

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA INTELIGENTE BASEADA EM IoT PARA LANÇAMENTOS DE VLS (VEÍCULO LANÇADOR DE SATÉLITE)

IoT-BASED SMART WEATHER STATION FOR SATELLITE LAUNCH VEHICLE (VLS) LAUNCHES

Vinicius Leite Lemes¹
Francisco Antonio Lotufo²
Antonio Faria Neto³

Resumo – Este trabalho apresenta uma estação meteorológica inteligente baseada no conceito de Internet das Coisas (IoT), capaz de integrar múltiplos sensores ambientais a uma plataforma de processamento remoto. O sistema foi desenvolvido para apoiar operações aeroespaciais, em especial os lançamentos de Veículos Lançadores de Satélites (VLS), fornecendo em tempo real dados de temperatura, umidade, pressão atmosférica, velocidade do vento, pluviosidade e probabilidade de chuva. As informações são transmitidas para um banco de dados em nuvem (Firebase) e disponibilizadas em uma interface web para consulta imediata. Nos testes realizados, a estação demonstrou confiabilidade, baixo custo e aplicabilidade em operações críticas de meteorologia.

Palavras-chave: Internet das Coisas. Meteorologia. VLS. Estação Meteorológica Inteligente. Acesso Remoto.

Abstract - This work presents a smart weather station based on the Internet of Things (IoT) concept, designed to integrate multiple environmental sensors with a remote processing platform. The system was developed to support aerospace operations, particularly Satellite Launch Vehicle (VLS) missions, by providing real-time data on temperature, humidity, atmospheric pressure, wind speed, rainfall, and precipitation probability. The information is transmitted to a cloud database (Firebase) and made available through a web interface for immediate analysis. Tests demonstrated that the station offers reliability, low cost, and applicability in critical meteorological operations.

Keywords: Internet of Things. Meteorology. VLS. Smart Weather Station. Remote Access.

¹Mestrando em Engenharia pela Faculdade de Engenharia e Ciências da Universidade Estadual Paulista (UNESP). Contato: vl.lemes@unesp.br.

²Doutor em Engenharia (UNESP); Professor na Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá. Contato: francisco.lotufo@unesp.br.

³Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI); Pesquisador na Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá. Contato: antonio.faria-neto@unesp.br.

I. INTRODUÇÃO

Em 1971, foi criado, no então Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA), o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), órgão do Ministério da Aeronáutica responsável pelo desenvolvimento e aprimoramento das atividades espaciais no Brasil (PALMERIO, 2017).

O sucesso de operações aeroespaciais depende diretamente do conhecimento das condições meteorológicas locais, que influenciam a trajetória dos veículos e a segurança das missões (FERREIRA GISLER, 2009). Entre os fatores climáticos mais relevantes em regiões tropicais estão a brisa marítima, a zona de convergência intertropical, os distúrbios ondulatórios de leste, os vórtices ciclônicos em altos níveis, as linhas de instabilidade e os sistemas frontais, que afetam significativamente a dinâmica atmosférica (FERREIRA GISLER, 2009).

Variáveis como temperatura e umidade também podem comprometer componentes aeroespaciais, uma vez que alterações físicas, como dilatações e expansões, prejudicam seu funcionamento adequado. Esse fator esteve presente, por exemplo, no acidente com o ônibus espacial Challenger (PALMERIO, 2017). Além disso, a dinâmica dos ventos, diretamente influenciada por essas variáveis, exerce papel fundamental na definição das trajetórias de voo.

A circulação de brisas, induzida pelo gradiente de temperatura entre o oceano e o continente, varia em intensidade de acordo com os ciclos diurnos e sazonais. Em situações de ventos globais mais fracos, como os alísios, as brisas podem dominar a circulação local (FERREIRA GISLER, 2009). Dessa forma, o monitoramento da velocidade e direção do vento é essencial, visto que pode impactar significativamente a trajetória dos foguetes.

Embora diferentes estudos explorem o uso de plataformas IoT para monitoramento ambiental em contextos agrícolas, urbanos e educacionais (KATYAL; YADAV; PANDEY, 2016; OLIVEIRA, 2017; VIEBRANTZ, 2019), observa-se uma lacuna significativa na aplicação dessas tecnologias ao setor aeroespacial.

