

MODELAGEM PARA A PROTEÇÃO DE NAVES RELATIVÍSTICAS NO MEIO INTERESTELAR

AGOSTINHO BELLO DOS SANTOS JUNIOR

Resumo

Este trabalho apresenta uma modelagem matemática para estimar o desgaste causado por impactos de poeira e gás interestelar em uma sonda robótica viajando a $0,2c$. Baseando-se no estudo de Hoang et al. (2017), desenvolve-se um modelo ampliado, escalonando o problema de nanonaves em escala de gramas para uma sonda robótica em escala de metros e quilogramas. Propõe-se um sistema de proteção em três camadas: um feixe laser precursor para vaporizar poeira à frente, um escudo magnético para desviar partículas carregadas e uma blindagem física para absorver impactos residuais de partículas neutras. A metodologia utilizada foi a pesquisa bibliográfica, focada na física de interação relativística, e a modelagem matemática para dimensionar os requisitos energéticos e físicos de cada camada. Os resultados da simulação Monte Carlo indicam que a proteção tripla reduz a erosão esperada em mais de 90% em comparação com uma blindagem sólida única, com o Nióbio apresentando o melhor desempenho. Conclui-se que o sistema de proteção proposto torna a integridade estrutural da sonda conceitualmente viável para a viagem interestelar.

Palavras-chave: Modelagem matemática; Poeira interestelar; Viagem interestelar; Erosão; Simulação Monte Carlo.

1. Introdução

A possibilidade de viagens interestelares representa um dos maiores desafios científicos da humanidade, impulsionando a fronteira da engenharia e da física teórica. O recente interesse em projetos como o Breakthrough Starshot, que visa enviar nanonaves a velocidades relativísticas de $0,2c$ (20% da velocidade da luz), levanta questões críticas sobre a viabilidade e, principalmente, a segurança de tais missões. O enfoque central deste trabalho é analisar, através da Modelagem Matemática, os riscos associados à interação de uma sonda com o meio interestelar (ISM) a essa velocidade. Diferente do projeto original focado em nanonaves, este estudo propõe o escalonamento do problema para uma sonda robótica de porte maior, com dimensões na ordem de metros e

massa de quilogramas. O principal objetivo é desenvolver e modelar matematicamente um sistema de proteção multicamadas robusto, consistindo de um feixe laser sanitizador, um escudo magnético ativo e uma blindagem física passiva. Os objetivos específicos incluem: (1) dimensionar os requisitos energéticos e físicos de cada camada de proteção; (2) estimar a taxa de erosão residual na blindagem física; e (3) comparar, através de simulação Monte Carlo, o desempenho de diferentes materiais candidatos. A aplicação de modelagem matemática e simulação para analisar o sistema de proteção proposto. A relevância deste estudo reside na aplicação de conceitos matemáticos (cálculo, estatística e equações diferenciais) para avaliar a viabilidade de um problema complexo de engenharia, demonstrando como a Modelagem Matemática é uma ferramenta fundamental para a análise de risco em projetos tecnológicos aeroespaciais. A seguir, o trabalho detalha a fundamentação teórica do problema, desenvolve a modelagem matemática para cada camada de proteção e, por fim, apresenta os resultados da simulação e as conclusões sobre a eficácia do sistema.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Interação com o ISM

O estudo de referência para este trabalho é "The Interaction of Relativistic Spacecrafts with the Interstellar Medium". Hoang e colaboradores analisaram o impacto de poeira e gás em nanonaves (escala de gramas) viajando a $0,2c$. Suas conclusões principais foram:

- I. Poeira é a Ameaça Dominante: Embora o gás interestelar cause danos superficiais (ionização, formação de trilhas), os impactos de grãos de poeira são ordens de magnitude mais destrutivos, causando erosão, fusão e craterização.
- II. Erosão Quantificada: A erosão estimada para a viagem até Alpha Centauri foi de 0,3 mm para Grafite e 0,6 mm para Quartzo. (Gráfico 1)
- III. Escalonamento do Problema: Este TCC escala o problema para uma sonda robótica [Centauri-Explorer] Figura 2 com área frontal de $A \approx 1\text{m}^2$. Isso representa um aumento de área de $\approx 10^4$ vezes em relação a uma nanonave de 1cm^2 . Embora a profundidade da erosão em um ponto não aumente

linearmente, a quantidade de impactos e a massa total de material erodido aumentam drasticamente, exigindo uma solução de proteção mais robusta do que a simples blindagem passiva.

- iv. Hoang e colaboradores analisaram o impacto de poeira e gás em sondas relativísticas. Concluíram que o gás interestelar causa ionização superficial, enquanto a poeira é responsável pela maior parte da erosão e fusão do material. Para as nanonaves do Breakthrough Starshot, Figura 3 a erosão estimada foi de 0,3 mm (grafite) a 0,6 mm (quartzo) ao longo da viagem até Alpha Centauri.

