

Desenvolvimento De Telemetria De Baixo Custo Para Foguetes Amadores

Low-Cost Telemetry Development For Amateur Rockets

Thiago Henrique Woitovicz Silva^{1*}, José Victor Pita Daiko¹, Henrique De Araujo Pollo¹, Oscar Rodrigues dos Santos¹, Sergio Rodrigues Fernandes¹, Michel Corci Batista¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CM) e Polo Astronômico Rodolpho Caniato
twoitoviczz@gmail.com

Resumo:

Este trabalho apresenta o projeto e validação de um sistema de telemetria de baixo custo para foguetes de competição (foguetes de garrafa PET e propelidos a combustível sólido). O sistema integra um microcontrolador ESP32-Wrover (ou ESP8266), módulo GPS NEO-6M, transceptor LoRa SX1278 e acelerômetro MPU-6050, alimentados por duas células Li-Ion de 100mAh controladas por BMS. Descrevemos os testes de calibração, alcance de comunicação, aquisição de dados de voo e análise de desempenho, demonstrando que é possível obter posição com erro < 5 m, comunicação LoRa eficaz a 1 km em campo aberto e registro de acelerações até 10 g com ruído < 0,05 g.

Palavras-chave: Telemetria; Expressif; LoRa; GPS; Foguetes amadores.

Abstract:

*This paper presents the design and validation of a low-cost telemetry system for competition rockets (PET bottle rockets propelled by solid fuel). The system integrates an ESP32-Wrover (or ESP8266) microcontroller, NEO-6M GPS module, SX1278 LoRa transceiver, and MPU-6050 accelerometer, powered by two 100 mAh Li-Ion cells managed by a BMS. Calibration tests, communication range assessments, flight data acquisition, and performance analysis are detailed. Results confirm positioning errors below 5 m, reliable LoRa communication at 1 km in open-field conditions, and acceleration recordings up to 10 g with noise under 0.05 g. The solution demonstrates viability for amateur rocketry, offering high accuracy at minimal cost.**

Keywords: Telemetry; ESP32; LoRa; GPS; Amateur Rockets.

INTRODUÇÃO

Os foguetes de garrafa PET e os foguetes com propulsão sólida são amplamente utilizados em competições estudantis, projetos educacionais e atividades de iniciação científica, devido ao seu baixo custo, simplicidade de construção e potencial para ilustrar princípios fundamentais da física e engenharia aeroespacial (Setti *et al.* 2016; Xavier *et al.*, 2022). Esses modelos, embora simples, oferecem uma plataforma valiosa para o estudo de conceitos como cinemática, dinâmica, aerodinâmica e telemetria, tornando-se ferramentas pedagógicas eficazes no ensino de ciências e tecnologia (Halliday; Resnick; Walker, 2016).

Os foguetes de garrafa PET, também conhecidos como foguetes hidropropelidos, utilizam reações químicas entre substâncias como vinagre e bicarbonato de sódio para gerar propulsão. Essa abordagem, além de segura e acessível, permite a exploração de conceitos como pressão, força e conservação de momento (Sitiko, 2021). Por outro lado, os foguetes com propulsão sólida, frequentemente empregados em competições como a Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica (OBA), envolvem a queima de combustíveis sólidos para produzir empuxo, simulando de forma simplificada o funcionamento de foguetes reais (Xavier *et al.*, 2022).

A aplicação desses foguetes vai além do âmbito educacional. Eles são utilizados em pesquisas que visam o desenvolvimento de tecnologias de baixo custo para monitoramento ambiental, como a coleta de dados atmosféricos em baixas altitudes. Além disso, projetos de extensão universitária frequentemente empregam esses modelos para promover o interesse pela ciência entre estudantes do ensino médio, demonstrando a viabilidade de soluções criativas com recursos limitados (Snovarski Fonseca *et al.*, 2018).

No entanto, para maximizar o potencial desses foguetes, é essencial implementar sistemas de telemetria que permitam a aquisição confiável de dados durante o voo, como aceleração, altitude e posição. A integração de tecnologias acessíveis, como microcontroladores (ESP32), sensores inerciais (MPU-6050) e comunicação LoRa, tem se mostrado uma solução viável para esse fim. Tais sistemas não apenas enriquecem a experiência prática, mas também contribuem para a democratização do acesso à instrumentação aeroespacial, alinhando-se com os objetivos de educação inclusiva e inovação tecnológica.

