

48 anos de Voyager em 6 horas de antena

O que a espaçonave há mais tempo em operação na história ensina sobre telemetria com garantia — um teste com os dados reais da NASA, e o que levar para as missões Titã e Marte

Stickybit · agosto/2026 · contato: algorithms@stickybit.com.br

O RESUMO EM UM PARÁGRAFO

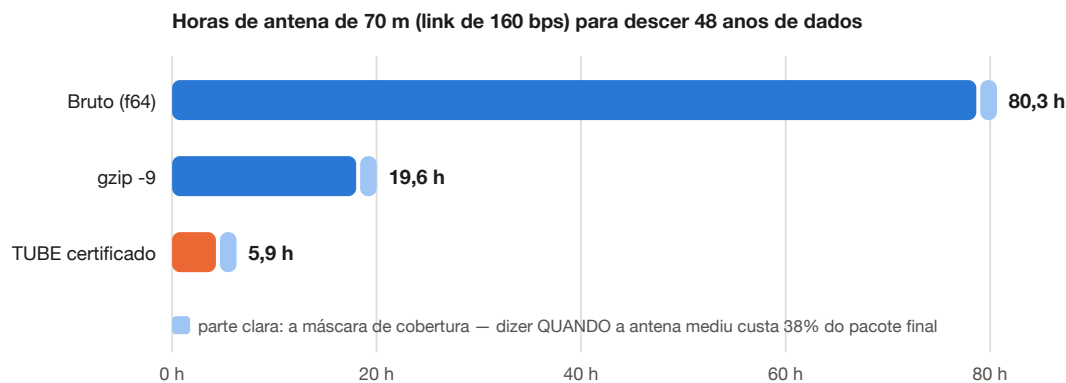
Em agosto de 2026 a NASA anunciou a operação “Big Bang”: desligar equipamentos da Voyager 2 e substituí-los por alternativas mais econômicas para ganhar **um ano** antes de sacrificar mais um instrumento científico. A sonda perde ~4 watts por ano e transmite ciência a ~160 bits por segundo — o regime em que cada watt e cada bit têm dono. Pegamos os dados públicos da própria missão (48 anos, 386 mil horas de medições, arquivo aberto da NASA) e aplicamos nossa tecnologia de telemetria certificada. Três resultados: **(1)** os 48 anos de dados, com garantia matemática de erro e verificáveis por auditor independente, descem em **5,9 horas** do link — contra 19,6 horas da melhor compressão convencional e ~80 horas do dado bruto; **(2)** a decisão científica mais importante da missão — o dia em que a sonda saiu da “bolha” do Sol — ganha um veredito **auditável**, e é possível calcular quanta qualidade de sensor essa decisão exigia (o instrumento real tinha 2,6× de folga; um sensor 4× pior nunca decidiria); **(3)** provar que “nada aconteceu num ano inteiro” custa **13 bytes** — e descobrimos que dizer *quando* a antena mediu custa quase metade de dizer *o que* mediu. Nada disso é oferta para a Voyager: é o ensaio geral, em dado real e icônico, das técnicas que missões futuras — Titã, Marte, enxames de sondas baratas — podem adotar desde o projeto.

O CONTEXTO: UMA SONDA QUE VIVE DE ECONOMIZAR

A Voyager 2 opera há 48 anos com um gerador nuclear cuja potência cai ~4 W por ano. A resposta da NASA ao orçamento que encolhe tem sido **desligar instrumentos inteiros** — desde 2024, dois em cada sonda, e, sem o “Big Bang”, mais um cairia ainda em 2026. Na descida dos dados a situação é análoga: ~160 bps de ciência, recebidos por antenas de 70 metros disputadas por dezenas de missões. É o caso-limite de um regime que não é exceção, e sim o futuro de categorias inteiras: sensores sem bateria, enxames de satélites pequenos, qualquer missão de espaço profundo. **Quando o recurso aperta, a escolha hoje é binária: canal ligado ou canal morto.** Nossa tese é que existe um meio-termo com contrato: degradar a precisão de forma **provada** — e é isso que fomos medir.

