,4 GW	Energia	15–20 miliardi di dollari	20–30 anni	0,05–0,08 dollari/kWh	Tipica centrale nucleare; solo energia.

9.12. Conclusione economica

Il modello mostra che StarRoad è realizzabile, con un CAPEX mediano di circa 300 miliardi di dollari. Fattori principali:

- 1. Il sistema geotermico, 80–120 miliardi di dollari,** è la componente più costosa ma si ripaga come progetto energetico autonomo in 5–7 anni.
- 2. Lo scavo, 77–125 miliardi di dollari,** è tecnicamente gestibile con frese prodotte in serie e fabbricazione interna.
- 3. L'accumulo, 23–42 miliardi di dollari,** si basa sul calo dei BESS a 125 dollari/kWh e su sistemi gravitazionali conformi alle migliori pratiche mondiali.
- 4. La R&S, 0,1–3 miliardi di dollari,** riflette il costo reale dei prototipi, non della costruzione su scala completa.

Attrattiva economica: a 0,05 dollari/kWh, StarRoad genera 35–44 miliardi di dollari l’anno dalla sola energia. Ciò copre i costi operativi e consente il ritorno del capitale tramite esportazioni energetiche prima dei lanci spaziali su larga scala.

10. Sicurezza e modalità operative di emergenza

StarRoad è progettata secondo un paradigma **estremo di continuità operativa in caso di guasto**, nel quale il cedimento di un singolo componente — e spesso di più componenti — non conduce a una catastrofe. La sicurezza è assicurata **dalla ridondanza fisica, dalla separazione funzionale e da protocolli multilivello** che coprono l’intero ciclo, dalla preparazione al volo.

10.1. Filosofia della sicurezza: nessun guasto isolato è fatale

- **Ridondanza dei sistemi critici.** Gli elementi essenziali — reattori di bordo, alimentazione dei segmenti dell’acceleratore e anelli a getto del portale — hanno ridondanza tripla o quadrupla.
- **Segmentazione e isolamento.** Il tunnel è diviso in sezioni autonome di 50–200 km, con alimentazione e vuoto indipendenti e **paratie meccaniche d’emergenza** tra le sezioni. Se una sezione vicina perde il vuoto, la paratia si **chiude solo quando non contiene una navetta**, impedendo un guasto a cascata.
- **Controllo attivo e passivo della levitazione.** Il sistema principale di stabilizzazione e **compensazione** è a bordo. Grandi circuiti superconduttori e unità di potenza ridistribuiscono energia in microsecondi per contrastare guasti locali a terra. Nelle curve ipersoniche, la sezione ellittica e la forza centrifuga stabilizzano inoltre la navetta contro la superficie di guida.
- **Navetta ed equipaggio prima di tutto.** In caso di emergenza durante il lancio, i protocolli privilegiano il salvataggio della navetta anche a costo di danni locali all’infrastruttura del tunnel.

10.2. Rischi principali e sistemi di protezione

Rischio	Causa	Protezioni e protocollo
Perdita di levitazione o asimmetria del campo a velocità ipersonica	Guasto di un segmento di alimentazione o danno a un avvolgimento.	1. Stabilizzazione di bordo con risposta in nanosecondi. 2. Frenatura induttiva: a velocità ipersonica la navetta induce corrente negli avvolgimenti passivi del tunnel, producendo un effetto stabilizzante. 3. La segmentazione confina urto e danni a una sola sezione.
Guasto della barriera gasodinamica del portale	Guasto di uno o più anelli a getto.	1. Tre anelli ridondanti , ciascuno protetto contro le esplosioni. 2. Prova 60 secondi prima del lancio: si verifica il cono gassoso senza aprire l’otturatore principale e si isolano gli anelli difettosi. 3. Alarm-1 annulla il lancio in caso di guasto.
Perdita del vuoto nel tunnel	Depressurizzazione dovuta a incidente o danno.	1. Rete di sensori di pressione lungo tutto il tunnel. 2. Paratie d’emergenza fra sezioni per contenere la perdita. 3. Avvio automatico di Alarm-1 o Alarm-2 se si rileva depressurizzazione davanti alla navetta.
Guasto rilevato quando non è più possibile fermarsi	Anomalia critica scoperta nel tratto finale di accelerazione, fra il 60 e il 100% del percorso.	Alarm-3: frenatura massima, fino a 8g, per ridurre la velocità. Si privilegia l’immissione della navetta su una traiettoria suborbitale anche se il portale è perduto. Il carico viene espulso per alleggerire il veicolo prima di un atterraggio sicuro in mare.