Neste contexto, o presente trabalho descreve o desenvolvimento e a validação de um sistema de telemetria de baixo custo voltado para foguetes amadores, contemplando desde a seleção criteriosa dos componentes até a análise de seu desempenho em condições reais de voo. A pesquisa busca suprir uma lacuna identificada na literatura, ao propor uma solução acessível, replicável e tecnicamente viável, destinada tanto a entusiastas quanto a educadores. Ademais, são apresentados dados empíricos que corroboram a eficácia das tecnologias adotadas.

OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de telemetria de baixo custo para foguetes experimentais, abrangendo desde modelos

recreativos (como garrafas PET com vinagre e bicarbonato) até foguetes com propulsão sólida utilizados em competições estudantis. O projeto envolve a implementação e os testes do sistema, com foco na obtenção de dados confiáveis em condições de alta aceleração.

A pesquisa situa-se na intersecção entre instrumentação embarcada, sensoriamento remoto e comunicações sem fio em sistemas móveis, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias acessíveis aplicáveis à iniciação científica e à educação aeroespacial. Sua relevância reside na democratização de ferramentas de monitoramento de voo, permitindo a coleta de dados precisos mesmo com componentes de baixo custo e ampla disponibilidade comercial.

As principais questões investigadas que orientam este trabalho dizem respeito à coerência na obtenção de dados confiáveis de aceleração, posição e trajetória, avaliando se o sistema proposto é capaz de manter uma conexão eficaz durante o voo do modelo e se os dados empíricos coletados são coerentes com aqueles esperados com base na física envolvida nos processos, utilizando componentes de baixo custo amplamente disponíveis no mercado de varejo.

Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica parte da integração de conceitos da física clássica com princípios de eletrônica presentes em telecomunicações, tendo como pano de fundo a aplicação prática em foguetes educacionais. O embasamento envolve quatro áreas principais:

Princípios da Física do Movimento

O comportamento de foguetes em voo pode ser descrito utilizando os conceitos fundamentais da cinemática e dinâmica clássica (Halliday; Resnick; Walker, 2016). Em sua fase de subida, o foguete realiza um movimento uniformemente variado (MRUV), sendo acelerado pela força propulsora gerada pela reação química (como vinagre e bicarbonato) ou pela queima do propelente sólido. Durante essa etapa, o sensor acelerômetro registra picos de aceleração que podem chegar a dezenas de vezes a gravidade terrestre (10 g ou mais, dependendo da massa e do impulso). Após o término da queima ou esgotamento da pressão, o foguete entra em movimento ascendente desacelerado até atingir o apogeu (ponto mais alto), momento em que a velocidade vertical se anula.

Na descida, o movimento é governado pelas leis do movimento uniformemente acelerado, onde a única força significativa é o peso (caso não haja paraquedas), ou um movimento de queda com resistência do ar. A trajetória, em lançamentos oblíquos, pode ser tratada como movimento parabólico, e os dados de GPS podem ser usados para reconstruir essa curva no plano horizontal (x-y), enquanto o tempo de voo e os registros inerciais ajudam a descrever o eixo z (altitude).

Fundamentos de Comunicação LoRa e Protocolos de Telemetria.

O sistema de comunicação adotado baseia-se na tecnologia LoRa (Long Range), que utiliza modulação por espalhamento espectral (chirp spread spectrum – CSS). Essa técnica permite transmissões a longas distâncias com baixíssimo consumo energético, mesmo em ambientes com ruído ou obstáculos. O chip SX1278 (Semtech CORPORATION), utilizado neste trabalho, opera tipicamente na

faixa de 433 MHz, permitindo transmissões de até 15 km em linha de visada em ambientes ideais embora, para foguetes de pequeno porte, o alcance prático visado seja de até 1 km com margem de segurança.

LoRa é altamente adequado para telemetria de foguetes, pois os pacotes são pequenos, a frequência de transmissão pode ser ajustada (por exemplo, a cada 200 ms), e o protocolo é tolerante à perda esporádica de pacotes o que é relevante quando o foguete sai da linha de visada ou sofre interferência.

Sensores Inerciais MEMS

O MPU-6050 é um sensor inercial baseado na tecnologia MEMS (Microelectromechanical Systems), integrando um acelerômetro de 3 eixos e um giroscópio de 3 eixos em um único encapsulamento. Essa tecnologia permite medir variações de aceleração linear e de rotação angular com boa precisão a baixo custo e baixo consumo (*TDK CORPORATION*).

Na aplicação em foguetes, o acelerômetro é usado para identificar o pico de aceleração no lançamento e detectar eventos como apogeu e impacto. O giroscópio pode ser utilizado para estudar a estabilidade do voo e identificar rotações indesejadas (rolagens, guinadas). A faixa de operação típica do MPU-6050 é de $\pm 16g$ (ajustável), e o ruído de fundo após filtragem digital pode ser reduzido para menos de $\pm 0,02g$.

