

RADIOSSONDA DE BAIXO CUSTO COMO AMPLIAÇÃO DA CAPACIDADE DA MARINHA DO BRASIL NO MONITORAMENTO DA ATMOSFERA

Low-cost Radiosonde as an Expansion of the
Brazilian Navy's Capacity in Atmospheric Monitoring

David Christian de Lima Ferreira¹

Resumo: Dentre as formas de se obter dados relacionados à atmosfera estão o emprego de radiossondas e de modelos numéricos. Para viabilizar experimentações atmosféricas sem grande dispêndio financeiro, desenvolveu-se uma radiossonda de baixo custo em uma parceria entre a Marinha do Brasil (MB) e o Laboratório de Monitoramento e Modelagem de Sistemas Climáticos (LAMMOC) da Universidade Federal Fluminense (UFF), para operação embarcada em *drone* e baseada em prototipagem com Arduino, tendo como sensores o DHT22 para a medição de temperatura e umidade relativa e o BMP280 para a medição de pressão atmosférica. Como resultado, observou-se que os perfis dos dados observados descreveram um comportamento da camada de superfície que indica a ocorrência de inversão térmica e mudança de regime dessa camada, do estável para o neutro e, finalmente, para o instável. Com isso, avalia-se que o método de utilização dessa radiossonda pode ser aplicado em diversos estudos atmosféricos, como poluição atmosférica, calibração de modelos numéricos e *nowcasting*, além de ter contribuído para ilustrar a deficiência de modelos atmosféricos na representação de fluxos superficiais, com a significativa vantagem operacional de apresentar baixo custo financeiro e possibilitar medições sucessivas por tempo indeterminado, diferentemente do que ocorre com radiossondas convencionais, ampliando de forma significativa e estratégica a capacidade da MB no monitoramento da atmosfera, contribuindo para a segurança da navegação e para as operações navais.

Palavras-chave: Radiossonda de Baixo Custo. Arduino. Drone. Modelo Numérico WRF.

Abstract: Among the methods for obtaining atmospheric data are radiosondes and numerical models. To enable atmospheric experiments without significant financial expenditure, a low-cost radiosonde was developed through a partnership between the Brazilian Navy (*Marinha do Brasil* – MB) and the Laboratory for Monitoring and Modeling of Climate Systems (LAMMOC) at Universidade Federal Fluminense (UFF). The system was designed for drone-borne operation and based on Arduino prototyping, using a DHT22 sensor to measure temperature and relative humidity and a BMP280 sensor to measure atmospheric pressure. As a result, the data profiles described surface layer behavior indicating the occurrence of thermal inversion and a change in the layer regime from stable to neutral and, finally, to unstable. Thus, the method using this radiosonde can be applied to various atmospheric studies, such as air pollution monitoring, numerical model calibration, and nowcasting. In addition, it contributes to illustrating the deficiency of atmospheric models in representing surface fluxes, with the significant operational advantage of being low cost and allowing successive measurements for an indefinite period, unlike conventional radiosondes. This approach thereby significantly and strategically enhances the Brazilian Navy's capability in atmospheric monitoring, contributing to navigation safety and naval operations.

Keywords: Low-cost Radiosonde. Arduino. Drone. Numerical Model WRF.

¹ Capitão-Tenente. MSc. em Engenharia de Biossistemas pela Universidade Federal Fluminense. Ajudante da Seção de Modelagem Atmosférica da Divisão de Previsão Numérica no Centro de Hidrografia da Marinha, Niterói, RJ – Brasil. E-mail: christian.lima@marinha.mil.br

1. INTRODUÇÃO

Desastres naturais são eventos extremos que causam impactos sociais e ambientais significativos (TOBIN; MONTZ, 1997). A Política Nacional de Defesa Civil (PNDEC) os define como ocorrências adversas em ecossistemas vulneráveis, provocando danos humanos, materiais e econômicos, e os classifica em naturais, humanos e mistos (BRASÍLIA, 2007). Segundo o *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015* (GAR15), os prejuízos anuais atingem US\$ 250–300 bilhões, mas investimentos em prevenção podem reduzir até 20% desses impactos (UNDRR, 2015).