Nesse sentido, a principal contribuição deste trabalho consiste no desenvolvimento e validação de uma estação meteorológica inteligente de baixo custo, projetada especificamente para apoiar operações críticas de lançamento de Veículos Lançadores de Satélites (VLS). A solução proposta alia acessibilidade e confiabilidade, permitindo a aquisição e disponibilização remota de dados meteorológicos em tempo real, característica essencial para ampliar a segurança e a eficiência de missões aeroespaciais.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

O monitoramento meteorológico é um tema amplamente estudado na literatura, sobretudo em aplicações voltadas para a aviação, agricultura e, mais recentemente, operações aeroespaciais. A integração de sensores ambientais com plataformas digitais baseadas em Internet das Coisas (IoT) tem se mostrado uma abordagem promissora para a coleta e análise de dados em tempo real.

Diversos autores propõem o uso de plataformas de baixo custo para a medição de variáveis meteorológicas. Katyal, Yadav e Pandey (2016) desenvolveram uma estação climática utilizando Arduino, voltada para aplicações educacionais e de monitoramento local. De modo semelhante, Oliveira (2017) e Viebrantz (2019) exploraram a integração de microcontroladores ESP8266 com sensores ambientais, destacando a viabilidade de soluções acessíveis para coleta de dados em tempo real.

Mais recentemente, Da Silva et al. (2025) propuseram uma estação meteorológica inteligente de baixo custo, equipada com sensores modernos e comunicação via ESP32,

aplicada ao monitoramento climático em Brasília, demonstrando a evolução da integração entre hardware acessível e plataformas de análise meteorológica.

No contexto de sistemas aeroespaciais, Ferreira Gisler (2009) analisou o impacto de fatores meteorológicos nos lançamentos de foguetes no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), ressaltando a importância da disponibilidade contínua de informações atmosféricas confiáveis para a segurança das missões.

Apesar dos avanços, observa-se que muitas soluções propostas na literatura concentram-se em contextos agrícolas ou urbanos, havendo uma lacuna na aplicação específica de estações meteorológicas inteligentes para operações aeroespaciais. Nesse sentido, a proposta deste trabalho busca preencher essa lacuna, ao desenvolver e validar uma plataforma de baixo custo e fácil integração, voltada diretamente para o apoio a lançamentos de Veículos Lançadores de Satélites (VLS) no Brasil.

III. METODOLOGIA

A plataforma foi desenvolvida utilizando a placa NodeMCU ESP8266, escolhida por sua conectividade Wi-Fi e compatibilidade com diferentes sensores digitais (OLIVEIRA, 2017; VIEBRANTZ, 2019). Os principais sensores empregados foram:

- **DHT11**: temperatura e umidade relativa;
- **Anemômetro digital**: velocidade do vento;
- **Sensor pluviométrico**: pluviosidade acumulada;
- **BMP180**: pressão barométrica;
- **Sensor de chuva**: detecção de precipitação.

Os dados coletados são enviados ao **Firestore**, que permite armazenamento e acesso em tempo real (GHARSELLAUI, 2019; VIEBRANTZ, 2019). A exibição dos resultados foi implementada em uma página web desenvolvida com **JavaScript**, **HTML** e **CSS**, tecnologias amplamente utilizadas em aplicações de Internet das Coisas.

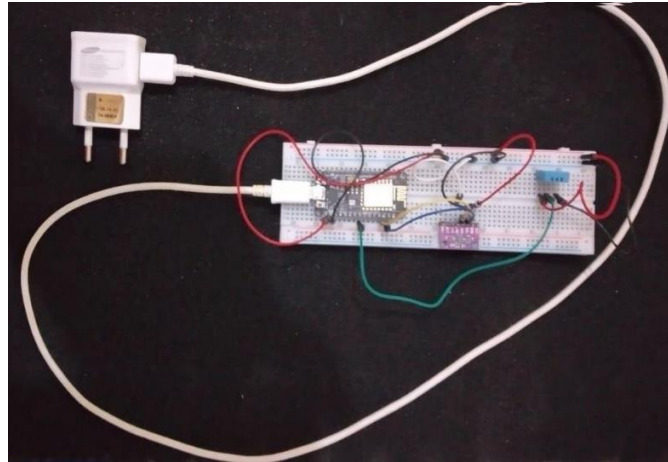
A Tabela 1 apresenta as especificações elétricas e operacionais da plataforma meteorológica, incluindo a faixa de funcionamento dos sensores e a forma de alimentação do sistema.

