



**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIODISSISTEMAS**

DAVID CHRISTIAN DE LIMA FERREIRA

**ELABORAÇÃO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÕES DO PERFIL
VERTICAL ATMOSFÉRICO NA CAMADA DE SUPERFÍCIE
COM O USO DE INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO
EMBARCADA EM DRONE**

Niterói-RJ

2023

DAVID CHRISTIAN DE LIMA FERREIRA

**ELABORAÇÃO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÕES DO PERFIL
VERTICAL ATMOSFÉRICO NA CAMADA DE SUPERFÍCIE
COM O USO DE INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO
EMBARCADA EM DRONE**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Biosistemas da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Biosistemas. Área de concentração Recursos Naturais e Ambiente. Linha de Pesquisa: Gerenciamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Cataldi
Coorientador: Prof. Dr. Ivanovich Lache Salcedo
Orientadora Técnica: Dra. Flávia Rodrigues Pinheiro

Niterói, RJ

2023

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F383e Ferreira, David Christian de Lima
Elaboração de um sistema para medições do perfil vertical atmosférico na camada de superfície com o uso de instrumentação de baixo custo embarcada em drone / David Christian de Lima Ferreira. - 2023.
155 f.: il.

Orientador: Márcio Cataldi.
Coorientador: Ivanovich Lache Salcedo; Flávia Rodrigues Pinheiro.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2023.

1. Meteorologia. 2. Prototipagem. 3. Arduino (Controlador programável). 4. Drone. 5. Produção intelectual. I. Cataldi, Márcio, orientador. II. Salcedo, Ivanovich Lache, coorientador. III. Pinheiro, Flávia Rodrigues, coorientadora. IV. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia.V. Título.

CDD - XXX



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIODIVERSIDADE

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos vinte e oito dias do mês de abril de dois mil e vinte e três, às 09:30, via conferência remota, reuniu-se a Banca Examinadora designada na forma regimental pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biosistemas, para julgar a Dissertação de Mestrado intitulada “**Elaboração de um sistema para medições do perfil vertical atmosférico na camada de superfície com o uso de instrumentação de baixo custo embarcada em drone**”, apresentada pelo aluno **David Christian de Lima Ferreira**, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Biosistemas, área de concentração Recursos Naturais e Ambiente, na linha de pesquisa Gerenciamento Ambiental. Aberta a sessão pública, o candidato expôs o trabalho e, em seguida, foi arguido oralmente pelos membros da Banca, que após deliberação, decidiu pela:

Aprovação

Reprovação

Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-Graduação desta Universidade foi lavrada a presente ata, lida, julgada, aprovada e assinada pelos membros da Banca Examinadora, pelo candidato e pela Coordenadora do Programa, em ciência do evento.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Cataldi - Orientador
UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Ivanovich Lache Salcedo - Coorientador
UFF – Universidade Federal Fluminense

Dr.ª Flávia Rodrigues Pinheiro – Orientadora Técnica
MB – Marinha do Brasil / Centro de Hidrografia da Marinha
CPF: 053.015.457-95

Prof. Dr. Carlos Rodrigues Pereira
UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Luiz Claudio Gomes Pimentel
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro
CPF: 979.809.197-34

Candidato:

David Christian de Lima Ferreira

Coordenadora do PGEB:



Documento assinado digitalmente

THELMA DE BARROS MACHADO

Data: 14/10/2023 17:51:12-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.ª Thelma de Barros Machado, D.Sc., Universidade Federal Fluminense

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biosistemas – Escola de Engenharia

Telefone: (021)2629-5362 email: pgeb@vm.uff.br

Sítio eletrônico: www.pgeb.uff.br

Dedico este trabalho à minha esposa Denise Santos Linhares Ferreira pelo apoio prestado no transcorrer deste curso, assim como por me apoiar em todas as áreas da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que conhece e orienta todas as coisas.

À Universidade Federal Fluminense, por fornecer e manter, há tanto tempo, um ambiente profícuo e sadio em prol da erudição e da ciência.

À Marinha do Brasil, pela confiança creditada a mim na condução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Márcio Cataldi, por mostrar-se muito zeloso e dedicado às lides da docência, sempre abundante em paciência e capacidade didática.

Ao Dr. Ivanovich Lache Salcedo, por toda empolgação demonstrada, que se reverteu em orientações fundamentais para este projeto.

À Capitã de Corveta Flávia Rodrigues Pinheiro, por seus valiosos conselhos ao longo deste trabalho.

Ao Capitão de Corveta Alexandre Augusto Lopes Gadelha, por sua constante predisposição em ajudar.

À Dra. Priscila da Cunha Luz Barcellos, por seu apoio irrestrito e bem-disposto em momentos de grande necessidade.

Ao Prof. Dr. Carlos Rodrigues Pereira, pelas inúmeras vezes em que atendeu às minhas mais variadas demandas, sempre com inigualável boa vontade.

Ao Prof. Dr. Flávio Castro da Silva, pelo apoio na preparação dos drones para voo.

Ao amigo Fellipe Fialho Ribeiro, que prestou grande apoio técnico no tocante à prototipagem de baixo custo.

Aos amigos Daniel Peçanha Simões, Márcio Vinicius Aguiar Soares e Gabriel Ferreira Subtil de Almeida, pela valiosa ajuda prestada nas operações de voo com drone e pela empolgação demonstrada com este projeto.

À Me. Priscila Esposte Coutinho pelo apoio na gestão de materiais junto ao Laboratório de Monitoramento e Modelagem Numérica de Sistemas Climáticos.

Aos tão queridos colegas de curso, sem os quais tudo seria mais difícil.

"A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso". – John Ruskin

RESUMO

Desastres naturais de ordem atmosférica podem ter seus danos atenuados se alertas meteorológicos forem disseminados em tempo hábil e se representarem tais fenômenos de forma precisa e acurada. Dentre as possíveis formas de se obter dados relacionados às condições do tempo estão o emprego de perfiladores atmosféricos e de modelos numéricos, dentre os quais está modelo Weather Research and Forecasting (WRF). Tais recursos podem ser utilizados, dentre outras aplicações possíveis, para estudos relacionados à camada de superfície, a qual sofre variações substanciais em seus valores de temperatura, umidade e vento em função da altura devido ao arrasto por fricção, à condução de calor e à evaporação próxima à superfície terrestre, de modo que essa camada da baixa troposfera desempenha um papel importante em diversas relações humanas. A fim de viabilizar experimentações atmosféricas, sem a necessidade de grande dispêndio financeiro, foi desenvolvido junto ao Laboratório de Monitoramento e Modelagem Numérica de Sistemas Climáticos (LAMMOC) da Universidade Federal Fluminense (UFF) um perfilador atmosférico de baixo custo para ser embarcado em um drone e baseado em prototipagem com Arduino, o qual teve como sensores o DHT22 para medição de temperatura e umidade relativa, o BMP280 para medição da pressão atmosférica, e o MPX5100DP para tratamento da influência do ar descendente das hélices do drone nas medições. Assim, esse perfilador foi utilizado numa experimentação, a partir da qual foram gerados perfis verticais atmosféricos. Também se utilizou o modelo WRF associado ao pacote de rotinas WRF-Python na geração de perfis das variáveis atmosféricas para análise comparativa com os dados observados. Como resultado, notou-se que os perfis de dados observados descreveram um comportamento da camada de superfície que indica a ocorrência de inversão térmica e de mudança de regime dessa camada. Com isso, avalia-se que a metodologia do uso desse perfilador pode ser aplicada em diversos estudos atmosféricos, tais como poluição atmosférica e previsão imediata do tempo (nowcasting), assim como seu potencial para proveito em áreas como meteorologia operacional e assimilação de dados de modelos numéricos se mostra promissor.

Palavras-chave: Desastres Naturais. Camada de superfície. Instrumentação de baixo custo em Arduino. Drone. Modelo numérico Weather Research and Forecasting. WRF. WRF-Python.