Compreender os processos termodinâmicos que geram tais eventos é essencial. Nesse contexto, a coleta de perfis verticais da atmosfera por sondagens permite estudar, por exemplo, nuvens, precipitação, nevoeiro e instabilidade (GASPARETTO, 2011). Entre as possíveis regiões de estudo está a camada de superfície, localizada na porção inferior da camada limite atmosférica, com espessura de 20 a 200 metros, apresentando variações de temperatura, umidade e vento, influenciadas por fricção, condução e evaporação, enquanto fluxos turbulentos se mantêm relativamente estáveis com a altura (STULL, 2017).

Nessa perspectiva, modelos numéricos mostram-se importantes ferramentas para antecipar fenômenos atmosféricos e emitir alertas (LIRA; CATALDI, 2016). Um exemplo é o *Weather Research and Forecasting Model* (WRF), que prevê condições em diferentes níveis da atmosfera, incluindo a camada de superfície (BARCELLOS; CATALDI, 2020).

Desse modo, o presente trabalho apresenta uma radiossonda de baixo custo embarcada em drone para a geração de perfis verticais na camada de superfície, permitindo sua comparação com perfis obtidos por modelagem numérica.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi apresentar o desenvolvimento e a utilização de uma radiossonda de baixo custo embarcada em drone para gerar perfis atmosféricos verticais na camada de superfície e compará-los com perfis obtidos por modelagem numérica, evidenciando a relevância desse tipo de sensor e as limitações dos modelos em representar as variações atmosféricas.

3. METODOLOGIA

O uso de *drones* tem se mostrado promissor em diversas aplicações. Oliveira, Amorim e Dereczynski (2016) criaram uma radiossonda com Arduino Nano, sensor BMP180 e módulo RF433MHz, acoplados a um balão. Souza et al. (2022) desenvolveram uma radiossonda com Arduino Uno, sensor DHT11 e GPS para facilitar a localização pós-pouso. Ribeiro (2022) usou Arduino e o sensor MPX5100DP com tubo de Pitot em túnel de vento para sua calibração.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma radiossonda de baixo custo baseada em Arduino para a obtenção do perfil vertical da camada de superfície. Os perfis obtidos foram comparados com simulações do modelo numérico WRF, desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), em parceria com o *National Center for Environment Prediction* (NCEP), a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e o *Department of Energy* dos Estados Unidos.

Dessa forma, esta seção está dividida em duas partes: o desenvolvimento da radiossonda de baixo custo e a configuração do modelo numérico WRF.

3.1. RADIOSSONDA DE BAIXO CUSTO

O primeiro passo na implementação de uma radiossonda de baixo custo foi a escolha de uma tecnologia eletrônica programável e acessível, optando-se pela placa Arduino Uno, baseada no microcontrolador ATmega328P, devido ao seu baixo custo e à compatibilidade com diversos sensores.

Para a medição de temperatura e umidade, escolheu-se o sensor DHT22, mais preciso e econômico que o DHT11, utilizado em estudos anteriores (Sousa et al., 2022). Para a pressão atmosférica, adotou-se o BMP280, que apresenta precisão semelhante à do BMP180, porém com menor incerteza, já validado por Oliveira, Amorim e Dereczynski (2016).

Como acessórios, foram utilizados o relógio programável RTC DS3231, módulo MicroSD com cartão, bateria recarregável de 9V e uma caixa de papelão perfurada para abrigar o conjunto. A radiossonda foi transportada pelo *drone* DJI Mavic Air 2.

A montagem envolveu o uso de *proto-board* e cabos *jumper* (Figura 1), e a configuração foi realizada na Arduino IDE, com taxa de amostragem de 10 segundos, compatível com o voo controlado do *drone* a 0,1 m/s.