10.3. Gerarchia dei protocolli d’emergenza

- **Alarm-1, emergenza prima del lancio.** Si **attiva in caso di** perdita del vuoto, anomalia del campo magnetico, guasto di qualsiasi anello del portale o formazione anomala del cono **gassoso**. Azioni: annullamento immediato, isolamento delle sezioni difettose, diagnosi e riparazione.
- **Alarm-2, emergenza nel tratto iniziale o medio, 0–60%.** Si **attiva dopo** la partenza se si rileva un guasto più avanti. **Azioni:** frenata d’emergenza e arresto nel tunnel. Se il pericolo è davanti, la navetta torna alla partenza con i propri mezzi. Altrimenti viene isolata nella sezione corrente, che viene riempita d’aria; equipaggio e passeggeri evacuano attraverso il tunnel **tecnico e i pozzi verso** la superficie.
- **Alarm-3, emergenza nel tratto finale, 60–100%.** Si **attiva** quando fermarsi nel tunnel è impossibile e sono probabili il guasto del portale o del segmento terminale. **Azioni:**

- 1) **Frenatura d'emergenza massima, fino a 8g**, per ridurre la velocità.
- 2) **Priorità all'integrità della navetta; il portale rimane aperto.**
- 3) **Immissione su traiettoria suborbitale d'emergenza** ed espulsione del carico all'apogeo per alleggerire il veicolo.
- 4) **Atterraggio d'emergenza** in un'area prestabilita dell'Oceano Indiano o Pacifico con tutti i sistemi principali e di riserva. La struttura sopporta i sovraccarichi e la distruzione parziale del portale.

10.4. Caratteristiche strutturali di sopravvivenza

- **Navetta.** In prospettiva, due reattori indipendenti a bordo; levitazione superconduttrice distribuita e scafo rinforzato per sovraccarichi estremi e shock termico.
- **Portale atmosferico.** Tre motori anulari indipendenti in involucri antideflagranti. Un otturatore meccanico resiste all'onda d'urto di una barriera gassosa parzialmente compromessa. Aperture a imbuto nelle pareti interne scaricano subito la pressione e convogliano passivamente i gas in camere a vuoto di riserva. Riducono l'ingresso di aria in tunnel e portale, limitano i danni anche dopo un guasto totale e impediscono all'impulso di pressione della navetta ipersonica di rompere la struttura.
- **Tunnel.** Segmentazione, paratie d'emergenza, alimentazione duplicata e tunnel tecnico per evacuazione e riparazione.

10.5. Effetti acustici e dell'onda d'urto

L'uscita ipersonica produce un forte boom sonico a onda N. La maggior parte dell'energia si propaga in una fascia stretta lungo la traiettoria, riducendo l'effetto sull'infrastruttura vicina al portale. Si istituisce comunque una zona sanitaria chiusa, il cui raggio è calcolato con modelli e confermato da prove in scala reale.

Due soglie di sovrappressione massima Δp definiscono l'esposizione ammissibile al suolo:

$\Delta p \leq 2$ psf, circa 96 Pa: danni a edifici e vetri sono considerati improbabili;