Tabela 1 – Especificações elétricas da plataforma meteorológica

Característica	Valor	Unidade
Tensão de alimentação	5	[V]
Corrente	500	[mA]
Temperatura	0 a 50	[°C]
Umidade	20 a 95	[%]
Velocidade do vento	0 a 200	[km/h]
Pluviosidade	0 a 145	[mm]
Pressão barométrica	30000 a 110000	[Pa]
Sensor de chuva	0 a 100	[%]
Tipo de conexão	Wi-Fi	802.11 b/g/n
Taxa de transmissão	2.4	[GHz]

Na primeira versão do protótipo (Figura 1), a montagem foi realizada em **protoboard**, o que possibilitou a integração inicial dos componentes e ajustes durante a fase de desenvolvimento. A alimentação foi feita por meio de um carregador USB de celular.

Figura 1 – Modelo em Protoboard



Fonte: Autores (2025)

Com a evolução do projeto, a estrutura foi redesenhada para maior praticidade em campo, resultando em dimensões reduzidas e melhor organização dos sensores. Essa versão final recebeu a denominação **BB MET II (Base Básica de Meteorologia II)** (Figura 2).

Figura 2 – Versão final do projeto (BB MET II)



Fonte: Autores (2025).

A Figura 3 ilustra a arquitetura de funcionamento do sistema, destacando a integração dos sensores com a plataforma de acesso remoto.

Figura 3 – Diagrama de funcionamento do projeto



Fonte: Autores (2025)

A BB MET II realiza coletas meteorológicas em tempo real, com intervalo de 20 segundos entre cada aquisição, o que contribui para minimizar interferências pontuais. Os dados são enviados automaticamente ao banco de dados Firebase, permitindo consulta imediata.

Além disso, considerando a abrangência dos parâmetros monitorados e a facilidade de interação com o usuário por meio da interface web, o sistema apresenta **baixo custo de produção** aliado a uma relação favorável de **custo-benefício**, reforçando sua aplicabilidade em operações práticas.

Para complementar a análise metodológica, elaborou-se uma estimativa de custos dos principais sensores e componentes utilizados na montagem do protótipo BB MET II. A Tabela 2 apresenta o detalhamento individual de cada item, incluindo quantidade e valor unitário, permitindo uma visão clara do investimento necessário para a construção da estação meteorológica.

Tabela 2 – Custo de produção do BB MET II

BBMET II		
Sensores	Quantidade	Valor
DHT 11	1	R\$ 28,00
BMP 180	1	R\$ 5,90
Sensor de Chuva	1	R\$ 8,70
Anemometro	1	R\$ 274,70
Pluviometro	1	R\$ 341,70
ESP8266	2	R\$ 65,20
Componentes	Quantidade	Valor
Placas	2	R\$ 10,00
Caixa Plástica	2	R\$ 36,00
Bateria	2	R\$ 29,90
TP4056	1	R\$ 4,80
MT3608	1	R\$ 7,00
MDL0029	1	R\$ 14,70
Fonte Chaveada	1	R\$ 49,00
Total		R\$ 826,60

O custo total de produção da estação foi de R\$ 826,60, valor considerado baixo frente às funcionalidades disponibilizadas e ao potencial de aplicação em contextos de monitoramento remoto e crítico. Esse resultado confirma que o sistema atende ao princípio de baixo custo e bom custo-benefício, um dos objetivos centrais do projeto.

IV. RESULTADOS

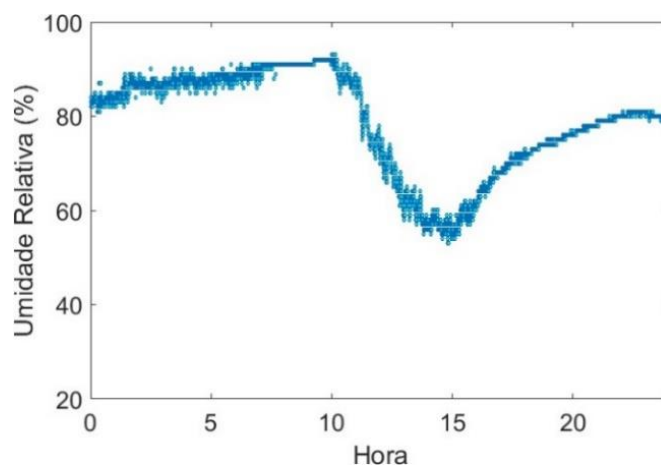
Durante o período de testes, realizado entre 17/05/2023 e 07/07/2023, a estação coletou dados contínuos de **temperatura e umidade relativa do ar**.