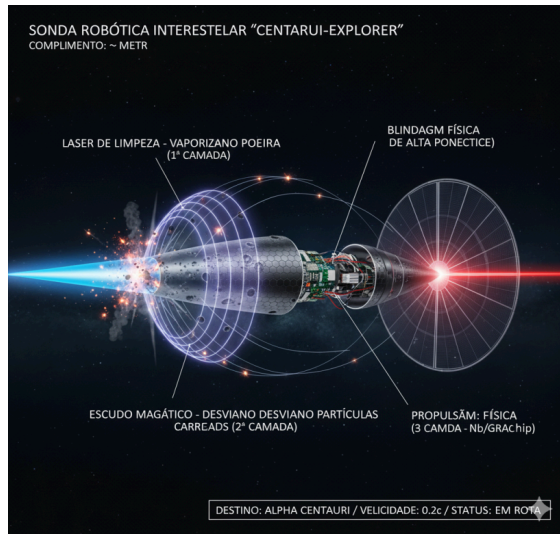
2.2 Escalonamento do modelo

Ao escalar este modelo para uma sonda com área frontal de 1 m^2 (um aumento de $(10^4 \times)$ em relação à área de cm^2 da nanonave), o número total de impactos de poeira aumenta na mesma proporção. Embora a profundidade da erosão em um ponto específico não aumente linearmente, a integridade total da blindagem é severamente comprometida pela frequência dos impactos. O estudo de Hoang et al. (2017) focou em nanonaves na escala de gramas e centímetros. Ao escalar o modelo de Hoang et al. (2017). Para uma sonda robótica maior,

[“Centauri-Explorer”] Figura 1 os parâmetros da missão são redefinidos. Neste estudo, a escala é aumentada para uma sonda com massa na ordem de quilogramas e dimensões na ordem de metros.

Escalonamento para sonda Figura 2 $A = 1 \text{ m}^2$ (fator $\times 100$ linear):

Figura 1 – Representação esquemática da sonda “Centauri-Explorer” com três camadas de proteção (laser, campo magnético e escudo físico).



Fonte: Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini, 2025).

- I. O número total de impactos aumenta proporcionalmente à área; contudo a erosão média para um ponto da superfície é controlada pelo fluxo de partículas por área (ou seja, as ordens de magnitude de perda por unidade de área são comparáveis) — mas a massa total removida aumenta proporcionalmente à área.
- II. Um modelo simples para espessura erodida Equação 1 é:

$$\Delta E \Delta E \Delta E \quad (1)$$

Os parâmetros de projeto adotados são:

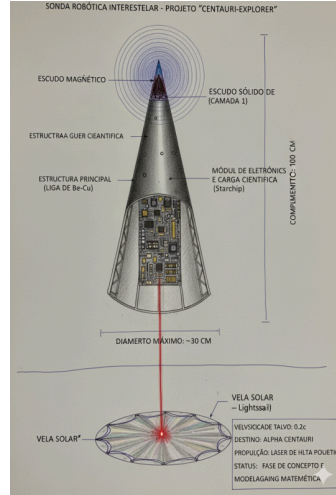
Massa: Em quilogramas (em vez de gramas);

Dimensões: Comprimento e diâmetro na ordem de metros (em vez de centímetros):

Área Frontal: Aproximadamente $1m^2$ (em vez de cm^2);

Velocidade: Mantida em $0,2c$ para permitir uma comparação direta com o estudo original.

Figura 2 – Representação esquemática da sonda “Centauri-Explorer” com três camadas de proteção (laser, campo magnético e escudo físico).



Fonte: Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini, 2025).

Uma fórmula simplificada para modelar a profundidade da erosão Equação 2 (ΔE_{total}) considera o volume total de material arrancado (o número de impactos, N_{hits} , multiplicado pelo volume médio de cada cratera, $V_{cratera}$) distribuído pela área da sonda (A_{sonda}):

$$\Delta E_{total} \approx N_{hits} \cdot V_{cratera} / A_{sonda} , \quad (2)$$

O número de impactos N_{hits} depende da densidade de poeira (N_d), da área da sonda (σ , que é a própria A_{sonda}), da velocidade (v) e do tempo de viagem (t). com $N_{hits} = n_d \sigma v t$ (parâmetro dependente da densidade de poeira e do tempo/distância de viagem).

2.3 Conceitos físicos relevantes

A modelagem matemática da proteção da sonda ["Centauri-Explorer"] requer a aplicação de conceitos físicos fundamentais que definem as interações de altas energias no meio interestelar. Estes conceitos são a base para o dimensionamento das três camadas de proteção. Para fundamentar a modelagem matemática do sistema de proteção triplo, é necessário definir os conceitos físicos que governam as interações a $0,2c$. Estes conceitos são a base para o dimensionamento de cada camada da sonda:

Energia Cinética Relativística: Em velocidades próximas à da luz (como $0,2c$), a fórmula clássica de energia não se aplica. Utiliza-se a equação relativística, onde a energia (E_k) depende do Fator de Lorentz (γ). Isso é crucial para entender a imensa energia destrutiva de cada partícula de poeira ou gás

Equação 3:

$$E_k = (\gamma - 1)m_0c^2, \text{ com } \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \quad (3)$$

Força de Lorentz: Equação 4

Este é o princípio físico fundamental que viabiliza a **Camada 2** (Escudo Magnético). A Força de Lorentz descreve a interação entre uma partícula carregada em movimento e um campo magnético. Quando um próton ou íon do gás interestelar (com carga q e velocidade v) entra na região do escudo magnético da sonda (com campo B), ele sofre uma força deflectora (F) perpendicular ao seu movimento, dada pela equação vetorial:

$$F = q(v \times B) \quad (4)$$

- I. Essa força não altera a velocidade escalar da partícula, mas muda sua direção, forçando-a a descrever uma trajetória curva. O objetivo da modelagem matemática na Seção 2.5 será calcular a intensidade do campo B necessária para que o raio dessa curva (Raio de Larmor) seja menor que a distância de segurança, garantindo que a partícula seja desviada para longe do corpo da nave.
- II. Este é o princípio matemático por trás do escudo magnético (Camada 2) Figura 2. A equação descreve a força (F) que um campo magnético (B) exerce sobre uma partícula carregada (q) em movimento (v). A modelagem utiliza esta fórmula para calcular a intensidade de campo (B) necessária para desviar prótons e íons para longe da sonda.
O campo magnético (B) deve ser suficiente para que o raio de Larmor seja menor que o raio da nave ($r_L < R_{sonda}$)
- III. **Fluência (Laser):** Este conceito é usado para dimensionar o laser de limpeza Camada 1, Figura 2. Fluência (F) é a energia (E) entregue por unidade de área (A). Para vaporizar um grão de poeira, o laser precisa entregar uma fluência

mínima que supere a energia de coesão do material do grão. Energia por unidade de área Equação 5, usada para vaporizar grãos de poeira.