ABSTRACT

Atmospheric natural disasters can have their damage mitigated if meteorological alerts are disseminated in a timely manner and if such phenomena are precisely and accurately represented. Among the possible ways to obtain data related to weather conditions are the use of atmospheric profilers and numerical models, among which is the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Such resources can be used, among other possible applications, for studies related to the surface layer, which is subjected to substantial variations in its temperature, humidity, and wind values as a function of height due to frictional drag, heat conduction and evaporation near to the surface, so this layer of the lower troposphere plays an important role in many human relationships. In order to make atmospheric experiments achievable, without the need for large financial outlays, a low-cost atmospheric profiler was developed together with the Laboratory for Monitoring and Numerical Modeling of Climate Systems (LAMMOC) at the Fluminense Federal University (UFF) to be aboard a drone and based on prototyping with Arduino, which had as sensors the DHT22 for measuring temperature and relative humidity, the BMP280 for measuring atmospheric pressure, and the MPX5100DP for treating the influence of the descending air of the drone's propellers on the measurements. Thus, this profiler was used in an experiment, from which atmospheric vertical profiles were generated. The WRF model associated with the WRF-Python routines package was also used to generate profiles of atmospheric variables for comparative analysis with the observed data. As a result, it was noticed that the observed data profiles described a behavior of the surface layer that indicates the occurrence of thermal inversion and change of regime of this layer. Therefore, it is evaluated that the methodology of using this profiler can be applied in several atmospheric studies, such as atmospheric pollution and nowcasting weather forecast, as well as its potential for use in areas such as operational meteorology and assimilation of data from numerical models shows to be promising.

Keywords: Natural disasters. Surface layer. Low-cost instrumentation in Arduino. Drone. Numerical model Weather Research and Forecasting. WRF. WRF-Python.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Destruição causada pelo furacão Catarina, 2004.	27
Figura 2: Coordenada vertical utilizada no modelo WRF-ARW.	31
Figura 3: Grades horizontais e verticais do WRF-ARW.	31
Figura 4: Aninhamento de grades permitidos no WRF: (a) grades telescópicas e (b) grades menores em um mesmo nível em relação a grade “mãe”.	32
Figura 5: Fluxo de etapas de processamento de dados do modelo numérico <i>Weather Research and Forecasting</i> (WRF).	34
Figura 6: Exemplos de produtos de plotagem gráfica gerados por WRF-Python.	35
Figura 7: Diagrama esquemático da troposfera terrestre.	36
Figura 8: Exemplos de perfis de temperatura da camada limite planetária durante (a) dia e (b) noite. A linha verde tracejada mostra a taxa de lapso adiabático.	37
Figura 9: Balanço de energia e calor na superfície terrestre.	37
Figura 10: Camada limite atmosférica com camada de superfície representada próxima ao solo.	38
Figura 11: Exemplos de perfis de temperatura da camada de superfície durante (a) dia e (b) noite. A linha verde tracejada mostra a taxa de lapso adiabático.	38
Figura 12: Processos relevantes para o perfil do vento na camada de superfície dominada por turbulência mecânica (convecção forçada; estabilidade neutra).	39
Figura 13: Processos relevantes para o perfil do vento na camada de superfície durante a turbulência convectiva (convecção livre; estaticamente instável).	40
Figura 14: Radiossonda DFM-09 (Graw) em voo.	41
Figura 15: Radiossonda desenvolvida com placa Arduino Nano.	42
Figura 16: Radiossonda desenvolvida com placa Arduino Uno.	43

Figura 17: Experimento envolvendo Placa Arduino Uno e sensor de pressão diferencial MPX5100DP.	43
Figura 18: Drone experimental utilizado para transporte de instrumento sensor.....	44
Figura 19: Drone experimental com componentes Arduino embarcados.	45
Figura 20: Drone de modelo Matrice 600 Pro, da marca DJI, utilizado para transporte de instrumento sensor.....	45
Figura 21: Precipitação acumulada (mm) em 3h para 12/01/2011 às 00Z utilizando parametrizações de camada de superfície MM5 (esquerda) e MM5 old (direita).....	47
Figura 22: Trajetórias simuladas do Furacão Irma (em azul, verde, rosa e roxo) x trajetória real (em preto).	47
Figura 23: Placa para prototipagem Arduino Uno.....	49
Figura 24: Sensor DHT22, utilizado para a medição de temperatura e umidade relativa do ar.	50
Figura 25: Sensor BMP280, utilizado para a medição de pressão atmosférica e cálculo da altura em função da pressão medida.....	51
Figura 26: Sensor MPX5100DP, utilizado para a medição de pressão diferencial e cálculo da velocidade do vento em função da pressão medida.....	51
Figura 27: Tubo de Pitot associado ao sensor MPX5100DP, utilizado exposto ao vento gerado pelo drone.	52
Figura 28: Diagrama de funcionamento de um tubo de Pitot.....	52
Figura 29: Pequenos tubos de silicone, utilizados para conectar o tubo de Pitot ao sensor MPX5100DP.	53
Figura 30: Relógio programável RTC DS3231 utilizado para sincronia de medições e registro do tempo em horas, minutos e segundos.	53
Figura 31: Módulo de cartão MicroSD utilizado para gravação de dados.	54

Figura 32: Carregador portátil do tipo <i>power bank</i> , modelo CB077, da marca Multilaser.....	55
Figura 33: Bateria recarregável de 9V, da marca Elgin.	55
Figura 34: Caixa retangular de papelão maior com furos nas laterais.....	55
Figura 35: Caixa retangular de papelão menor com furos nas laterais.....	56
Figura 36: Drone Phantom 3 Standard da marca DJI.	56
Figura 37: Drone Mavic Air 2 da marca DJI.....	57
Figura 38: Vista superior da caixa maior do perfilador atmosférico de baixo custo aberta.	59
Figura 39: Vista superior da caixa menor do perfilador atmosférico de baixo custo aberta. ...	59
Figura 40: Diagrama de conexões do perfilador atmosférico de baixo custo gerado no <i>software</i> Fritzing versão 0.9.3. Na parte superior, da esquerda para a direita: modulo de cartão MicroSD, lâmpada de LED verde, DHT22, MPX5100DP e RTC DS3231. Na parte inferior, da esquerda para a direita: placa Arduino Uno, matriz de contato (<i>Protoboard</i>) e BMP280.	60
Figura 41: Lógica de script importado para placa Arduino Uno.	61
Figura 42: Trecho de script no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE.....	61
Figura 43: Curva de calibração do sensor MPX5100DP.....	62
Figura 44: Anemômetro Akrom KR835.....	65
Figura 45: Anemômetro ultrassônico PRSens.....	66
Figura 46: Área de abrangência do terceiro domínio da rodada de 14 de março de 2023 do modelo numérico <i>Weather Research and Forecasting</i> (WRF) do Laboratório de Monitoramento e Modelagem Numérica de Sistemas Climáticos (LAMMOC), com destaque para o local da experimentação atmosférica (em vermelho).	69
Figura 47: Trecho do arquivo "namelist.input" utilizado para configuração do modelo numérico <i>Weather Research and Forecasting</i>	70
Figura 48: Trecho do arquivo "namelist.wps" utilizado para configuração do modelo numérico <i>Weather Research and Forecasting</i>	70