O QUE FIZEMOS

Baixamos o arquivo público da missão (SPDF/NASA — aberto e redistribuível): campo magnético, velocidade e densidade do vento solar, temperatura e fluxo de partículas, hora a hora, 1977–2024. Sobre ele rodamos três medições com o nosso empacotador certificado — que comprime garantindo por construção que **nenhuma amostra reconstruída erra mais que um teto contratado (o ε)**, e produz um pacote que um auditor verifica sozinho, sem confiar em quem gravou:

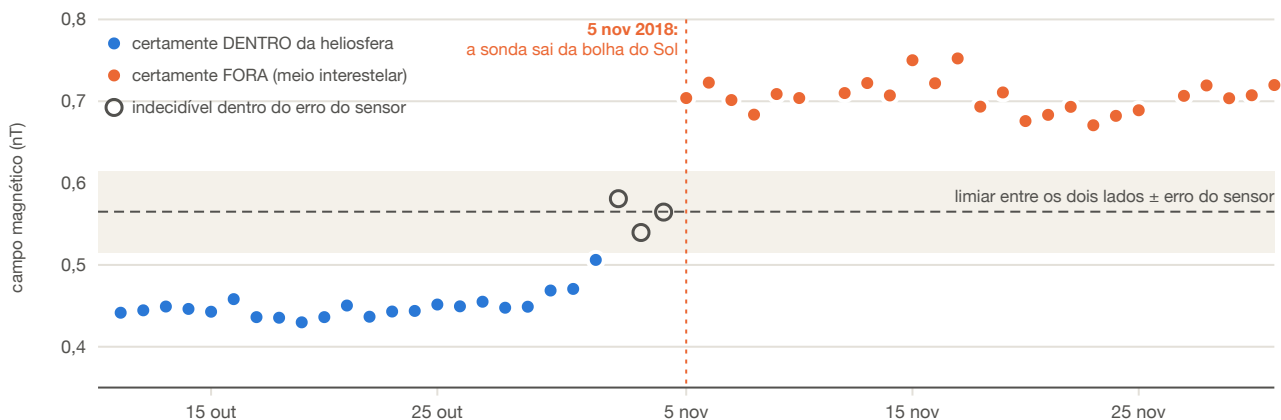


Barras: horas de antena de 70 m necessárias para transmitir os 48 anos dos 5 canais a 160 bps. O erro contratado do pacote certificado é o erro documentado do próprio instrumento (para o magnetômetro, 0,05 nT — a acurácia oficial declarada no arquivo da NASA). A parte clara de cada barra é a “máscara de cobertura”: a lista de quando havia medição válida.

O ganho não é mágica de compressão: é o contrato certo. O arquivo da NASA declara a acurácia real do magnetômetro (0,02–0,05 nT); guardar dígitos abaixo do erro do instrumento é pagar banda por ruído. Com o erro contratado **no nível do próprio sensor**, os 48 anos do canal magnético custam ~1 bit por hora de medição — 8× menos que gzip — e a garantia vai junto, verificável.

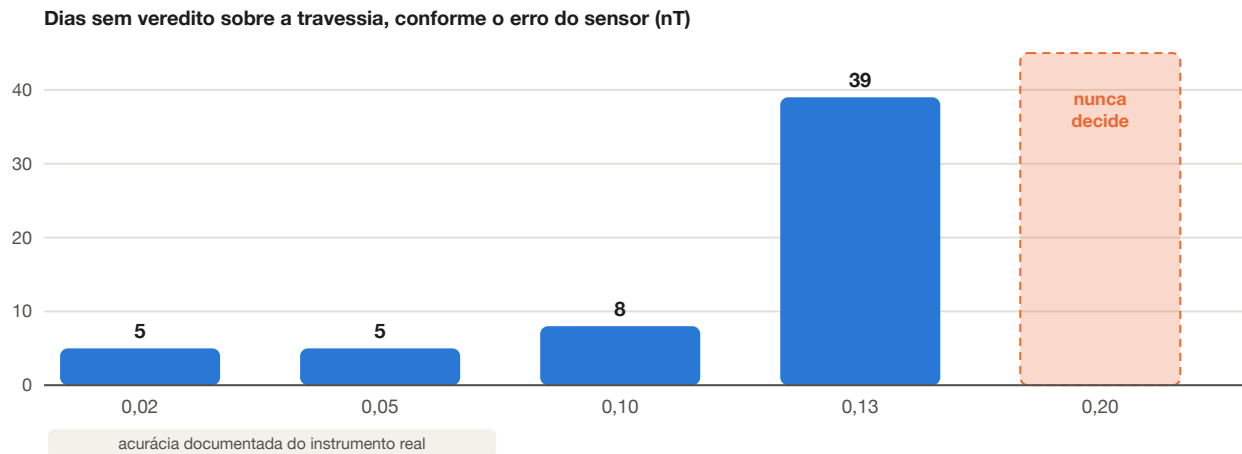
A DECISÃO HISTÓRICA VIRA AUDITÁVEL

Em 5 de novembro de 2018 a Voyager 2 cruzou a heliopausa — saiu da “bolha” de influência do Sol e entrou no meio interestelar. É o tipo de marco que hoje sai de análise artesanal de especialistas. No nosso método, cada dia recebe um de **três vereditos** — certamente dentro, certamente fora, ou indecível dentro do erro do sensor:



Média diária do campo magnético medido pela Voyager 2 em out–nov/2018. O salto de ~0,44 para ~0,70 nT é a saída da heliosfera. Com o erro documentado do instrumento ($\pm 0,05$ nT), sobram apenas 5 dias sem veredito — e esses 5 dias são físicos (a própria fronteira tem espessura e o arquivo tem buracos de cobertura), não culpa do sensor.