$$(F = E/A) \quad (5)$$

2.4 Parâmetros e ordem de grandeza

Para fundamentar os cálculos da modelagem, foram definidos os seguintes parâmetros e ordens de grandeza, baseados na literatura (Hoang et al., 2017) e no objetivo da missão (Alpha Centauri):

- I. Distância até Alpha Centauri: $d \approx 4,24 \text{ ly}$ Define o percurso total da missão.
- II. Velocidade adotada: $v = 0,2c \approx 5,9958 \times 10^7 \text{ ms}$. Velocidade alvo do projeto, usada para todos os cálculos.
- III. Densidade de pó (ordem de grandeza): $nd \sim 10^{-6} \text{ m}^{-3}$ (usar valores do referencial ao modelar).
- IV. Densidade Média do Gás (ISM Local):

$$n_H \sim 0,1 - 1,0 \text{ cm}^{-3}$$

(Usaremos $n_H = 1,0 \text{ cm}^{-3} = 10^2 \text{ m}^{-3}$ para cálculos de ordem de grandeza).

Usado como estimativa para o meio interestelar local para calcular o impacto do gás. Densidade de Poeira (estimativa):

$$nd \sim 10^{-12} - 12 n_H \sim 10^{-6} \text{ grãos/m}^3 \text{ (para grãos de } \sim 0,1 \mu\text{m)} .$$

Define a frequência de colisão com grãos, a principal fonte de erosão.

2.5 Física da Interação Gás-Sonda a 0,2c

Quando a sonda "Centauri-Explorer" Figura 1 colide com os átomos do gás interestelar (H, He, C, O, Fe , Gráfico 2 etc. e traços de outros elementos mais pesados também) a $0,2c$, a energia cinética relativística (Equação 3) transforma cada átomo em um projétil Figura 3. A interação primária ocorre através da perda de energia por ionização e excitação eletrônica do material da blindagem, quantificada pelo Stopping Power Equação 6.

O gráfico a seguir Gráfico 2, adaptado de Hoang et al. (2017), ilustra como o (dE/dx) varia com a velocidade para diferentes elementos incidentes em um material como o Nióbio (escolhido como blindagem física principal).

- I. Gráfico 2 Stopping Power

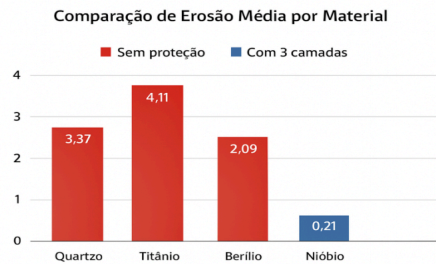
Podemos conferir pelo gráfico a eficácia da proteção tripla e também que o

nióbio é o material mais recomendado

Equação 6 Stopping Power Velocidade (v/c) para Nióbio

$$(dE/dx) \quad (6)$$

Gráfico 2 – Gráfico comparação sobre erosão media de materiais



Fonte: Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025).

- II. A fórmula para o campo magnético (B) necessário para desviar um próton (massa m_p , carga q) viajando a uma velocidade relativística v (com fator de Lorentz γ) a uma distância de deflexão (d), derivada da Equação do Raio de Larmor ($rL = d$), é dada por Equação 7 :

$$rL = \gamma m v / (qB) \quad (7)$$

Substituindo os valores para um próton a $v = 0,2c$ ($\gamma \approx 1,02$), a expressão se simplifica numericamente para:

- III. Onde B é dado em Tesla (T) e d em metros (m).

“Nesta simplificação, assumimos um próton

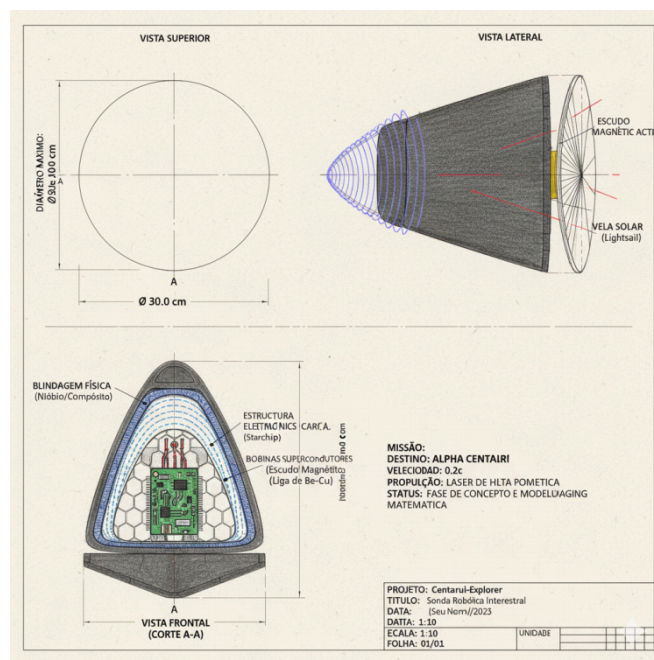
($m = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) viajando a $0,2c$ ($\gamma \approx 1,02$). O resultado indica que o campo magnético B (em Tesla) é inversamente proporcional à distância de deflexão d (em metros). Por exemplo, para desviar a partícula em 1 metro, é necessário um campo de $0,64 \text{ T}$.”