Figura 49: Trecho da interface de usuário JupyterLab com comandos de instalação de bibliotecas Numpy, Matplotlib e NetCDF4.....	71
Figura 50: Trecho da interface de usuário JupyterLab com comando de instalação do pacote de rotinas de programação WRF-Python.	71
Figura 51: Trecho da interface de usuário JupyterLab com comando "getvar" para geração de variáveis com parâmetros atmosféricos para o ponto de grade de interesse.	72
Figura 52: Trecho da interface de usuário JupyterLab com comandos de plotagem da biblioteca gráfica Matplotlib.	73
Figura 53: Lançamento do perfilador atmosférico de baixo custo no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 22 de agosto de 2022.	75
Figura 54: Perfilador atmosférico de baixo custo em operação com comportamento pendular no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 22 de agosto de 2022.	75
Figura 55: Dados gravados por perfilador atmosférico de baixo custo em 22 de agosto com interrupção súbita.	76
Figura 56: Lançamento do perfilador atmosférico de baixo custo no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 5 de setembro de 2022.	77
Figura 57: Ar descendente das hélices do drone Phantom 3 Standard medido por sensor MPX5100DP (embarcado) no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 5 de setembro de 2022 (taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	78
Figura 58: Medição da velocidade do ar descendente das hélices dos drones DJI Mavic Air 2 e DJI Phantom 3 Standard em função da distância para o anemômetro Akrom KR835 realizada no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 18/01/2023.	79
Figura 59: Protótipo de cabo de tração de fio de poliamida grosso com padrão espiralado.	80

Figura 60: Perfilador atmosférico de baixo custo em operação no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 14 de fevereiro de 2023.	81
Figura 61: Drone Mavic Air 2 com seu dispositivo de acoplamento do cabo de tração.	82
Figura 62: Drone Phantom 3 Standard com seu dispositivo de acoplamento do cabo de tração.	82
Figura 63: Cabo de tração do perfilador atmosférico de baixo custo elaborado com fio de poliamida grosso, mosquetão de trava e olhal e fita isolante.	82
Figura 64: Teste de estabilidade em voo com drone Mavic Air 2 no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 6 de março de 2023.	83
Figura 65: Teste de estabilidade em voo com drone Phantom 3 Standard no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 6 de março de 2023.	83
Figura 66: Perfilador atmosférico de baixo custo em operação em Itaipu no dia 14 de março de 2023.	85
Figura 67: Tela de controle do drone Mavic Air 2 registrando imagem aérea do local de voo e indicando altura de 120.	85
Figura 68: Drone Phantom 3 Standard em teste de carga do anemômetro ultrassônico PRSens apresentando movimento oscilatório.	86
Figura 69: Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Phantom 3 Standard com movimento ascendente no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 5 de setembro de 2022 (taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	88
Figura 70: Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Phantom 3 Standard com movimento ascendente no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 5 de setembro de 2022 (taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	89
Figura 71: Altura em função da pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Phantom 3 Standard com movimento ascendente no campus Praia Vermelha da	

Universidade Federal Fluminense em 5 de setembro de 2022 (taxa de amostragem da dados: 10 segundos).....	90
Figura 72: Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (primeiro perfil – das 08:03 às 08:14 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	92
Figura 73: Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (segundo perfil – das 08:19 às 08:26 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	92
Figura 74: Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (terceiro perfil – das 08:46 às 08:54 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	93
Figura 75: Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (primeiro perfil – das 08:03 às 08:14 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	94
Figura 76: Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (segundo perfil – das 08:19 às 08:26 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	94
Figura 77: Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (terceiro perfil – das 08:46 às 08:54 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	95
Figura 78: Pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (primeiro perfil – das 08:03 às 08:14 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	96

Figura 79: Pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (segundo perfil – das 08:19 às 08:26 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	96
Figura 80: Pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (terceiro perfil – das 08:46 às 08:54 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).	97
Figura 81: Perfil vertical de temperatura para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 08:00 AM de 14 de março de 2023.	98
Figura 82: Perfil vertical de temperatura para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 09:00 AM de 14 de março de 2023.	99
Figura 83: Perfil vertical de umidade relativa para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 08:00 AM de 14 de março de 2023.	99
Figura 84: Perfil vertical de umidade relativa para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 09:00 AM de 14 de março de 2023.	100
Figura 85: Perfil de altura em função da pressão atmosférica para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 08:00 AM de 14 de março de 2023.....	101
Figura 86: Perfil de altura em função da pressão atmosférica para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 09:00 AM de 14 de março de 2023.....	101
Figura 87: Comparativo entre perfis verticais de temperatura gerados por dados observados e por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu em 14 de março de 2023.	102
Figura 88: Comparativo entre perfis verticais de umidade relativa gerados por dados observados e por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu em 14 de março de 2023.	103
Figura 89: Comparativo entre perfis de altura em função da pressão atmosférica gerados por dados observados e por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu em 14 de março de 2023.	104

Figura 90: Certidão de cadastro do drone DJI Mavic Air 2 junto à Agência Nacional de Aviação Civil.....	147
Figura 91: Certidão de cadastro do drone DJI Phantom 3 Standard junto à Agência Nacional de Aviação Civil.....	148
Figura 92: Autorização de acesso ao espaço aéreo emitida via Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas.	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrições técnicas do sensor de temperatura e umidade relativa do ar DHT22.....	50
Tabela 2: Descrições técnicas do sensor de pressão atmosférica BMP280, também utilizado para o cálculo da altura em função da pressão medida.....	51
Tabela 3: Descrições técnicas do sensor MPX5100DP, utilizado para a medição de pressão diferencial e cálculo da velocidade do vento em função da pressão medida.	52
Tabela 4: Descrições técnicas do relógio programável RTC DS3231 utilizado para sincronia de medições e registro do tempo em horas, minutos e segundos.	54
Tabela 5: Descrições técnicas do módulo de cartão MicroSD utilizado para gravação de dados.	54
Tabela 6: Descrições técnicas do drone DJI Phantom 3 Standard.	57
Tabela 7: Descrições técnicas do drone DJI Mavic Air 2.	57
Tabela 8: Comparativo entre perfilador atmosférico de baixo custo deste projeto e instrumentos de uso comercial.	63
Tabela 9: Descrições técnicas do anemômetro Akrom KR835.....	65
Tabela 10: Descrições técnicas do anemômetro ultrassônico PRSens.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS

AFWA	<i>Air Force Weather Agency</i>
AM	<i>Ante Meridiem</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ARO	Avaliação de Risco Operacional
ARP	Aeronave remotamente pilotada
ARW	<i>Advanced Research WRF</i>
BRT	<i>Brasilia Time</i>
CAPE	<i>Convective Available Potencial Energy</i>
CIN	<i>Convective Inhibition Energy</i>
CLA	Camada limite atmosférica
FAB	Força Aérea Brasileira
FORTTRAN	<i>Formula Translation System</i>
FSL	<i>Forecast Systems Laboratory</i>
GAR	<i>Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction</i>
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System</i>
GLONASS	<i>Global Navigational Satellite System</i>
GMT	<i>Greenwich Mean Time</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
ICSP	<i>In-Circuit Serial Programming</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LAMMOC	Laboratório de Monitoramento e Modelagem Numérica de Sistemas Climáticos
LED	<i>Light emitter diode</i>
LI	<i>Lifted Index</i>
MicroSD	<i>Micro Secure Digital</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>