O experimento mais útil para quem **especifica** instrumento é variar o erro do sensor e perguntar: com quanto erro essa decisão ainda sai?



Dias sem veredito sobre a data da travessia, em função do erro do sensor. Com o erro real documentado (0,02–0,05 nT), 5 dias — o piso físico. Com o dobro, 8. Com metade do degrau físico (0,13 nT), 39 dias. Com 0,20 nT, a maior descoberta da missão ficaria indecível para sempre.

A leitura executiva: o magnetômetro da Voyager tinha **2,6× de folga** para a decisão que definiu seu legado. Esse número — “quantas vezes o erro do sensor cabe na decisão” — é computável **antes** da missão, na especificação. É a diferença entre comprar acurácia para o datasheet e comprar acurácia para a decisão.

“NADA ACONTECEU” CABE EM 13 BYTES — E A AGENDA DA ANTENA CUSTA 38%

Dois achados menores com consequência grande:

- **Prova de ausência quase de graça.** O pacote certificado carrega um índice de mínimos e máximos que prova, por exemplo, “o campo nunca passou do limiar em 2013” — o índice do ano custa **13 bytes**. Para anos de cruzeiro silencioso (a missão Dragonfly voará ~6 anos até Titã), “nada aconteceu, e está provado” por dezenas de bytes libera o link para a ciência. Com a honestidade obrigatória: a prova cobre as horas *medidas* — e o ano de 2015, com 0,6% de cobertura no arquivo, mostra que uma prova tecnicamente válida pode ser quase vazia se a cobertura não for declarada junto.
- **A máscara é um canal de primeira classe.** A cobertura da Voyager no arquivo é de 31–44% das horas, fragmentada pela agenda das antenas. Codificar *quando* havia medição custou 117 KB — **38% do pacote total**. Em Marte (janelas de retransmissão a cada órbita) e Titã (contato direto com a Terra por poucas horas), esse custo existe e precisa entrar no orçamento de dados desde o projeto.

O QUE LEVAR PARA TITÃ E MARTE

- 1. Contrato de erro decidido no desenho do canal.** Nosso primeiro teste “ingênuo” calibrou o erro absoluto no início da missão — e a 119 unidades astronômicas esse erro era 800× o sinal (densidade cai com a distância). Em espaço profundo quase todo canal é assim: o contrato certo é erro **relativo** certificado. Errar isso no projeto custa o canal inteiro; erramos no teste, a nossa própria checagem pegou o erro, e a regra ficou documentada.
- 2. Cruzeiro silencioso auditável.** Anos de trânsito viram dezenas de bytes de prova (“nenhuma anomalia acima de X”) em vez de silêncio não auditável ou telemetria integral que ninguém olha.
- 3. Degradar com prova em vez de desligar.** Hoje, orçamento apertado = instrumento desligado = canal morto para sempre. A alternativa medida em nossos ensaios: alargar o erro contratado de todos os canais e manter todos vivos, com a perda **provada** — a decisão virá do comitê científico, não do acaso.
- 4. Especificar sensor pela decisão.** O cálculo do último gráfico — quantos × de erro a decisão tolera — feito na fase de proposta, para cada decisão crítica da missão (pouso, tempestade de poeira, fim de instrumento). Compra-se o sensor que a decisão exige, nem mais, nem menos.

O QUE ESTE TESTE NÃO DIZ

O arquivo público é produto **processado** (médias horárias, calibração aplicada): nossos ganhos valem para arquivo, retransmissão e auditoria — não afirmamos nada sobre rodar no computador de bordo de 1977, que não recebe software novo. O limiar da travessia foi definido com o evento já conhecido: medimos a *decidibilidade da data* sob erro de sensor, não a descoberta cega. E o sensor de plasma some do arquivo na véspera do cruzamento (foi desligado de vez em 2024) — o veredito usa o canal magnético, que é justamente o que sobrou ligado. Tudo é reproduzível: dados públicos da NASA com acurácia documentada no próprio arquivo, código e vereditos commitados em `voyagermon/`.