Nos testes, avaliou-se o impacto do fluxo descendente das hélices nas medições. Inicialmente, o sensor MPX5100DP identificou interferência, mas um anemômetro Akrom KR835 foi utilizado para determinar a distância ideal entre o sensor e as hélices, de modo a mitigar esse efeito.

O custo total do sistema foi de US\$ 193,33 (sem *drone*) e de US\$ 2.076,83 (com *drone*), inferior aos US\$ 4.080,48 gastos em radiossondas convencionais para os quatro lançamentos sinóticos diários, cujos equipamentos não são reutilizáveis. Embora radiossondas tradicionais alcancem até o topo da troposfera, *drones* mais robustos podem permitir o estudo de outras camadas atmosféricas.

O experimento foi realizado em Itaipu, Niterói (Rio de Janeiro – RJ), até 120 metros de altitude, conforme a regulamentação da Agência Nacional de Aviação Civil (BRASÍLIA, 2021). A Tabela 1 resume as atividades de campo, incluindo o dia da experimentação atmosférica (Figura 2).

3.2. MODELO NUMÉRICO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING

A experimentação atmosférica ocorreu em 14 de março de 2023, com dados gerados pelo modelo numérico WRF, instalado no Laboratório de Monitoramento e Modelagem de Sistemas Climáticos (LAMMOC). Os dados cobriram o período de 00h00 GMT às 96 horas subsequentes. O domínio analisado abrangeu a área entre 22,50°S e 23,13°S de latitude, e entre 42,72°W e 43,34°W de longitude (Figura 3).

A simulação gerou dados para diversas variáveis em 34 níveis verticais. Para este estudo, foram utilizados dados

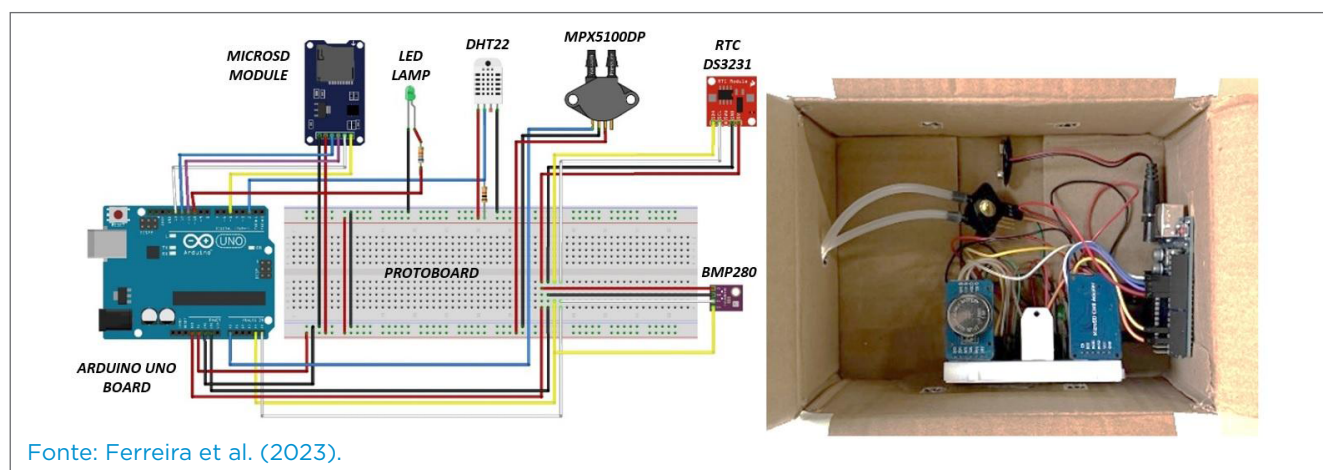
de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica nos cinco níveis mais próximos da superfície, entre 1015 hPa e 995 hPa, para comparação com os dados observados. Níveis superiores foram desconsiderados por excederem o alcance da radiossonda.