NetCDF	<i>Network Common Data Form</i>
NMM	<i>Nonhydrostatic Mesoscale Model</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PM	<i>Post Meridiem</i>
PNDEC	Política Nacional de Defesa Civil
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RK3	Runge-Kutta de terceira ordem
RPA	<i>Remotely-Piloted Aircraft</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SARPAS	Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TSM	Temperatura da superfície do mar
TT	<i>Total-Totals</i>
UCAR	<i>University Corporation for Atmospheric Research</i>
UFF	Universidade Federal Fluminense
UNISDR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VANT	Veículo aéreo não-tripulado
WPS	<i>WRF Preprocessing System</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
WWW	<i>World Wide Web</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
%	Por cento
Δx	Varição da coordenada cartesiana (abscissa)
Δy	Varição da coordenada cartesiana (ordenada)
η	Pressão hidrostática
hPa	Hectopascal
m	Metro
p_h	Pressão em cada nível
p_s	Pressão à superfície
p_{top}	Pressão no topo da atmosfera
s	Segundo
θ	Variável termodinâmica
u	Componente zonal da velocidade do vento
US\$	Dólares dos Estados Unidos da América
v	Componente meridional da velocidade do vento
w	Componente vertical da velocidade do vento
x	Coordenada cartesiana (abscissa)
y	Coordenada cartesiana (ordenada)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivos	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1 Desastres Naturais	26
2.2 Plataforma de prototipagem Arduino e sensores de parâmetros atmosféricos.....	28
2.3 Modelo numérico Weather Research and Forecasting e WRF-Python	29
2.4 Camada limite atmosférica e camada de superfície	35
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	41
3.1 Experimentos atmosféricos com instrumentação de baixo custo.....	41
3.2 Aplicações do modelo numérico Weather Research and Forecasting	46
4 MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1 Perfilador atmosférico de baixo custo	48
4.1.1 Dispositivos principais e acessórios	49
4.1.2 Montagem e configuração.....	58
4.1.3 Calibração dos dispositivos sensores	61
4.1.4 Custo de implementação	63
4.2 Tratamento da influência do ar descendente das hélices do drone nas medições	64
4.3 Teste de carga com anemômetro ultrassônico PRSens	66
4.4 Caracterização das campanhas de medição	67
4.5 Emprego do modelo numérico Weather Research and Forecasting.....	68
4.5.1 Pós-processamento de dados modelados com WRF-Python.....	70
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.1 Teste de voo do dia 22 de agosto de 2022.....	74
5.2. Teste de voo do dia 5 de setembro de 2022.....	76
5.3 Tratamento da influência do ar descendente das hélices do drone nas medições	77
5.4 Teste de voo do dia 14 de fevereiro de 2023	79

5.5 Teste de voo do dia 6 de março de 2023	81
5.6 Experimentação atmosférica do dia 14 de março de 2023	84
5.7 Análise dos perfis verticais atmosféricos	87
5.7.1 Análise dos perfis verticais de dados ambientais de teste	87
5.7.2 Análise dos perfis verticais de dados ambientais da experimentação atmosférica	90
5.7.3 Análise dos perfis verticais de modelagem numérica pelo WRF-Python	97
6 CONCLUSÃO	105
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
APÊNDICE A – <i>Script</i> importado para a placa Arduino Uno	113
APÊNDICE B – Ficha de campo do dia 22/08/2022	121
APÊNDICE C – Ficha de campo do dia 05/09/2022	123
APÊNDICE D – Ficha de campo do dia 18/01/2023	125
APÊNDICE E – Ficha de campo do dia 14/02/2023	127
APÊNDICE F – Ficha de campo do dia 06/03/2023	129
APÊNDICE G – Ficha de campo do dia 14/03/2023	131
APÊNDICE H – Arquivo de configuração do WRF “ <i>namelist.input</i> ”	133
APÊNDICE I – Arquivo de configuração do WRF “ <i>namelist.wps</i> ”	137
APÊNDICE J – <i>Notebook</i> da interface de usuário Jupyterlab	139
APÊNDICE K – Certidão de cadastro do drone DJI Mavic Air 2 junto à Agência Nacional de Aviação Civil	147
APÊNDICE L – Certidão de cadastro do drone DJI Phantom 3 Standard junto à Agência Nacional de Aviação Civil	148
APÊNDICE M – Autorização de acesso ao espaço aéreo emitida via Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas	149
APÊNDICE N – Avaliação de risco operacional	150

1 INTRODUÇÃO

Numa perspectiva relacionada à gestão ambiental e no que se refere aos desastres naturais, é necessário que se compreenda que eles são resultado de fenômenos naturais extremos ou intensos, que ocasionam impactos sociais e se caracterizam majoritariamente em função de seu fenômeno desencadeador (TOBIN; MONTZ, 1997).

Dentre tais fenômenos estão os ciclones, ou depressões, que são centros de baixa pressão que apresentam intensas correntes de ar, em sentido horário no hemisfério sul, classificados como tropicais, extratropicais e subtropicais, ou híbridos, em função de sua gênese, estrutura térmica vertical, ciclo de vida e fonte de energia (ROCHA, 2014).

A investigação dos mecanismos termodinâmicos desses fenômenos viabiliza uma rápida identificação das chances de atividades convectivas se desenvolverem num curto período, ocasionando tempestades. Nesse contexto, a obtenção de perfis verticais da atmosfera por meio de sondagens é importante para o prognóstico de fenômenos meteorológicos como formação de nuvens, nevoeiro, precipitação ou neve, assim como para que se investigue índices de instabilidade atmosférica, tais como os índices K, *Lifted Index* (LI), e *Total-Totals* (TT), e os valores de Energia Potencial Disponível para Convecção (*Convective Available Potential Energy* - CAPE) e de Inibição Convectiva (*Convective Inhibition Energy* - CIN) (GASPARETTO, 2011).

Para que se compreenda ainda melhor a relevância do estudo da baixa troposfera, ela desempenha um papel importante em nossas vidas cotidianas, pois representa o ar que a maioria de nós respira, e, como as concentrações de poluentes do ar são significativamente maiores nesse nível da atmosfera, a baixa troposfera tende a desempenhar um papel importante na compreensão e avaliação desses poluentes (STRAWBRIDGE; SNYDER, 2004).

Além do conhecimento das condições termodinâmicas da atmosfera, o emprego de modelos numéricos de previsão do tempo também é importante por realizar o prognóstico de fenômenos atmosféricos, de modo a ser uma maneira de viabilizar a emissão de alertas meteorológicos (LIRA; CATALDI, 2016).

Dentre tais modelos encontra-se o *Weather Research and Forecasting* (WRF), o qual é capaz de realizar prognósticos das condições do tempo para diversos níveis da atmosfera, dentre os quais está a camada de superfície, que é uma porção da baixa troposfera que abrange uma faixa de espessura que varia entre os 20 a 200 metros mais próximos à superfície, de forma que o arrasto por fricção, a condução de calor e a evaporação da superfície causam variações

substanciais na velocidade do vento, temperatura e umidade com a altura nessa camada. (STULL, 2011).

Para se analisar as características da camada de superfície, pode-se realizar sondagens atmosféricas com sensores de baixo custo embarcados em drone juntamente com perfis verticais gerados por modelagem numérica, a fim de que se possa avaliar qualitativamente os resultados de um em função do outro. Para auxiliar essa análise, é útil empregar o WRF-Python, que pode ser descrito como um pacote de rotinas de diagnóstico e interpolação própria para a linguagem de programação Python a fim de ser usada com os resultados gerados pelo modelo WRF.

Esse estudo pode contribuir para a validação do emprego de tais sensores embarcados, influenciando, por exemplo, a consistência de alertas meteorológicos, o cálculo de índices de instabilidade atmosférica e o prognóstico de fenômenos meteorológicos como nevoeiros.

Ciente disso, e com o propósito de reduzir custos de campanhas de experimentação atmosférica, foi desenvolvido no Laboratório de Monitoramento e Modelagem Numérica de Sistemas Climáticos (LAMMOC) da Universidade Federal Fluminense (UFF) um perfilador atmosférico, de tecnologia própria, com base em prototipagem Arduino, que é uma plataforma de computação programável capaz de interagir com seu ambiente (MCROBERTS, 2011), para ser utilizado embarcado em um drone.

1.1 Objetivos

O objetivo deste estudo é elaborar um perfilador atmosférico de baixo custo, capaz de medir temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica, para ser embarcado em drone, de modo que apresente estabilidade satisfatória em voo e que minimize a influência do ar descendente das hélices nas medições. Com isso, busca-se gerar perfis verticais atmosféricos na camada de superfície com a utilização desse perfilador para, então, realizar análise desses perfis em relação àqueles gerados por dados de modelagem numérica do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) pós-processados pelo pacote de rotinas WRF-Python, e, finalmente, avaliar o potencial deste tipo de abordagem em condições de meteorologia operacional e assimilação de dados de modelos numéricos.