O desempenho do sensor **DHT11** foi avaliado por meio da comparação com os dados disponibilizados pelo **Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)** no mesmo intervalo de tempo. Ressalta-se que o site do INMET não fornece séries gráficas de pressão atmosférica, probabilidade de chuva e velocidade do vento, motivo pelo qual apenas temperatura e umidade foram utilizadas para validação.

A robustez do sistema também foi analisada: a estação apresentou **funcionamento estável durante 53 dias consecutivos**, registrando apenas falhas pontuais de conexão, o que evidencia sua confiabilidade operacional.

As Figuras 4 e 6 apresentam os dados de **umidade relativa e temperatura** obtidos pela estação BB MET II em 24 horas, no dia 06/07/2023. Já as Figuras 5 e 7 mostram os dados correspondentes do INMET para o mesmo período.

Figura 4 – Umidade Relativa por hora BBMET



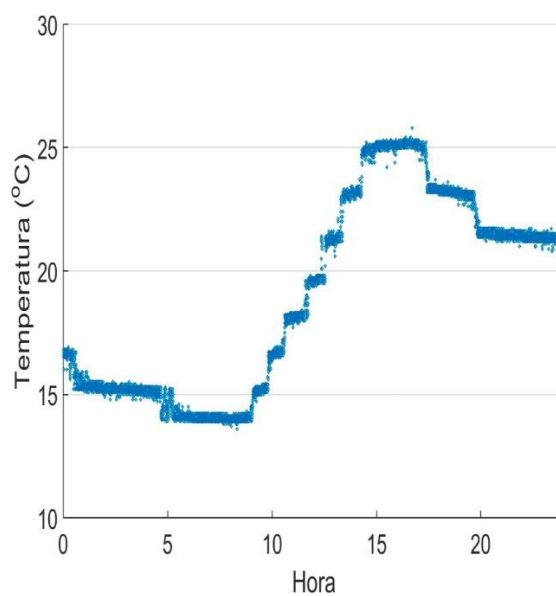
Fonte: Próprio autor

Figura 5 – Umidade por Hora – INMET
Instituto Nacional de Meteorologia – INMET



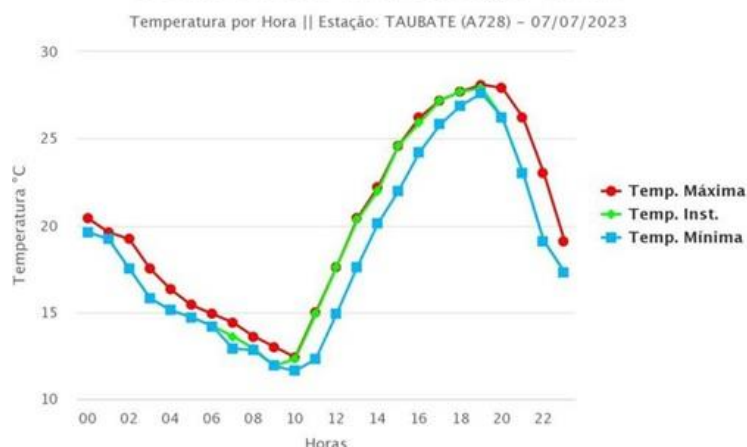
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia INMET

Figura 6 – Temperatura por Hora BBMET



Fonte: Próprio autor

Figura 7 – Temperatura por Hora – INMET
Instituto Nacional de Meteorologia – INMET



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia INMET

Observa-se que a temperatura máxima registrada pela estação foi de **25,8 °C às 16h00**, enquanto a umidade relativa mínima foi de **53% por volta das 15h00**. Os resultados apresentaram **boa concordância** com os dados oficiais, validando a aplicabilidade do sistema em operações aeroespaciais.

Além disso, a Figura 8 mostra a **classificação do funcionamento da estação** ao longo do período de testes de longo prazo, destacando em vermelho os dias em que ocorreram instabilidades de conexão.

Figura 8 – Classificação do funcionamento da estação meteorológica durante o período de testes de longo prazo, entre os dias 17/05 e 07/07.

MAIO						
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			
JUNHO						
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			
JULHO						
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

Fonte: Próprio Autor

Para avaliar a performance do sensor DHT11 em comparação aos dados oficiais do INMET, foram calculadas métricas de erro. O erro médio absoluto (MAE) para a temperatura foi de **0,6 °C**, enquanto para a umidade relativa foi de **3,8%**. Esses valores indicam boa concordância entre a estação proposta e a referência oficial, validando sua aplicabilidade prática.