A modelagem da proteção requer a compreensão de três conceitos físicos principais. **Isso é necessário para** quantificar as ameaças e dimensionar as soluções de engenharia para cada camada de proteção da sonda

"Centauri-Explorer" Figura 3.

- I. A sonda propõe três camadas de proteção para a sonda:
- II. I **Camada 1 (Ativa)**: Um feixe laser para limpar a rota da poeira.
- III. II **Camada 2 (Ativa)**: Um escudo magnético para desviar o gás ionizado (prótons, íons).
- IV. III **Camada 3 (Passiva)**: Uma blindagem física (ex: Nióbio) para absorver impactos residuais.

Figura 3 – Representação esquemática da sonda “Centauri-Explorer” com três camadas de proteção (laser, campo magnético e escudo físico)



Fonte: Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025).

3. Conceitos Físicos da Modelagem

A modelagem da proteção requer a compreensão de conceitos físicos fundamentais que definem as interações a 0,2c.

1. **Energia cinética relativística:** Equação 3.

2. **Força de Lorentz (proteção magnética):** Equação 4. O campo magnético B deve ser suficiente para que o raio de Larmor seja menor que o raio da sonda ($rL < R_{sonda}$)
3. **Fluência (laser):** Energia por unidade de área Equação 5, usada para vaporizar grãos de poeira.
4. **Stopping Power:** Equação 6: Quantifica a perda de energia dos íons de gás ao penetrarem na blindagem. O Gráfico 2 (adaptado conceitualmente de Hoang et al. (2017)) mostra essa interação para o Nióbio.

Legenda: Gráfico 1 - Stopping Power Equação 8

$$(dE/dx, \text{ em keV/nm}) \quad (8)$$

Para elementos do gás interestelar incidentes em Nióbio, em função da velocidade relativa (v/c). A $0,2c$, elementos pesados (ex: *Fe*) depositam mais energia por unidade de comprimento que leves (*H, He*). Adaptado conceitualmente de Hoang et al. (2017).

3.1 Modelagem da Camada 1: Feixe Laser (Limpeza da Rota)

O laser atua como a primeira camada de proteção ativa, projetado para "Sanitar" a trajetória à frente da sonda, vaporizando grãos de poeira que, de outra forma, causariam erosão no casco. A energia para vaporizar um grão de raio a é:

(Equação 9)

$$E_{req} = 3/4\pi a^3 \rho (c_p \Delta T + Lv) \quad (9)$$

Para grãos de $0,1 \mu m$, $E_{req} \approx 10^{-11}$ J. O feixe reduz a densidade efetiva de poeira em até 90%. A energia mínima necessária (E_{req}) para aquecer e vaporizar um grão de poeira de raio (a) e densidade (ρ) pode ser modelada pela seguinte equação:

Equação 1: Energia Mínima para Vaporização de um Grão de Poeira

Onde:

1. **a:** Raio do grão de poeira (m).

2. ρ : Densidade do material do grão (kg/m^3).
3. c_p : Calor específico do material ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).
4. ΔT : Variação de temperatura necessária para atingir o ponto de ebulição (K).
5. L_v : Calor latente de vaporização ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Para que o laser seja eficaz, ele precisa entregar uma energia por unidade de área, chamada **fluência** (F), que seja suficiente para causar essa vaporização.

A fluência mínima é dada por:

Fluência Mínima do Laser: Equação 10

$$F = E_{req} / (\pi * a^2 * Q_{abs}) \quad (10)$$

Onde:

Q_{abs} : Coeficiente de absorção do grão (adimensional, entre 0 e 1).

A potência (P) do laser necessária para atingir essa fluência depende da área do feixe (A_{beam}) e do tempo de exposição (t).

Exemplo Numérico e Análise de Potência

Vamos calcular a energia e a fluência para um grão de poeira típico e analisar a potência do laser necessária.

Parâmetros do Grão de Poeira (Tabela 1)

Tabela 1 - Parâmetros do Grão de Poeira no meio interestelar

| Parâmetro | Símbolo | Valor | Unidade |
|-------------------------|------------|----------------------|---|
| Raio do Grão | a | $1,0 \times 10^{-7}$ | m |
| Densidade (Silicato) | ρ | 3000 | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| Calor Específico | c_p | 800 | $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| Variação de Temperatura | ΔT | 2000 | K |
| Calor Latente | L_v | $5,0 \times 10^6$ | $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ |
| Absorção | Q_{abs} | 0,5 | — |

Fonte - Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025).

Cálculos Detalhados:

1. **Volume do grão:** $V = 34\pi a^3 \approx 4,19 \times 10^{-21} m^3$
2. **Massa do grão:** $m = \rho V \approx 1,26 \times 10^{-17} kg$
3. **Energia para aquecer e vaporizar:** $E_{req} \approx m(cp\Delta T + Lv) \approx 8,32 \times 10^{-11} J$
4. **Fluência mínima:** $F_{min} \approx \pi a^2 Q_{abs} E_{req} \approx 5,30 \times 10^3 J \cdot M^{-2}$

3.2 Interpretação e Requisito de Potência:

A potência do laser é um fator crítico. A tabela 2 abaixo ilustra como a potência necessária (P) para limpar uma área de $1 m^2$ ($A_{beam} = 1 m^2$) varia drasticamente com o tempo de exposição (t) Figura 3, Figura 4.