A partir disso, os objetivos específicos são desenvolver juntamente ao LAMMOC-UFF um perfilador atmosférico de baixo custo baseado em prototipagem em Arduino para ser

embarcado em drone, gerar perfis verticais atmosféricos na camada de superfície com o perfilador desenvolvido, analisar comparativamente os perfis verticais gerados por dados observados em experimentação atmosférica com aqueles obtidos por meio do modelo WRF, pós-processados pelo WRF-Python, e, por fim, avaliar como essa abordagem pode ser relevante para meteorologia operacional e assimilação de dados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Faz-se relevante a compreensão de determinados conceitos e definições relacionados ao emprego de sensores de baixo custo dispostos em placa de prototipagem Arduino e ao uso do modelo numérico WRF, os quais são associados no intuito de viabilizar comparações entre seus resultados, e, assim, contribuir para diversos proveitos, tais como a emissão com maior exatidão de alertas de desastres naturais decorrentes de eventos meteorológicos. Tais conceitos e definições são elencados a seguir nesta seção.

2.1 Desastres Naturais

Em relação ao conceito de desastres, o Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres, traduzido do inglês United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), define que eles são “uma interrupção severa no funcionamento de uma comunidade ou sociedade que causa elevada quantidade de mortes, perdas e impactos materiais, econômicos e ambientais que ultrapassam a capacidade da comunidade ou sociedade afetada de enfrentar a situação mediante seus próprios recursos” (UNISDR, 2009). Isso evidencia que um mesmo evento pode caracterizar um desastre numa comunidade, mas não o caracterizar para outra com capacidade superior de resposta (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009).

De acordo com a Política Nacional de Defesa Civil (PNDEC), os desastres são o “resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais” (BRASÍLIA, 2007). A PNDEC também classifica os desastres em três tipos: naturais, humanos e mistos. Quanto a isso, Marcelino (2007) e Castro (1998) destacam que a maioria dos desastres naturais seriam considerados mistos se apenas esse critério fosse levado em consideração.

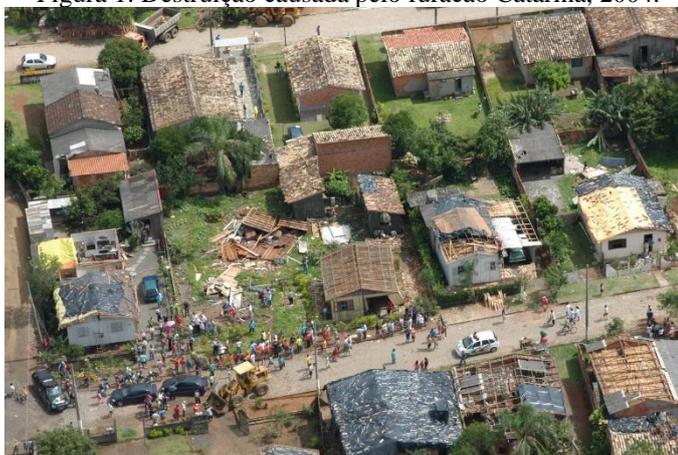
Desta forma, a compreensão dos desastres naturais engloba dois elementos fundamentais na concepção do risco, quais sejam o perigo de ocorrer um evento, fenômeno ou atividade humana com potencial danoso e a vulnerabilidade da localidade exposta a esse perigo. Com isso, entende-se que o impacto dos desastres depende tanto da caracterização, probabilidade e intensidade do perigo natural, quanto da vulnerabilidade das condições geofísicas, socioeconômicas e ambientais das regiões expostas a ele (UNISDR, 2004).

Sobre essa temática, a classificação dos desastres naturais demonstra que 85% das perdas diretas possuem relação com eventos de ordem atmosférica (GALL et al., 2011). Dentre

tais eventos, o desenvolvimento de distúrbios climáticos em escala sinótica é frequentemente referido como ciclogênese, sendo esse um termo que enfatiza o papel da vorticidade relativa no desenvolvimento de sistemas de escala sinótica (HOLTON, 2013).

Rocha (2014) destaca que, por ocasião da passagem do furacão “Catarina”, que alcançou a região Sul do Brasil, 11 pessoas vieram a óbito e as perdas financeiras se aproximam de US\$ 500 milhões (como ilustrado na Figura 1). Mais ainda, o furacão Irma, que passou pela região do Caribe até alcançar os Estados Unidos da América, causou a morte de 25 pessoas e deixou impactos de ordem material em diversas localidades (EXAME, 2017).

Figura 1: Destruição causada pelo furacão Catarina, 2004.



Fonte: W3 News.

Em decorrência das muitas perdas materiais e humanas atribuídas a tais fenômenos, estudos envolvendo variações climáticas e desastres naturais ligados a fenômenos atmosféricos tem se destacado nos últimos anos (GAR, 2015; TOBIN; MONTZ, 1997; LUZ, 2009).

De acordo com o Relatório de Avaliação Global de 2015 (GAR15), elaborado pelo UNISDR, prejuízos anuais entre US\$ 250 a 300 bilhões ocorrem mundialmente devido aos desastres naturais, e, caso haja um investimento global em prevenção, pode ocorrer redução de até 20% desses valores (GAR, 2015).

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) anunciou em seu nono relatório que, em função do aquecimento global, a sociedade deve se preparar para enfrentar calor, secas e tempestades de maiores intensidades, pois indícios apontam que a mudança climática levou a modificações em determinados episódios extremos que ocorrem há 50 anos e os resultados de modelagem numérica preveem intensificação nas décadas vindouras (IPCC, 2012).

Assim, pesquisas e iniciativas voltadas para meios de prevenção de perdas relacionadas a desastres naturais são de suma importância em nível mundial, já que fenômenos meteorológicos, que causam tais desastres, são elementos naturais da dinâmica atmosférica e, portanto, sempre ocorrerão (MARCELINO, 2007).

Corroborando com isso no âmbito dos ciclones, Luz Barcellos (2019) destaca que eles são naturais na dinâmica atmosférica, mas, quando não são previstos corretamente, perdas de bens e vidas podem acontecer nas regiões costeiras e em alto-mar, evidenciando a necessidade de alertas meteorológicos serem empregados como ferramenta de prevenção a fim de se reduzirem os índices de destrutividade e letalidade.

2.2 Plataforma de prototipagem Arduino e sensores de parâmetros atmosféricos

A placa Arduino Uno é uma placa microcontroladora de prototipagem baseada no microcontrolador ATmega328P. Ela possui 14 pinos de entrada/saída digital, dos quais 6 dispõem da função de saída com modulação de largura de pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*), 6 entradas analógicas, um ressonador cerâmico de 16 MHz do tipo CSTCE16M0V53-R0 (útil em controle de sincronia, conhecido como função “*clock*”), uma conexão *Universal Serial Bus* (USB), um conector de energia, um cabeçalho *In-Circuit Serial Programming* (ICSP), o qual permite que o microcontrolador seja reprogramado sem que haja necessidade de removê-lo do circuito, e um botão de *reset*. Sua alimentação pode se dar por computador, bateria ou adaptador de corrente alternada para contínua e, além disso, em caso de mau-funcionamento no microcontrolador, ele pode substituído sem demandar muito trabalho ou dispêndio financeiro (ARDUINO, 2023).

Essas características viabilizam sua associação a diversos dispositivos e sensores, dentre os quais estão os sensores DHT22, que pode ser empregado para medição de temperatura e umidade relativa, o BMP280, que pode ser empregado para medição de pressão atmosférica, e o MPX5100DP que pode ser empregado para medição de pressão diferencial e, com isso, viabilizar cálculos de velocidade do vento.

O sensor DHT22 realiza suas medições através do processamento de dados digitais relacionados à variação de temperatura e umidade relativa. Seus elementos de detecção são conectados a um chip de 8 bits. Suas medições são submetidas a compensações de temperatura e a uma câmara de calibração própria. Seu tamanho reduzido e seu baixo consumo de energia o fazem versátil para diversas formas de aplicação (AOSONG, 2017).