O modelo WRF foi configurado com grade horizontal de 64 x 70 pontos (4.480 pontos), com espaçamento de 1 km. Dados do Global Forecast System (GFS) forneceram as condições iniciais e de contorno a cada 6 horas. As parametrizações

Tabela 1. Resumo das atividades em campo.

Atividade realizada	Data da realização
Primeiro uso do perfilador (pendulando com cabo de poliamida fino)	22/08/2022
Segundo uso do perfilador (junto ao drone)	05/09/2022
Estudo da influência das hélices do drone (sem uso de perfilador)	18/01/2023
Terceiro uso do perfilador (pendulando com cabo de poliamida grosso)	14/02/2023
Quarto uso do perfilador (pendulando após adaptação do cabo de poliamida grosso)	06/03/2023
Quinto uso do perfilador (experimento em sua versão final)	14/03/2023

Fonte: autor.



Fonte: Ferreira et al. (2023).

Figura 1. Diagrama de conexões da radiossonda de baixo custo (esquerda) e vista superior da caixa da radiossonda de baixo custo aberta (direita).



Fonte: Ferreira et al. (2023).

Figura 2. Radiossonda de baixo custo em operação em Itaipu, Rio de Janeiro, em 14 de março de 2023.

físicas seguiram configurações utilizadas em outras simulações do LAMMOC, visando testar a eficácia do modelo na camada de superfície.

Mais detalhes da configuração estão apresentados na Tabela 2, conforme descrito na Página de Usuário do WRF, do NCAR (WRF USERS PAGE, 2025).

Os dados ambientais do WRF para 14 de março de 2023 foram pós-processados com o pacote WRF-Python, utilizado para diagnóstico e interpolação. Para isso, foi criado um ambiente integrado no *Windows* com *Anaconda*, que inclui o *Anaconda Navigator*, uma interface gráfica para gerenciamento de pacotes e inicialização de aplicações. Dentre as opções, foi escolhido o *JupyterLab*, interface *web* flexível derivada do *Jupyter Notebook*.

4. RESULTADOS

Os resultados deste trabalho estão divididos entre o tratamento da influência das hélices do *drone* e a comparação desses perfis com as simulações do WRF.



Fonte: Ferreira et al. (2023).

Figura 3. Área de abrangência do domínio de interesse (retângulo amarelo) da rodada de 14 de março de 2023 do modelo numérico WRF, instalado no LAMMOC, com destaque para o local da experimentação atmosférica (retângulo vermelho).

4.1. TRATAMENTO DA INFLUÊNCIA DAS HÉLICES DO DRONE

A medição do fluxo de ar descendente das hélices pelo MPX5100DP evidenciou a necessidade de tratar essa influência. O *drone* DJI Mavic Air 2 teve sua velocidade de fluxo medida em várias distâncias por meio do anemômetro Akrom KR835 (Figura 4), fornecendo dados para a definição da distância ideal entre a radiossonda e o *drone*.

Observou-se que a velocidade do fluxo de ar diminuía com o aumento da distância até o anemômetro, tornando-se quase nula próximo de 3 metros. Inicialmente, utilizou-se um cabo de tração para manter 3 metros entre a radiossonda e o

Tabela 2. Modelo Numérico WRF – Configuração e parâmetros.

time_control	
start (year/month/day/hour/minute/second)	2023/03/14 00:00:00
end (year/month/day/hour/minute/second)	2023/03/18 00:00:00
interval_seconds	21600
domains	
e_we	64
e_sn	70
e_vert	35
dx	1000
dy	1000
physics	
mp_physics	WRF Single-moment 3-class
ra_lw_physics	RRTM Longwave Scheme
ra_sw_physics	Dudhia Shortwave Scheme
sf_sfclay_physics	Revised MM5 Scheme
sf_surface_physics	Unified Noah Land Surface Model
bl_pbl_physics	Yonsei University Scheme (YSU)

Fonte: Ferreira et al. (2023).

drone, porém o movimento pendular da radiossonda comprometia a segurança do voo. Esse problema foi solucionado com a redução da distância para 2,5 metros, equilibrando a baixa interferência das hélices e a segurança operacional.