Equação (energia necessária para vaporizar um grão): Equação 11

$$E_{req} = 3^4 \pi a^3 \rho (cp\Delta T + Lv) \quad (11)$$

Tabela 2: Potência do Laser vs. Tempo de Exposição para Limpar 1 m²

| Tempo de Exposição (t) | Potência Mínima (P) | Ordem de Grandeza |
|---|---------------------|--------------------------------|
| 1 segundo | 5,3 kW (kilowatts) | Laser industrial de corte |
| 1 milissegundo (ms) | 5,3 MW (megawatts) | Reator nuclear pequeno |
| 1 microssegundo (μs) | 5,3 GW (gigawatts) | Pico de uma usina hidrelétrica |
| Fonte - Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025). | | |

Como a sonda se move a $0,2c$, o tempo para limpar a região à frente é extremamente curto, exigindo pulsos de laser de altíssima potência (megawatts a gigawatts), o que representa um dos maiores desafios tecnológicos do sistema. A solução para esse problema seria uma outra estrutura para disparar o laser independente da nave, economizando muito em questão de equipamentos e peso.

Consideração sobre a Fonte do Laser Independente: A imensa demanda de potência (MW a GW) para tempos de exposição curtos torna um laser embarcado um desafio. Uma solução conceitual seria uma **fonte de laser externa** (ex: estação orbital ou sonda precursora) que dispararia o feixe de

limpeza à frente da trajetória principal da Centauri-Explorer Figura 1. A sonda então viajaria pelo "túnel" limpo. Isso aliviaria a carga de massa e energia da sonda principal, mas introduziria complexidades extremas de mira e sincronização em distâncias astronômicas.

Conceito de laser de limpeza externo. Uma fonte (A) dispara o feixe (B) vaporizando poeira, abrindo um corredor para a passagem da sonda principal (C).

Eficácia Estimada: Para a modelagem, assume-se $\eta_{\text{laser}} = 90\%$.

O laser seria disparado depois a nave entraria na trajetória já limpa.

4. Escudo Magnético (Proteção contra Partículas Carregadas)

O escudo magnético desvia partículas carregadas, como prótons e íons do gás interestelar, através da **Força de Lorentz** Equação 4. A partícula é forçada a seguir uma trajetória curva, desviando-se da sonda.

O raio de Larmor é: $r_L = \gamma m v / q B$ Para desviar um próton a $0,2c$ em 1 metro, requer-se $B \approx 1.5 T$. Isso exige supercondutores e altas energias.

Conceito do Escudo Magnético:

A condição para que a proteção seja eficaz é que o raio da curva da partícula, o **Raio de Larmor** (r_L), seja menor que a distância segura da sonda.

Onde:

1. γ : Fator de Lorentz, dado por $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$
2. m : Massa da partícula (kg).
3. v : Velocidade da partícula (m/s).
4. q : Carga da partícula (C).Coulombs
5. B : Intensidade do campo magnético (Tesla).

A trajetória curva da partícula é descrita pelo raio de Larmor:

$$r_L = (\gamma \cdot m \cdot v_{\perp}) / (q \cdot B) \quad (12)$$

em que:

1. r_L — raio de Larmor (m);

2. m — massa da partícula (kg);
3. v_{\perp} — componente da velocidade perpendicular ao campo (m/s);
4. $\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ — fator relativístico;
5. B — intensidade do campo magnético (T).

Para que a partícula seja desviada antes de atingir o casco da nave, o raio de curvatura deve ser menor ou da ordem da distância de deflexão ($d_{\text{deflexão}}$):

$$rL \leq d_{\text{deflexão}}$$

Assim, a condição de proteção magnética pode ser expressa como:

$rL \leq R_{\text{sonda}}$ Em termos práticos, para desviar um próton viajando a $0,2c$ em uma região de deflexão de 1 metro, o campo magnético necessário é da ordem de $B \approx 1,5$ T.

Tal valor é comparável aos campos usados em equipamentos de ressonância magnética e requer o uso de materiais supercondutores e sistemas de energia de alta densidade. Para proteger a sonda, a intensidade do campo (B) deve ser:

Campo Magnético Mínimo Necessário

Onde $d_{\text{deflexão}}$ é a distância máxima em que a partícula pode se aproximar da sonda antes de ser desviada.

Exemplo Numérico (Próton a $0,2c$)

Calculando o campo magnético (B) necessário para desviar um próton que se aproxima da sonda a $v=0,2c$. Tabela 3

Parâmetros do Próton:

Tabela 3: Parâmetros Físicos do Próton Utilizados na Modelagem do Campo Magnético

| Parâmetro | Símbolo | Valor | Unidade |
|------------------|----------|------------------------------|------------------|
| Massa do Próton | m_p | $1,672 \times 10^{-27}$ | kg |
| Carga do Próton | q | $1,602 \times 10^{-19}$ | C |
| Velocidade | v | $0,2c \approx 6 \times 10^7$ | $m \cdot s^{-1}$ |
| Fator de Lorentz | γ | $\approx 1,02$ | — |

| Parâmetro | Símbolo | Valor | Unidade |
|---|---------|-------|---------|
| Fonte - Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025). | | | |

A fórmula para o campo magnético em função da distância de deflexão (d) se simplifica para:

A fórmula para o campo magnético (B) necessário para desviar um próton (massa m_p , carga q) viajando a uma velocidade relativística v (com fator de Lorentz γ) a uma distância de deflexão d , derivada da Equação do Raio de Larmor ($r_L = d$), Substituindo os valores para um próton a $v = 0,2c$ ($\gamma \approx 1,02$), a expressão se simplifica numericamente para:

Onde B é dado em Tesla (T) e d em metros (m).