O sensor BMP280 realiza medições da pressão atmosférica absoluta e foi especialmente projetado para dispositivos móveis. Seu baixo consumo de energia permite sua implementação em dispositivos acionados por bateria. Como sucessor do sensor BMP180, o BMP280 oferece alto desempenho em todas as aplicações que requerem medição de pressão precisa. Ele opera com baixo ruído e comporta uma comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI). Sua precisão garante um erro máximo de aproximadamente 1 metro em cálculos altimétricos (BOSCH, 2018).

O sensor MPX5100DP é um transdutor piezoresistivo monolítico equipado com sensor de pressão de silício e projetado para uma ampla gama de aplicações, mas particularmente aquelas que empregam um microcontrolador ou microprocessador com entradas analógicas e digitais. Este transdutor combina técnicas de microusinagem, metalização em filme fino e processamento bipolar para fornecer um sinal de saída proporcional à pressão aplicada (MOTOROLA, 2004).

Esses dispositivos, além de outros acessórios, são utilizados neste estudo, de modo que mais detalhes, como figuras e dados técnicos, são apresentados na seção de materiais e métodos. destrutividade e letalidade.

2.3 Modelo numérico Weather Research and Forecasting e WRF-Python

O modelo numérico de mesoescala de previsão numérica do tempo e simulação atmosférica *Weather Research and Forecasting* (WRF) foi desenvolvido pelos órgãos *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), *Forecast Systems Laboratory* (FSL), *Air Force Weather Agency* (AFWA) e pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) da *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR) no intuito de fomentar a transferência de conhecimento no âmbito das pesquisas científicas e da área operacional, de modo que abriga um sistema variável de assimilação de dados, assim como um software que permite o paralelismo computacional e a extensibilidade do sistema, se destacando por ser um modelo portátil, flexível, de domínio público e gratuito (CARVALHO; ABRUNHOSA; LOPES, 2013; SKAMAROCK et al., 2008). Sendo também um modelo de código aberto, ele é constantemente atualizado pela comunidade científica, o que o faz ser parte da geração de modelos de previsão numérica do tempo mais atual (DA SILVA; FISCH, 2014).

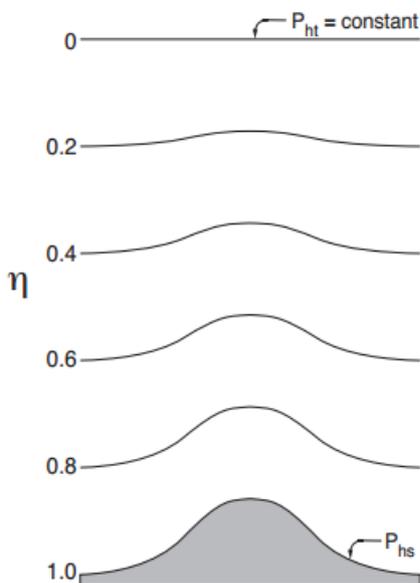
O modelo WRF é dotado com tecnologia de assimilação de dados tridimensional, e é discretizado em diversas camadas (também chamados níveis de altitude), sendo o nível mais elevado a representação da altitude da troposfera. Esse modelo dispõe de vários esquemas paramétricos e possui duas maneiras de resolver e tratar as equações do movimento atmosférico, quais sejam o *Advanced Research WRF (ARW)*, com suporte e desenvolvimento a cargo da NCAR, e o *Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM)*, elaborado pelo NCEP com base no modelo operacional hidrostático regional de escala vertical ETA (BENDER, 2012). Esses solucionadores consideram principalmente gradientes de pressão, advecção, efeito de Coriolis, fronteiras, filtros e difusão (VANZAN, 2020).

A linguagem computacional mais empregada no modelo é o *Formula Translation System (FORTRAN)*, o qual pode ser construído com diversos compiladores, sendo executado majoritariamente em plataformas que possuem sistemas operacionais semelhantes ao UNIX, tendo boa aplicabilidade desde laptops até supercomputadores (POWERS et al., 2017).

Suas simulações numéricas são realizadas em quatro dimensões (x, y, z, t), uma vez que a malha horizontal se repete em todos os níveis verticais a cada passo de tempo. Tais níveis verticais são fornecidos ao modelo como coordenada da pressão hidrostática η (cuja representação consta na Figura 2 e para a qual seu valor é calculado de acordo com a equação 1) que acompanha o contorno do terreno juntamente ao solo. Em sua equação, p_h é a pressão em cada nível, p_{top} é a pressão no topo da atmosfera (constante) e p_s é a pressão à superfície. η varia de 0 a 1, sendo 0 no topo da atmosfera e 1 na superfície. Uma vez obtida essa coordenada, o conjunto de equações de conservação clássicas da modelagem, tais como a de massa, energia, momento e água, são resolvidas em função do valor de η .

$$\eta = \frac{p_h - p_{top}}{p_s - p_{top}} \quad (1)$$

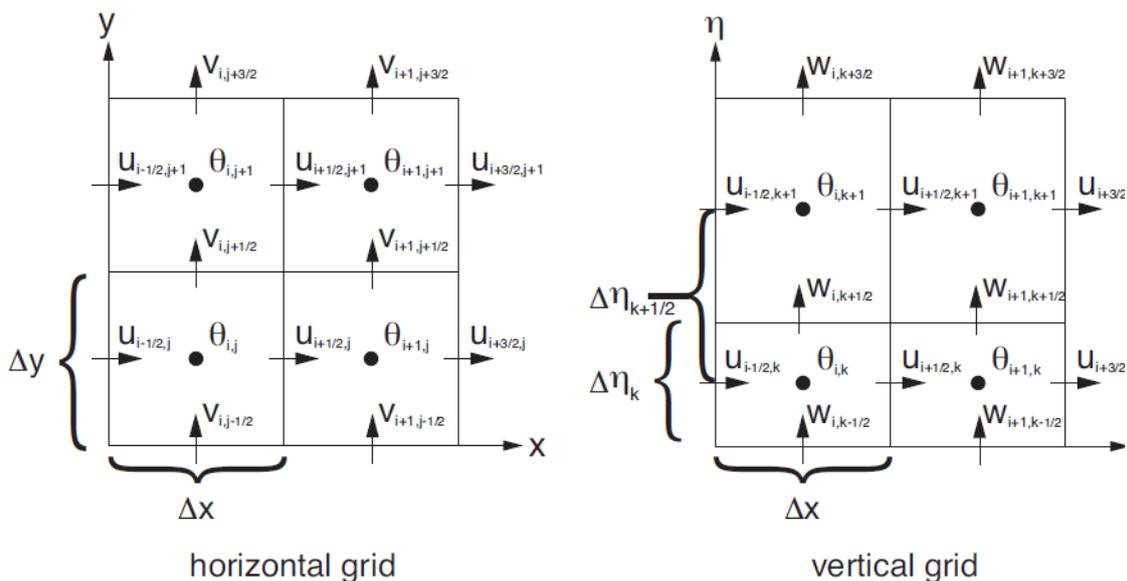
Figura 2: Coordenada vertical utilizada no modelo WRF-ARW.



Fonte: SKAMAROCK et al., 2008.

No tocante à discretização espacial do modelo, ele emprega uma grade do tipo C de Arakawa (apresentada na Figura 3). Os espaçamentos horizontais de grade nas direções x e y são representados pelas variáveis Δx e Δy respectivamente, não havendo variação em todo o domínio do modelo. Tal disposição faz com que as componentes zonal, meridional e vertical da velocidade do vento u , v e w sejam ordenadas distando metade do comprimento de grade das variáveis termodinâmicas θ (BENDER, 2012).

Figura 3: Grades horizontais e verticais do WRF-ARW.