No experimento realizado em Itaipu, em 14 de março de 2023, a radiossonda permaneceu estável durante toda a operação, sem oscilações que afetassem o voo.

4.2. COMPARAÇÃO ENTRE PERFIS DE CAMADA DE SUPERFÍCIE OBSERVADOS E SIMULADOS

A Figura 5 compara os perfis verticais de temperatura observados e modelados. Ambos apresentam aumento ao longo do tempo, com temperaturas observadas entre 27,6 e 30,1°C, e modeladas entre 24,8 e 26,4°C no nível mais baixo, com diferença máxima de 3,7°C.

A inversão térmica e a mudança de regime da camada de superfície foram detectadas apenas nos dados observados, uma vez que o modelo não apresentou resolução suficiente para tal.

Esse fato destaca a importância do experimento, que pode ser realizado diariamente para melhorar as condições iniciais e a representação da camada de superfície em modelos numéricos por meio da assimilação de dados. Tal procedimento apresenta baixo custo, uma vez que o equipamento é reutilizável, exigindo apenas a recarga das baterias.

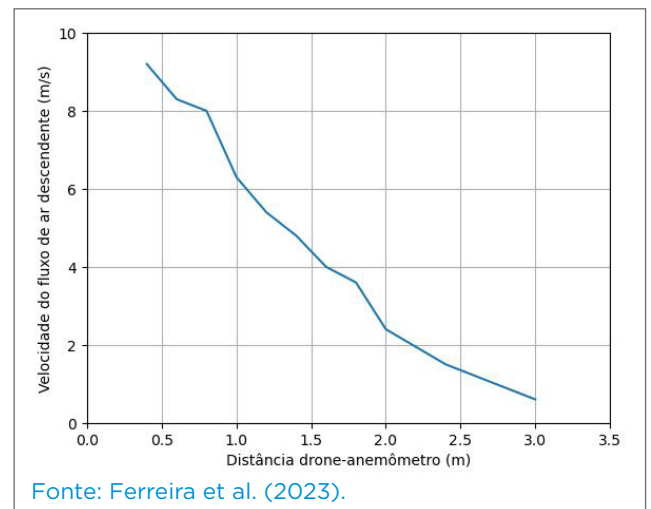


Figura 4. Medição da velocidade do ar descendente das hélices do *drone* DJI Mavic Air 2 em função da distância até o anemômetro Akrom KR835 (18 de janeiro de 2023).

A Figura 6 mostra que a umidade relativa observada aumenta e, posteriormente, diminui, enquanto a modelada decresce continuamente.

No intervalo comparável, a umidade simulada pelo WRF foi maior que a observada, possivelmente em razão da subestimação da temperatura, afetando o cálculo da umidade. O modelo também carece de resolução vertical para captar variações finas do perfil termodinâmico.

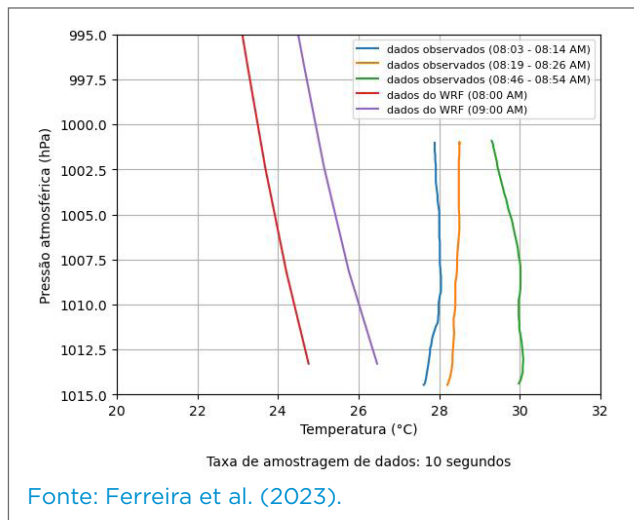


Figura 5. Comparação entre perfis verticais de temperatura observados e modelados pelo *Weather Research and Forecasting Model* para Itaipu em 14 de março de 2023.