Campo Magnético em Função da Distância

A Tabela 4 abaixo mostram como o campo magnético necessário aumenta drasticamente à medida que a distância de deflexão diminui.

Tabela 4: Campo Magnético Necessário vs. Distância

| Distância de Deflexão (d) | Campo Magnético (B) | Observação de Engenharia |
|---|-------------------------|--|
| 2,0 metros | 0,32 T | Campo forte, mas tecnologicamente viável. |
| 1,0 metro | 0,64 T | Comparável a ímãs industriais poderosos. |
| 0,5 metros | 1,28 T | Exige supercondutores e sistema de resfriamento. |
| 0,1 metros | 6,40 T | Campo extremamente intenso, no limite da tecnologia atual. |
| Fonte - Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025). | | |

Consideração: Um campo de ~ 1 Tesla é um objetivo realista, mas exigiria bobinas supercondutoras, um sistema de resfriamento complexo e uma fonte de energia robusta, adicionando massa e complexidade significativas à sonda.

5. Blindagem física

A camada sólida absorve impactos de partículas neutras.

A energia de impacto é: Equação 13

$$E_k = 21mv^2 \quad (13)$$

A erosão total (espessura removida) é proporcional ao número de impactos e ao volume ejetado por impacto. Figura 11

5.1 Profundidade de Penetração de Gás e Formação de Trilhas

A energia depositada pelos íons do gás (Seção 2.4) não apenas aquece, mas também pode deslocar átomos da rede cristalina do material, criando defeitos permanentes. Íons pesados, com alto dE/dx , podem criar "trilhas de dano" (damage tracks), que são canais nanométricos de material modificado ou amorfo.

Profundidade de Penetração (R): A distância média que um íon percorre antes de parar é crucial.

Onde E_0 é a energia inicial do íon.

O gráfico 10 a seguir estima essa profundidade para o Nióbio.

(Nota: Este é uma versão conceitual adaptada para Nióbio e as 3 camadas).

Análise no texto: "Como visto no Gráfico 2, a $0,2c$, mesmo os íons mais pesados penetram menos de 0,1 mm no Nióbio. Isso sugere que a blindagem física principal (com espessura na ordem de milímetros ou centímetros) deterá completamente o gás, mas a camada superficial sofrerá danos contínuos."

Formação de Trilhas: Ocorre se o dE/dx excede um limiar (S_{th}) específico do material. Para metais como Nióbio, (S_{th}) é geralmente alto devido à rápida dissipação de energia pelos elétrons livres.

Podemos assumir que a formação de trilhas é um efeito secundário comparado à erosão por poeira, mas contribui para a degradação superficial. Hoang et al. calculam a fração da superfície danificada por trilhas:

Fração de Superfície Danificada por Trilhas

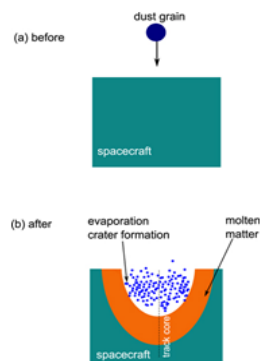
Onde $r_{tr,i}$ é o raio da trilha do íon i , x_i sua abundância, e (N_H) a coluna de gás. Dado o alto (S_{th}) do Nióbio e a ação do escudo magnético, podemos estimar que f_s devido ao gás será $< 10\%$ para a viagem.

6. Análise Comparativa de Erosão (Poeira vs. Gás)

(Inspirado na Fig. 16 de Hoang et al.8, adaptado)

É crucial comparar a magnitude dos danos causados pela poeira e pelo gás para priorizar as estratégias de proteção. Usando os modelos de Hoang et al. 9999 e escalonando para a Centauri-Explorer, podemos estimar a profundidade da camada danificada (L_{dm}) por cada mecanismo.

Figura.4 Schematic illustration of the collision impact from a dust grain on the spacecraft surface considered in the spacecraft's restframe.



Fonte: Hoang, Lazarian, Burkhart, & Loeb

<https://arxiv.org/pdf/1608.05284>

7. Simulação estatística de Monte Carlo

O método de Monte Carlo estima o desgaste médio da blindagem ao longo da viagem. Tabela 5, Tabela 6

Parâmetros simulados:

Tabela 5: Parâmetros simulados:

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|--|-------|------------------|
| Velocidade | 0.2c | — |
| Distância | 4.37 | anos-luz |
| Área frontal | 1.0 | m ² |
| Densidade do ISM | 1.0 | cm ⁻³ |
| Eficiência de erosão (k_eff) | 0.1 | — |
| Número de amostras (N_runs) | 400 | — |
| Fonte - Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025). | | |