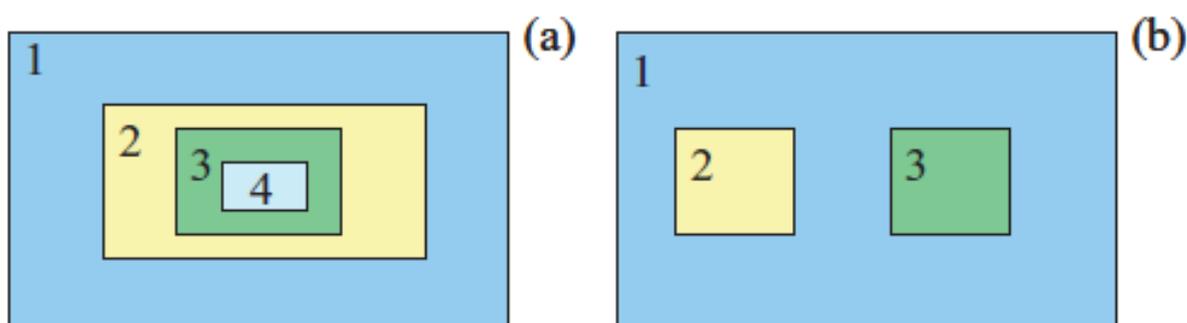


Fonte: SKAMAROCK et al., 2008.

Concernente à discretização temporal do WRF, o ARW resolve as equações na forma de ondas, as quais podem ser de baixa ou alta frequência. Essa discretização se dá por uma integração conhecida como “*time-split*” (passo de tempo), de modo que as ondas de baixa frequência, capazes de representar a maioria dos fenômenos meteorológicos de interesse, são integradas pelo esquema Runge-Kutta de terceira ordem (RK3) e as de alta frequência, de mais baixo interesse meteorológico, são integradas com intervalos de tempo inferiores para que se mantenha estabilidade numérica. Assim, os modos acústicos de propagação horizontal e de ondas de gravidade são integrados no esquema “*forward-backward*” enquanto os modos acústicos de propagação vertical são integrados implicitamente com o passo de tempo acústico (SKAMAROCK et al., 2008).

Quanto ao aninhamento de grades, é permitido dispor grades internamente a outras em arranjos variados (conforme apresentado na Figura 4). Desse modo, é possível realizar a inserção de diferentes grades menores em um único domínio maior, ou ainda a configuração de “grades telescópicas”, fazendo com que diferentes domínios compartilhem o mesmo ponto central. De todo modo, as condições de contorno laterais das grades menores serão interpoladas em função das grades maiores que as contiverem (SKAMAROCK et al., 2008).

Figura 4: Aninhamento de grades permitidos no WRF: (a) grades telescópicas e (b) grades menores em um mesmo nível em relação a grade “mãe”.



Fonte: SKAMAROCK et al., 2008.

No que abrange as etapas do processo de simulação do modelo, ele possui duas fases diferentes. Na primeira fase é feita a configuração do domínio do modelo, são inseridos os dados de entrada e são preparadas as condições iniciais. Na segunda fase é inicializada a simulação propriamente dita, quando o modelo é posto para realizar suas rodadas (POWERS et. al, 2017).

No começo do uso do modelo, deve-se configurar três arquivos de texto chamados *namelist.wps* (que rege a etapa de pré-processamento), *namelist.input* (que rege a etapa de processamento) e *namelist.ARWpost* (que rege a etapa de pós-processamento). O uso de arquivos “*namelist*” viabiliza a alteração das configurações do programa sem que seja necessária a recompilação do seu código fonte (CARVALHO, ABRUNHOSA e LOPES, 2013).

Ainda com relação à configuração, as parametrizações nos modelos atmosféricos (dentre os quais se encontra o WRF) são uma emulação, ou modelagem, não dos processos físicos em si, mas sim de seus efeitos. Elas se tornam necessárias ou porque os recursos computacionais ainda não são suficientes para a resolução das equações que regem os processos de interesse ou porque muitos desses processos ocorrem em escalas muito menores do que as escalas da grade do modelo (sendo, assim, chamados processos de sub-grade), o que os torna demasiadamente complexos para serem resolvidos (GANDU, 2005).

Desse modo, as parametrizações do modelo WRF são utilizadas em sua programação para representar diversos processos atmosféricos, tais como radiações de ondas longa e curta, microfísica das nuvens e nuvens convectivas, e fluxos turbulentos na camada de superfície e na camada limite atmosférica (CASSANO, HIGGINS, SEEFELDT., 2011).

A se tomar como exemplo, os esquemas de parametrização de camada de superfície calculam tanto as velocidades de fricção quanto os coeficientes de troca. A partir desses resultados, os esquemas de parametrização de interação com a superfície terrestre são capazes de calcular os fluxos de calor e umidade à superfície, assim como os de camada limite planetária são capazes de calcular o cisalhamento superficial. Cabe salientar que tais esquemas não recebem tendências, mas tão somente dados dependentes da estabilidade da camada de superfície. No tocante às massas d'águas, os fluxos e os campos de diagnósticos à superfície são computados pelo próprio esquema de camada de superfície (SKAMAROCK et al., 2008).

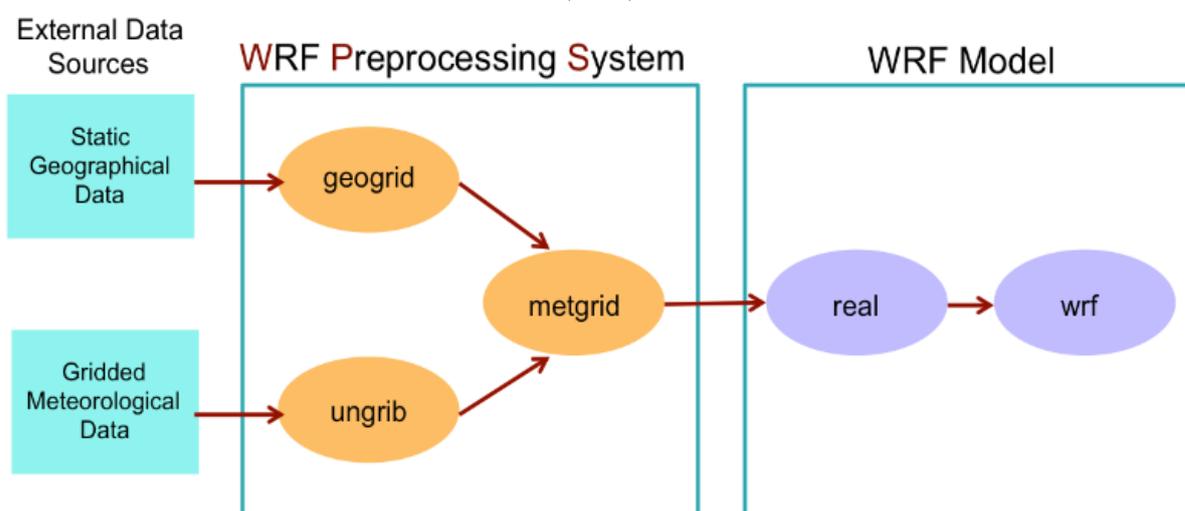
Na etapa de pré-processamento, os dados de entrada são preparados por meio do *WRF Preprocessing System* (WPS), a partir do qual são executados os sistemas *Geogrid*, responsável por definir o domínio do modelo e pela interpolação dos dados terrestres para as grades, *Ungrib*, responsável pela extração dos campos meteorológicos do formato GRIB (*gridded binary*), o que é necessário para inicializar o modelo, e *Metgrid*, responsável pela interpolação horizontal desses campos meteorológicos (já extraídos pelo *Ungrib*) para as grades do modelo (já definidas pelo *Geogrid*).

Na etapa de execução são conduzidos os processos dos solucionadores dinâmicos ARW e NMM. É nesse momento que o trabalho de interpolação vertical dos campos é realizado

pelo ARW por meio do emprego do programa *real*, que direciona seus resultados para o programa WRF propriamente dito (conforme apresentado na Figura 5).

Finalmente, na etapa de pós-processamento, o produto do modelo é processado pelo programa *ARWPost* para ser convertido para um formato mais adequado à interpretação por meio de programas de visualização gráfica, tal como o *Grid Analysis and Display System* (GrADS).

Figura 5: Fluxo de etapas de processamento de dados do modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF).