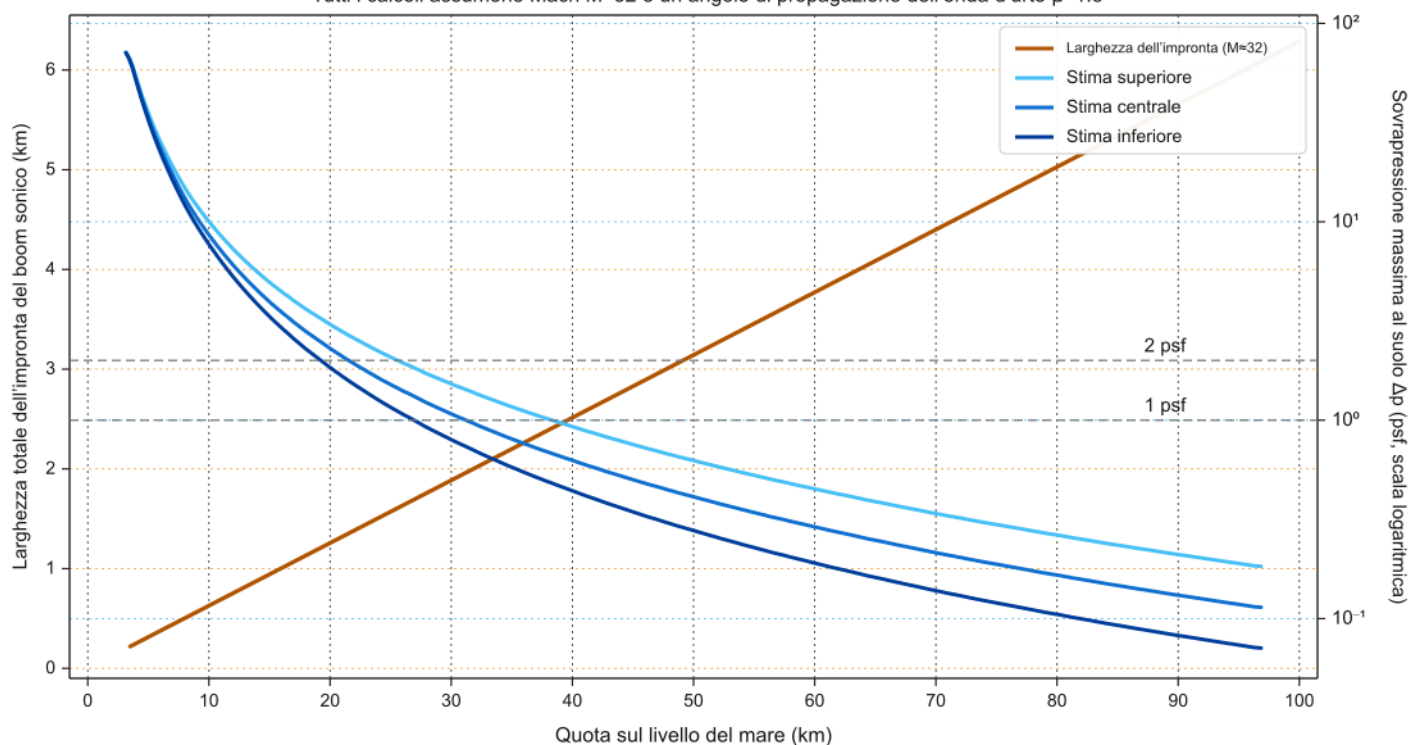
$\Delta p \leq 1$ psf, circa 48 Pa: obiettivo per le zone abitate, con rischio minimo di disturbo e nessun danno.

Geometria e limiti operativi — corridoio di esclusione, finestre meteo e limiti di quota — includono un margine sufficiente a garantire queste soglie.

StarRoad: larghezza dell'impronta del boom sonico e sovrappressione in funzione della quota

Intervallo stimato di Δp (calibrato sui dati dello Space Shuttle)

Tutti i calcoli assumono Mach $M \approx 32$ e un angolo di propagazione dell'onda d'urto $\mu \approx 1.8^\circ$



Conclusione: la sicurezza di StarRoad non si basa sulla convinzione che nulla **possa guastarsi. Ammette ogni modalità di guasto e prevede risposte automatiche definite in anticipo. Il progetto** diventa così un sistema ingegneristico prudente, affidabile e soprattutto degno di fiducia, non una linea ipotetica.

11. Impatto culturale e psicologico

Oltre agli effetti tecnologici ed economici, StarRoad influenzerà profondamente la cultura e la coscienza collettiva dell'umanità. Ogni lancio si trasformerà da operazione tecnica in un **immenso evento pubblico, quasi sacro**.