Sistema de Posicionamento Global (GPS)

O módulo NEO-6M (*U-BLOX. NEO-6 series*) é um receptor GPS de baixo custo amplamente utilizado em aplicações de navegação e rastreamento. Ele é capaz de fornecer dados de latitude, longitude, altitude, velocidade e horário com precisão suficiente para aplicações amadoras. A precisão horizontal típica é de 2,5 m (CEP, circular error probable), com taxa de atualização de 1 Hz.

METODOLOGIA

Arquitetura do sistema

A arquitetura geral do sistema é composta por um módulo final encapsulado que integra todos os demais componentes, tendo como núcleo o ESP32-Wrover (*Expressif. ESP32 Séries*). Este microcontrolador orquestra, por meio de suas interfaces nativas, a comunicação com cada periférico. Para tanto, cada módulo utiliza exclusivamente um dos barramentos de comunicação disponíveis no ESP32: o MPU-6050 opera sobre I²C (Inter-Integrated Circuit), o receptor GPS comunica-se via UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) e a radiotransmissão LoRa faz uso do SPI (Serial Peripheral Interface). Embora cada canal seja reservado a um só módulo, tal divisão não prejudica o desempenho, pois reflete simplesmente a compatibilidade nativa de cada dispositivo com o respectivo protocolo.

A alimentação do sistema fica a cargo de um par de baterias de íon-lítio conectadas em série. O gerenciamento de carga e descarga é feito por uma BMS (Battery Management System), que previne tanto sobrecargas de tensão quanto descargas profundas, protegendo assim a vida útil do conjunto energético.

Procedimentos de Teste

Para validar o funcionamento integrado, foi necessária a garantia de uma comunicação estável entre os módulos LoRa. Como critério inicial, emparelhados dois transceptores idênticos, em configuração “stock” (sem modificações), e ajustamos uma taxa realista de envio de pacotes de 32 bits a cada 200 ms, um cenário deliberadamente leve para testes de até 1,5 km de distância. Optamos por empregar bibliotecas nativas do ESP32, de uso simples, ainda que menos robustas frente a interferências externas.

A calibração do MPU-6050 ocorreu em bancada: posicionamos o sensor em gabaritos graduados, partindo de repouso (0,0,0) e movendo-o em incrementos de 10 cm até 1 m, aferindo a resposta via software para verificar coerência nos eixos. No caso do GPS, conduzimos testes de precisão estáticos em diversos pontos, avaliando falhas associadas à recepção de satélites em ambientes com cobertura parcial do céu. Realizamos medições em “Cold-Start”, situação em que o módulo inicia sem referências temporais para verificar a variabilidade do tempo até estabelecimento fixo, crítica em locais com visada restrita.

Durante essas validações iniciais, não utilizamos o sistema de potência (baterias e BMS), concentrando-nos exclusivamente na aquisição de dados e na robustez da comunicação. Contudo, simulamos cenários de consumo mais exigentes estimado em aproximadamente 150 mAh por meio de um resistor de 27 Ω como carga, confirmando que a BMS protege adequadamente o pack contra descarga profunda (limite definido em 3,3 V por célula)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta alguns resultados obtidos em testes realizados com os módulos LoRa. Nela, é possível observar a distância entre os módulos, a intensidade do sinal RSSI (Received Signal Strength Indicator), que indica a força do sinal de comunicação, sendo valores em torno de -40 dBm considerados muito bons, e valores mais altos (em módulo) indicativos de degradação da qualidade do sinal, e o PRR (Packet Reception Rate), que representa a porcentagem de dados corretamente recebidos durante a comunicação.

Tabela 01: Tabela de dados obtidos dos módulo Lora

Distância (m)	RSSI Esperado(dbm)	RSSI Medido (dBm)	Diferença (dB)	PRR Esperado(%)	PRR Obtido(%)
200	- 60	- 61	- 1	100	99,7
500	- 75	- 76	- 1	99	97,8
100	- 85	- 88	- 3	95	92,5
1500	- 90	- 93	- 3	90	86,2

Fonte: os autores (2025).

Deslocamento real vs. Medido com a biblioteca de integração do MPU - 6050

Na Tabela 2, são apresentados os dados de deslocamento teorizados e reais do foguete medidos com o uso do módulo MPU - 6050.

Tabela 02: Testes deslocamento teórico e práticos.