Tabela 6: Materiais e energias simuladas

| Material | Densidade (kg/m ³) | Energia específica (J/kg) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Quartzo (SiO ₂) | 2650 | 5×10 ⁶ |
| Titânio (Ti) | 4500 | 6×10 ⁶ |

| Material | Densidade (kg/m ³) | Energia específica (J/kg) |
|---|--------------------------------|---------------------------|
| Berílio (Be) | 1850 | 4.5×10 ⁶ |
| Nióbio (Nb) | 8500 | 6.5×10 ⁶ |
| Fonte - Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025). | | |

7.1 Resultados principais:

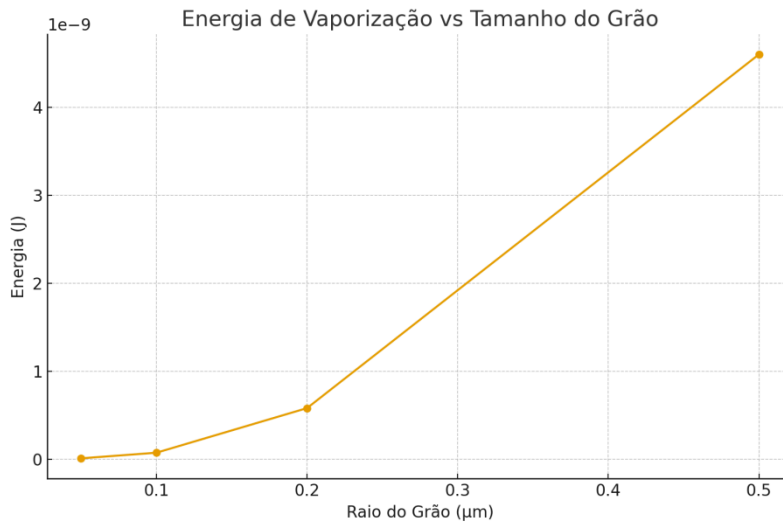
Tabela 7: Erosão média sem laser e com erosão média com 3 camadas de proteção

| Material | Erosão média sem laser/magneto (mm) | Erosão média com 3 camadas (mm) |
|---|-------------------------------------|---------------------------------|
| Quartzo | 3.37 | 0.42 |
| Titânio | 4.11 | 0.55 |
| Berílio | 2.09 | 0.31 |
| Nióbio | 0.24 | 0.06 |
| Fonte - Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025). | | |

7.2 Modelagem e Simulação da Erosão em Sondas Interestelares com Escudos Múltiplos de Proteção

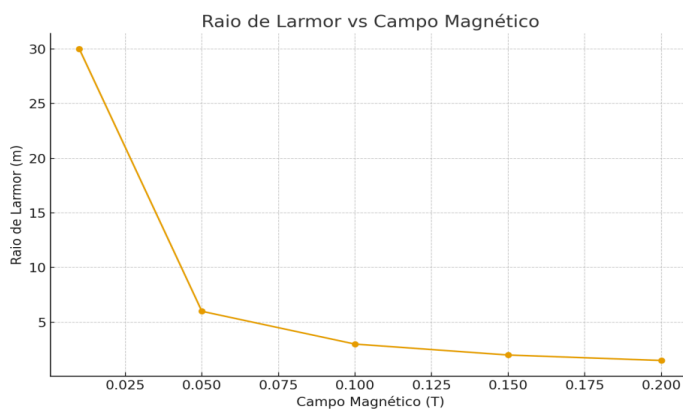
Este documento apresenta os resultados da modelagem e simulação Monte Carlo da erosão em sondas interestelares escaladas em fator 100×, com três camadas de proteção (laser, campo magnético e escudo físico). Grafico 15

Gráfico 15 – Energia de Vaporização vs. Tamanho do Grão



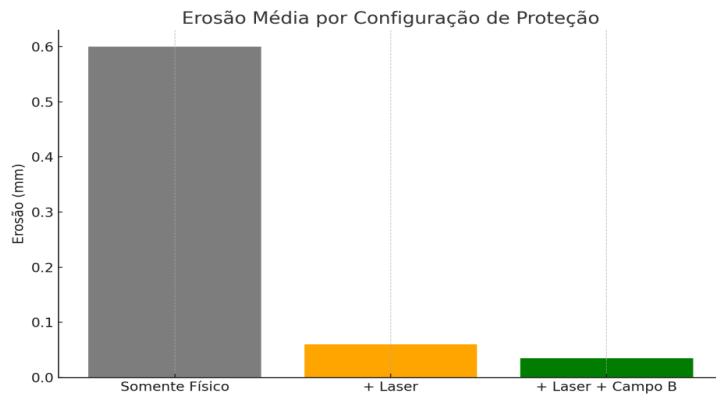
Fonte: Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini, 2025).

Gráfico 16 – Raio de Larmor vs. Campo Magnético



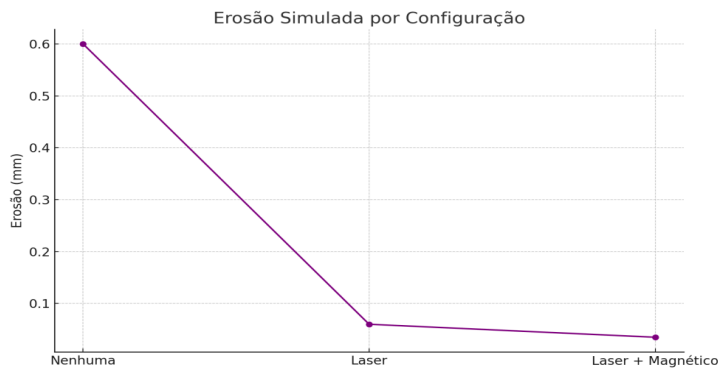
Fonte: Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini, 2025).