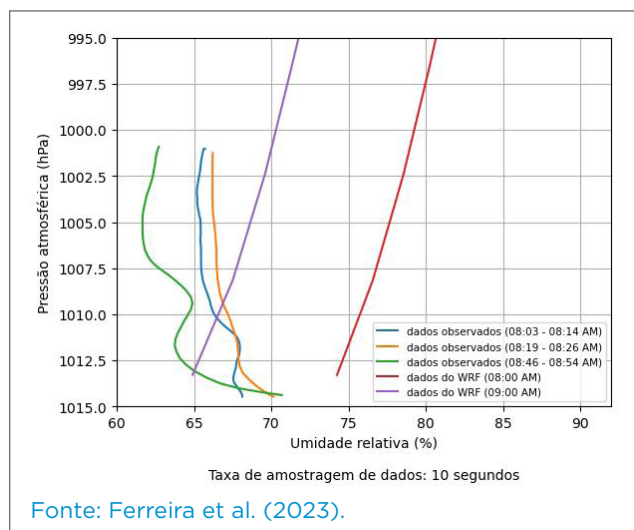


Figura 6. Comparação entre perfis verticais de umidade relativa observados e modelados pelo WRF para Itaipu em 14 de março de 2023.

Na comparação dos perfis de altura em função da pressão entre dados observados e modelados (Figura 7), os perfis são semelhantes, mas apresentam um descompasso de 1,6 a 1,8 hPa. Essa diferença deve-se, provavelmente, à variação na densidade atmosférica, uma vez que a temperatura simulada pelo WRF próxima à superfície foi cerca de 4°C menor que a observada no mesmo nível.

Este trabalho expandiu os resultados de Ribeiro (2022), obtendo também dados de temperatura, umidade e pressão de forma eficiente e econômica. A adaptação do tubo Pitot com o sensor MPX5100DP confirmou que as hélices dos *drones* influenciam a coleta de dados atmosféricos.

Os resultados anteriores de Cataldi et al. (2022) demonstraram a viabilidade dos sensores DHT22 e BMP280 com Arduino Uno. Por sua vez, este estudo confirmou essa viabilidade e gerou perfis verticais analisados em conjunto com modelos numéricos, concluindo que a radiossonda de baixo custo melhora a representação dos fenômenos na baixa troposfera.

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento da radiossonda com sensores de baixo custo permitiu identificar mudanças na camada de superfície, do comportamento estável ao instável, mostrando sua aplicabilidade

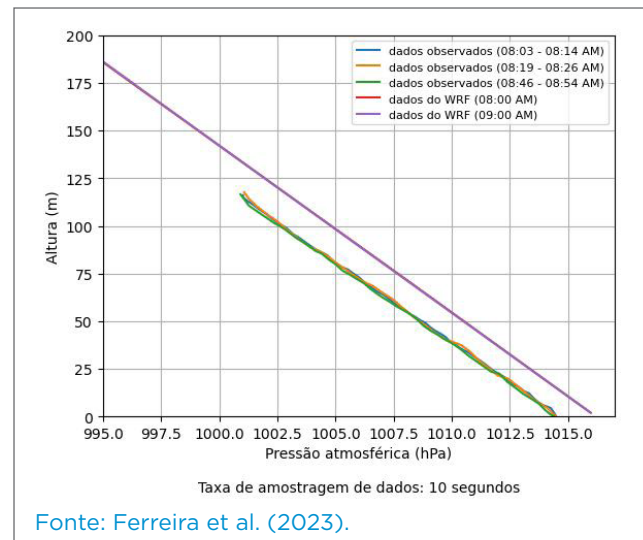


Figura 7. Comparação entre perfis de altura em função da pressão atmosférica observados e modelados pelo *Weather Research and Forecasting Model* para Itaipu em 14 de março de 2023.

em estudos atmosféricos como poluição, calibração de modelos e *nowcasting*. O uso de *drones* para transporte oferece baixo custo e possibilita medições contínuas, diferentemente dos dispendiosos lançamentos de radiossondas por balão, especialmente para a camada de superfície, foco deste estudo.