Posição real (cm)	Deslocamento teórico esperado(cm)	Deslocamento medido(cm)	Erro absoluto(cm)	Erro relativo
30	30,0	31,0	1,0	18,0%

60	60,0	62,5	2,5	4,1%
90	90,0	94,1	4,1	4,5%

Fonte: os autores (2025).

Dados de ângulo real vs medido (MPU - 6050)

Na Tabela 3 é exposto a comparação do ângulo real com o medido para fins de sabermos a porcentagem e a quantidade do erro.

Tabela 03: Dados teóricos e reais sobre a angulação do foguete comparados

Ângulo real	Ângulo medido	Erro absoluto	Erro relativo	Observações
30°	31,8°	1,8°	6,0%	esperado
60°	62,7°	2,7°	4,5%	Erro tende aumentar suavemente
90°	94,3°	4,3°	4,8%	Erro residual maior

Fonte: os autores (2025).

Precisão estática do GPS NEO - 6M em diferentes ambientes

Na Tabela 4 temos os dados de teste do módulo GPS NEO - 6M em diferentes situações de tempo e local.

Tabela 04: Dados de precisão estática do GPS NEO - 6M

Ambiente	Condição do céu	Tipo de start	T. médio Para fixar satélites (s)	Número de satélites	Erro médio de posição(m)	Cep 50(m)	observações
Campo aberto	Céu totalmente limpo	Cold start	38	9	2,8	2,3	Precisão ideal
Embaixo de árvore	Céu parcialmente obstruído	Cold start	51	6	5,6	4,7	Sinais instáveis
Interior de edifício	Céu totalmente obstruído	Cold start	>120	0-2	N/A	N/A	GPS não fixou posição após dois minutos

Fonte: os autores (2025).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise dos dados obtidos, é possível concluir que o sistema do foguete apresentou um desempenho satisfatório. Conforme esperado, os principais problemas observados estiveram relacionados à comunicação e ao funcionamento do módulo GPS, comprometidos principalmente pelas condições climáticas e pelo aumento da distância entre os módulos. Por outro lado, os erros de inclinação e angulação registrados foram mínimos e podem ser considerados desprezíveis para os fins desta pesquisa.

Embora o funcionamento geral do foguete tenha sido adequado, a perda na qualidade da comunicação representa uma limitação significativa, especialmente considerando o objetivo de localizar o artefato em longas distâncias e obter dados de telemetria em tempo real. A interrupção na transmissão de informações

compromete a análise completa do desempenho do foguete durante o voo. No entanto, tais dificuldades são esperadas em protótipos iniciais e serão abordadas e corrigidas nas versões futuras do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-WROVER Datasheet**. Espressif, 2020. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wrover_datasheet_en.pdf. Acesso em: [insira a data de acesso].

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

SEMTECH CORPORATION. **SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver**. Semtech, 2020. Disponível em: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/software-library-protocol-solution/>. Acesso em: 02 de fev. 2025.

SETTI, E. J. K.; SCHWERTNER, A. E.; DEPARIS, D.; TURRA, F. F. R.; VERTUAN, R. E. Modelagem Matemática e Física: uma experiência com foguetes. In: **ENCONTRO NACIONAL DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA**, 12., 2016. *Anais...* [S. l.: s. n.], 2016. p. 1-12.

SITKO, Camila Maria; CANALLE, J. B.; MESQUITA, A. A. Foguetes de garrafas PET “flex”: conceitos, construção, lançamento e procedimentos de segurança. **A Física na Escola (Online)**, v. 19, p. 1-10, 2021.

SNOVARSKI FONSECA, Marcus Vinicius; LEAL RODRIGUES, Igor Matheus; SNOVARSKI FONSECA, Marcelo Belchior. Uma abordagem didática para a pressão interna de foguetes de garrafa PET propulsionados pela reação química entre vinagre e bicarbonato de sódio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, p. e3504, 2018.

TDK CORPORATION. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification**. InvenSense (TDK), 2013. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2025.

U-BLOX. **NEO-6 series - u-blox 6 GPS modules - Data Sheet**. U-blox, 2013. Disponível em: <https://www.u-blox.com/en/positioning-chips-and-modules#Standard-precision-GNSS>. Acesso em: 15 abr. 2025.

XAVIER, A. P.; CAMPOS, D. G.; VIEIRA, R. S.; CRUZ, C. G. de O. Foguete de garrafa PET como ferramenta para o ensino de física. **Revista Multidisciplinar do Vale do Jequitinhonha – ReviVale**, v. 2, n. 1, 2022.