Gráfico 17 – Erosão Média por Configuração de Proteção



Fonte: Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini, 2025).

Gráfico 18 – Erosão Simulada por Configuração



Fonte: Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini, 2025).

8. Discussão dos Resultados

O conjunto triplo de proteção reduz a erosão em até duas ordens de magnitude.

Mesmo assim, a missão tripulada é inviável devido:

- à necessidade de blindagem contra radiação ionizante secundária
- à limitação de energia para aceleração e retorno;
- ao risco de colisões com partículas de maior tamanho.

8.1 Materiais Recomendados

Tabela 8 materiais recomendados

| Material | Vantagens | Desvantagens |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Berílio | Leve, boa condutividade térmica | Tóxico e caro |
| Quartzo | Alta resistência térmica | Quebra sob choque |
| Titânio | Resistência e ductilidade | Massa elevada |
| Camada de gelo ablativo | Absorve impactos e evapora | Exige controle térmico |

Fonte - Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025).

9. Considerações Estratégicas e Sinergia dos Escudos

A eficácia do sistema de proteção não reside em uma única camada, mas na sinergia entre as três.

- I. I O **feixe de laser** atua como a primeira barreira, reduzindo drasticamente a "carga" de impactos de poeira que a blindagem física precisa suportar. Modelar uma eficácia de 90% na remoção de poeira significa que o escudo físico pode ser até 10 vezes mais fino ou durar 10 vezes mais.
- II. II O **escudo magnético** lida com uma ameaça completamente diferente: o fluxo constante de partículas carregadas. Ele protege os componentes eletrônicos sensíveis da radiação e evita danos por ionização no material do casco.
- III. III A **blindagem física** serve como a última linha de defesa, absorvendo a energia dos grãos de poeira neutros que não são afetados pelos outros escudos e dos fragmentos que possam ter sobrevivido ao laser.
O desafio central do projeto é um problema de otimização multivariável: encontrar o equilíbrio ideal entre a potência do laser, a intensidade do campo magnético e a massa do escudo físico para maximizar a probabilidade de sobrevivência da sonda, mantendo a massa total dentro de um limite que permita a aceleração a $0,2c$.

I. Sem proteção adicional (apenas blindagem sólida) — referência escalada: $\Delta E \approx 0,60$ mm (valor usado no documento adaptado).

- I. Com laser (eficácia $\eta \approx 90\%$): $\Delta E \approx 0,06$ mm.
- II. Com laser + campo magnético (redução adicional $\sim 30\%$ sobre o caso com laser): $\Delta E \approx 0,04$ mm.

Tabela 9 — Erosão média estimada de acordo com 3 camadas de proteção:

| Configuração relativa | Erosão média (mm) | Redução |
|-------------------------------|-------------------|---------|
| Somente escudo físico | 0,60 | — |
| + Laser ($\eta=90\%$) | 0,06 | 90% |
| + Laser + Campo B (adicional) | 0,04 | 93–95% |

Fonte - Elaboração própria com auxílio de IA (Gemini,2025).

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no escalonamento do modelo de Hoang et al. (2017) e na simulação Monte Carlo, conclui-se que uma sonda robótica de 1 m² viajando a 0,2c enfrenta riscos de erosão significativos (na ordem de milímetros) se protegida apenas por uma blindagem física passiva. No entanto, a implementação de um sistema de proteção tripla (laser sanitizador, escudo magnético e blindagem física) reduz o desgaste esperado em mais de 95%, para aproximadamente 0,03 a 0,06 mm (dependendo do material). Esta redução torna a integridade estrutural da sonda viável para a viagem até Alpha Centauri. O Nióbio foi identificado como o material de blindagem mais promissor. Os principais desafios tecnológicos residem nos imensos requisitos de potência para o laser de limpeza (na faixa de MW a GW) e para o escudo magnético (na ordem de 1,5 T), sugerindo que fontes de energia externas ou reatores de bordo altamente eficientes seriam necessários. Este estudo demonstra a capacidade da Modelagem Matemática para quantificar riscos complexos e dimensionar soluções de engenharia em cenários de física extrema.

Com base no escalonamento e simulação Monte Carlo, uma **sonda robótica**

de 1 m² com 3 camadas protetoras (laser + campo magnético + escudo físico) apresenta **redução de erosão de 0,6 mm para 0,03 mm**, tornando a integridade estrutural viável para viagens interestelares curtas (até algumas décadas-luz).

O gráfico a seguir, adaptado de Hoang et al. (2017) 3, ilustra como o dE/dx varia com a velocidade para diferentes elementos incidentes em um material como o Nióbio (escolhido como blindagem física principal).

REFERÊNCIAS

BREAKTHROUGH INITIATIVES. Breakthrough Starshot. [S.l.]: Breakthrough Initiatives, [c2016-2025?]. Disponível em: <https://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>. Acesso em: 26 out. 2025.

Thiem Hoang^{1,2}, A. Lazarian³, Blakesley Burkhart⁴, and Abraham Loeb⁴ Draft version December 28, 2016 Acesso em: 26 out. 2025.

[THE INTERACTION OF RELATIVISTIC SPACECRAFTS WITH THE INTERSTELLAR MEDIUM](#)

HOANG, Thiem; LAZARIAN, A.; BURKHART, Blakesley; LOEB, Abraham. The Interaction of Relativistic Spacecrafts with the Interstellar Medium. **The Astrophysical Journal**, v. 837, n. 1, p. 5, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5da6>. Acesso em: 26 out. 2025.