O trabalho cumpriu o objetivo de criar uma metodologia replicável para medir o perfil vertical da atmosfera, inicialmente

na camada de superfície, com potencial para alturas maiores, além de destacar deficiências dos modelos na representação dos fluxos superficiais, impactando previsões do tempo e ampliando, de forma significativa e estratégica, a capacidade da Marinha do Brasil no monitoramento contínuo e detalhado da atmosfera, contribuindo para a segurança da navegação e para as operações navais como um todo.

REFERÊNCIAS

- BARCELLOS, P. C. L.; CATALDI, M. Flash Flood and Extreme Rainfall Forecast through One-Way Coupling of WRF-SMAP Models: Natural Hazards in Rio de Janeiro state. *Atmosphere*, v. 11, n. 8, p. 834, 2020. <https://doi.org/10.3390/atmos11080834>
- BRASÍLIA, Ministério da Infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial, Nº 94, emenda Nº 2*. 2021. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94>. Acesso em: 13 fev. 2023.
- BRASÍLIA, Ministério da Integração Nacional. *Política Nacional de Defesa Civil*. 2007. Disponível em: <http://www.defesacivil.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 11 fev. 2023.
- CATALDI, M.; SALCEDO, I. L.; FERREIRA, D. C. L.; SIMÕES, D. P. Atmospheric experimentation with low-cost radiosonde attached to a drone. In: *VIII Workshop on Biosystems Engineering*, Niterói, 2022. Disponível em: [https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/27951/Anais%20WEB_VIII_2023-02-20_B.pdf?s](https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/27951/Anais%20WEB_VIII_2023-02-20_B.pdf?squence=1&isAllowed=y)
- equence=1&isAllowed=y. Acesso em: 14 fev. 2023.
- FERREIRA, D. C. L. et al. Measurement of Vertical Profiles of the Atmospheric Surface Layer with Low-Cost Instrumentation on Board a Drone. *Global Journal of Human-Social Science*, v. 23, n. B5, p. 51-63, 2023. <https://doi.org/10.34257/GJHSSBVOL23IS5PG51>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- GASPARETTO, P. *Relações entre a altura média da camada limite planetária e as condições de instabilidade atmosférica na região metropolitana de Fortaleza – Ceará*. 2011. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2011.
- LIRA, C. B. M.; CATALDI, M. Avaliação do ensemble de parametrizações físicas do modelo MM5 no evento de precipitação intensa ocorrido entre os dias 05 e 06 de abril de 2010 no município do Rio de Janeiro. *Ciência e Natura*, v. 38, n. 1, p. 341-353, 2016. <https://doi.org/10.5902/2179460X17116>
- OLIVEIRA, F. P.; AMORIM, H. S.; DEREZYNSKI, C. P. *Montagem de uma radiossonda de baixo custo*. 2016. 30 f. Material instrucional (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: http://pef.if.ufrj.br/producao_academica/dissertacoes/2016_Fabiano_Oliveira/material_instrucional_Fabiano_Oliveira.pdf. Acesso em: 15 ago. 2022.
- RIBEIRO, F. F. *Desenvolvimento de sensor embarcado para medição de velocidade do vento*. 2022. 111 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022.
- SOUSA, P. A. et al. Lançamento de uma sonda atmosférica de baixo custo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. v. 44, 2022. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0238>
- STULL, R. B. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*, Versão 1.02b. Vancouver: University of British Columbia, 2017.
- TOBIN G. A, MONTZ B. E. *Natural hazards: explanation and integration*. New York: The Guilford Press, 1997.
- UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015*. UNDRR, 2015. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2015>
- WRF Users Page. *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, 2025. Disponível em: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_references.html. Acesso em: 21 mai. 2025.