Tabela 3 – Comparação entre a estação BB MET II e os dados do INMET (06/07/2023)

Variável	INMET (máx.)	Estação (máx.)	Diferença	MAE	MAPE
Temperatura (°C)	26,2	25,8	-0,4	0,6	2,3%
Umidade Relativa (%)	55	53	-2	3,8	5,7%

Os resultados demonstram que, mesmo utilizando sensores de baixo custo, a estação apresentou desempenho próximo ao sistema de referência oficial. Diferenças pontuais podem ser atribuídas à resolução dos sensores utilizados (DHT11), mas não comprometem a validade da proposta para uso em operações aeroespaciais.

Esses resultados indicam que o uso de estações meteorológicas inteligentes em centros de lançamento pode permitir a obtenção de dados ambientais de forma **remota, confiável e instantânea**, fornecendo informações diretamente aos especialistas do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE).

V. CONCLUSÃO

O projeto demonstrou a viabilidade técnica da estação meteorológica inteligente como ferramenta de apoio às operações aeroespaciais brasileiras. Os resultados confirmaram que a plataforma apresenta confiabilidade, baixo custo, escalabilidade e capacidade de fornecer dados em tempo real por meio de acesso remoto.

A validação experimental mostrou boa concordância entre os dados obtidos pela estação e os fornecidos pelo INMET, evidenciando seu potencial de uso em operações críticas de meteorologia aplicada.

Entretanto, algumas **limitações** devem ser destacadas, como a utilização de sensores de baixo custo (ex.: DHT11), que possuem precisão limitada frente a equipamentos meteorológicos profissionais. Essas restrições não comprometem a prova de conceito, mas indicam a necessidade de melhorias em futuras versões do sistema.

Como trabalhos futuros, sugere-se a adoção de sensores mais robustos e precisos, a integração de novas tecnologias de comunicação. Além disso, a implementação em larga escala nos centros de lançamento de Alcântara (MA) e Barreira do Inferno (RN) poderia fornecer suporte meteorológico ainda mais abrangente às operações aeroespaciais brasileiras.

VI. REFERÊNCIAS

DA SILVA, T. A. et al. New model for weather stations integrated to intelligent meteorological forecasts in Brasília. **Sensors**, Basel, v. 25, n. 11, p. 3432, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25113432>.

FERREIRA GISLER, Carlos Alberto. **Análise do perfil de vento na camada limite superficial e sistemas meteorológicos atuantes no Centro de Lançamento de Alcântara**. São José dos Campos: INPE, 2009.

GHARSELLAOUI, Bayrem. **Internet of Things prototyping with Firebase: how to do more with less**. Medium, 19 jan. 2019. Disponível em: <https://medium.com/free-code-camp/iot-prototyping-with-firebase-doing-more-with-less-2f5c746dac8b>. Acesso em: 5 jul. 2020.

KATYAL, Amber; YADAV, Ravi; PANDEY, Manoj. **Wireless Arduino Based Weather Station**. [S. l.: s. n.], 2016.

MURTA, José Gustavo Abreu. **Sensores DHT11 e DHT22: guia básico dos sensores de umidade e temperatura**. Blog Eletrogate, 2019. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/sensores-dht11-dht22/>. Acesso em: 23 set. 2020.

OLIVEIRA, Euler. **Como usar com Arduino – Sensor de pressão e temperatura BMP180**. Master Walker Shop, 2020. Disponível em: <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-de-pressao-e-temperatura-bmp180/>. Acesso em: 17 fev. 2023.

OLIVEIRA, Sergio. **Internet das coisas: com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi**. São Paulo: Novatec, 2017.

PALMERIO, Ariovaldo Felix. **Introdução à tecnologia de foguetes**. São José dos Campos: SindCT, 2017.

THOMSEN, Adilson. **Saiba como funciona o módulo TP4056**. Maker Hero, 2022. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/saiba-como-funciona-o-modulo-tp4056/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

VIEBRANTZ, Alvaro. **Sensoriamento e controle em tempo real com Firebase e ESP8266**. Medium, 2019. Disponível em: <https://medium.com/@alvaroviebrantz/sensoriamento-realtime-com-firebase-e-esp8266-6e54b9bff1c1>. Acesso em: 23 set. 2020.

VI. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.