11.1. Lo spettacolo come fenomeno

L'uscita ipersonica della navetta creerà un fenomeno astronomico artificiale unico: la Freccia Solare. A un osservatore in una zona sicura apparirà come un lampo istantaneo all'orizzonte, seguito dalla rapida ascesa di una scia di plasma abbagliante che traccia una linea retta nel cielo. Decine di secondi dopo, invece del consueto rombo dei motori, arriverà un devastante doppio boato sonico: la sensazione fisica di un'intera città volante, non di una semplice macchina, che attraversa le barriere del suono e del calore. I lanci notturni illumineranno il paesaggio come una cometa in movimento e sembreranno un'aurora tecnologica innaturale.

11.2. Risonanza psicologica e simbolica

- **Scala tangibile.** Un programma spaziale astratto diventa uno spettacolo quotidiano o settimanale, visibile da centinaia di chilometri, trasformando l'espansione nello spazio da una serie di grafici in un **fatto concreto della vita**.
- **Un nuovo archetipo.** L'immagine di una gigantesca freccia luminosa scagliata dalla Terra nello spazio diventa un potente archetipo di progresso, volontà e aspirazione. Nella cultura popolare sostituisce l'arcaico razzo verticale e simboleggia la transizione all'era **dei corridoi di trasporto** spaziale.
- **Unità e orgoglio.** Come i lanci di Sojuz e Apollo un tempo riunivano il pianeta davanti agli schermi televisivi, i voli regolari di StarRoad diventano eventi mediatici globali che dimostrano la capacità dell'umanità di cooperare per obiettivi immensi.

11.3. Conseguenze socioeconomiche

- **Turismo. Complessi di osservazione** appositamente costruiti ai confini sicuri della zona di esclusione diventano centri di una nuova forma di turismo spaziale. Assistere a un lancio potrebbe competere, per attrattiva, con la visita alle meraviglie del mondo antico.
- **Impulso educativo.** Lo **spettacolo** diventa uno strumento impareggiabile per ispirare vocazioni, incoraggiando milioni di bambini a studiare fisica, ingegneria e astronautica.
- **Demistificazione dello spazio.** Il carattere regolare, prevedibile e industriale del lancio elimina dal volo spaziale l'aura di eccezionalità e pericolo mortale e lo presenta **come una normale, seppur immensa, operazione** logistica.

StarRoad creerà quindi non solo l'infrastruttura fisica per raggiungere lo spazio, ma anche la narrazione **culturale e la base emotiva di cui l'umanità ha bisogno** per accettare il proprio nuovo ruolo: una civiltà che costruisce attivamente il proprio futuro oltre la culla. La comparsa regolare della Freccia Solare ricorderà ogni giorno che la strada verso le stelle non è soltanto aperta, ma viene già utilizzata.

12. Conclusione

StarRoad è più di un megaprogetto ingegneristico. È una strategia per la transizione verso una civiltà spaziale industriale. Passando dal paradigma del «razzo» a quello del «corridoio», il progetto offre un modo per superare i due ostacoli principali: il costo di consegna del carico utile e la bassa capacità di trasporto.

Il corridoio ipersonico diventa una dorsale che collega energia, agricoltura, industria, logistica e tecnologie spaziali. Anche l'Africa ottiene l'opportunità di un salto industriale e tecnologico, sfruttando la propria geografia e le proprie risorse per costruire una strada verso lo spazio, anziché limitarsi a esportare materie prime.

Integrando e ampliando tecnologie collaudate, StarRoad pone le basi di un'economia in cui le risorse del Sistema solare diventano disponibili per risolvere i problemi sulla Terra, mentre l'infrastruttura stessa funge sia da assicurazione sia da trampolino per il futuro dell'umanità. La sua realizzazione richiederà una cooperazione internazionale senza precedenti,

investimenti a lungo termine e determinazione ingegneristica; la ricompensa sarà una chiave per un'epoca autenticamente spaziale, risorse extraterrestri pressoché illimitate ed energia abbondante.