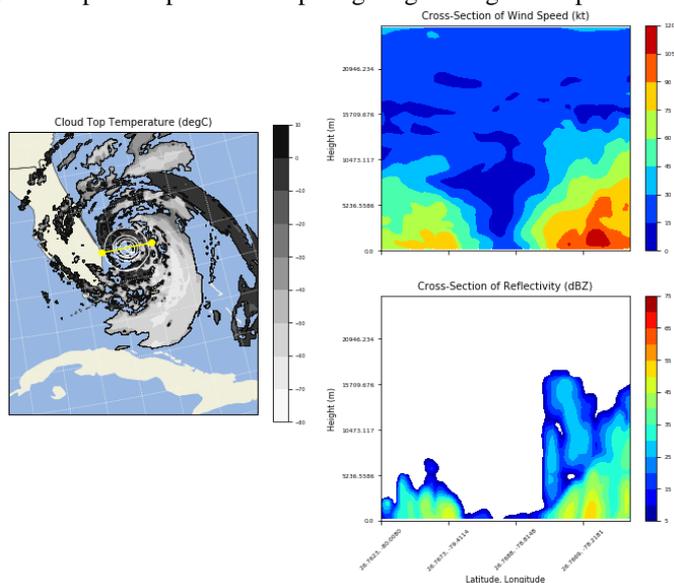


Fonte: WRF-ARW *Online Tutorial*, 2023.

Outra forma de se trabalhar com os dados de resultado do WRF é com o pacote de rotinas de programação WRF-Python. Essa ferramenta conta com mais de 30 formas de cálculo de diagnóstico, diversas rotinas de interpolação e utilitários para ajudar na geração de produtos de plotagem gráfica (conforme apresentado na Figura 6) através de Cartopy, Basemap ou PyNGL, que são pacotes de comandos em linguagem de programação Python úteis, por exemplo, no processamento de dados geoespaciais (LADWIG, 2017).

Entre os resultados possíveis de se obter com o WRF-Python está a plotagem de perfis verticais de dados atmosféricos. Para tanto, é necessário extrair do arquivo de dados gerado após a rodada do modelo WRF as variáveis envolvidas de acordo com o momento de interesse e plotar os perfis com qualquer ferramenta de plotagem disponível, tal como a Matplotlib (conforme apresentado em mais detalhes nas seções de materiais e métodos e de resultados e discussão).

Figura 6: Exemplos de produtos de plotagem gráfica gerados por WRF-Python.



Fonte: LADWIG, 2017.

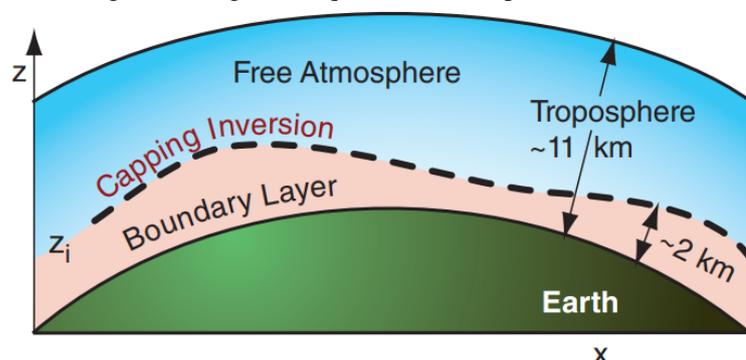
2.4 Camada limite atmosférica e camada de superfície

A camada limite atmosférica (CLA), apresentada na Figura 7 como “*boundary layer*”, é caracterizada como a região da atmosfera cuja influência da superfície ainda está presente nas características intrínsecas do escoamento atmosférico, causando-lhe um comportamento ocasionalmente turbulento. A mistura entre a porção inferior da atmosfera livre e o topo da CLA gera uma zona de transição estável com um aumento acentuado de temperatura, que caracteriza a inversão de temperatura (conforme apresentada na Figura 7 como “*capping inversion*”) Essa zona age como uma barreira à convecção, turbulência e à poluição, pois se uma turbulência tentasse empurrar alguma parcela de ar do topo da CLA para a atmosfera livre, ela seria mais fria do que seu entorno e seria empurrada de volta. Com isso, vigorosas turbulências dentro da CLA fazem com que ela responda rapidamente às influências da superfície, como aquecimento e arrasto friccional, o que não se observa no restante da troposfera (STULL, 2017).

A camada limite atmosférica, abrange a faixa dos 200 metros aos 4 km inferiores da troposfera. Sua profundidade é variável de acordo com a localização, o tempo e o nível de estabilidade atmosférica. O transporte turbulento faz com que essa camada sinta os efeitos diretos da superfície da Terra. Ela exhibe fortes variações diárias de temperatura, umidade, ventos, poluentes, turbulência e profundidade em resposta ao aquecimento solar diurno e ao resfriamento infravermelho noturno do solo. Assim, a temperatura na CLA apresenta comportamentos

diferentes para os períodos diurno e noturno, de modo que no período diurno é comum se observar uma camada de mistura, com a temperatura diminuindo em função da altura, e uma zona de entranhamento separando essa camada da atmosfera livre, enquanto no período noturno é comum que se desenvolva uma inversão térmica próximo do solo, em função do seu resfriamento, dentro de uma camada limite estável, sobre a qual ocorre uma camada residual separada da atmosfera livre pela inversão de temperatura, de acordo com o exemplificado na Figura 8 (STULL, 2017).

Figura 7: Diagrama esquemático da troposfera terrestre.



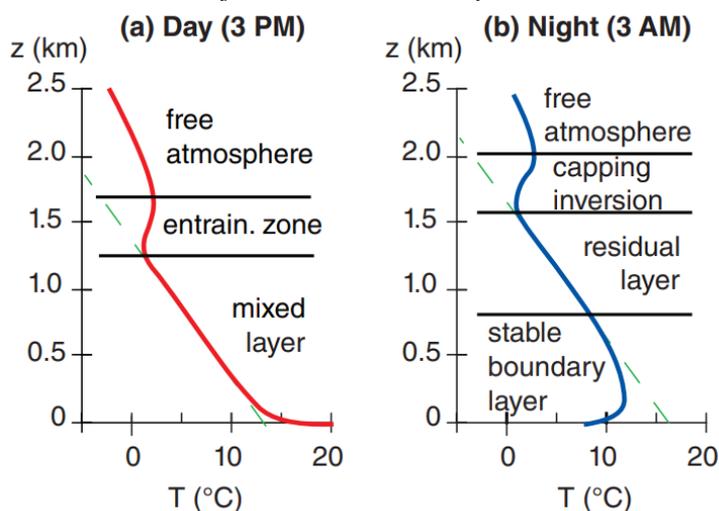
Fonte: STULL, 2017.

Com isso, a camada limite atmosférica é uma porção da troposfera bastante afetada pelo ciclo de aquecimento diário, pela umidade e pela transferência de momento para a superfície. Com a diminuição da temperatura no período noturno, a porção superior da CLA torna-se mais baixa do que durante o dia, enquanto atinge sua extensão máxima no período da tarde. Sobre o oceano, o ciclo diário da CLA pode ser mais fraco, inexistente ou revertido (BRETHERTON et al., 2004).

Quanto ao balanço de energia e calor na superfície terrestre, o Sol emite energia em radiação de ondas curtas que incide no topo da atmosfera. Dessa energia, em valores aproximados, 19% é absorvida pela atmosfera, 30% é refletida de volta para a atmosfera e 51% é absorvida pela superfície terrestre (conforme apresentado na Figura 9). A Terra, por sua vez, emite energia em radiação de ondas longas, a qual é retorna à atmosfera na forma de radiação infravermelha, calor sensível e calor latente. Esse balanço leva ao processo conhecido como efeito estufa, no qual as partículas atmosféricas são “transparentes” à energia de ondas curtas provenientes do Sol, mas são “opacas” à energia de ondas longas proveniente da superfície terrestre (CARVALHO et al., 2015).

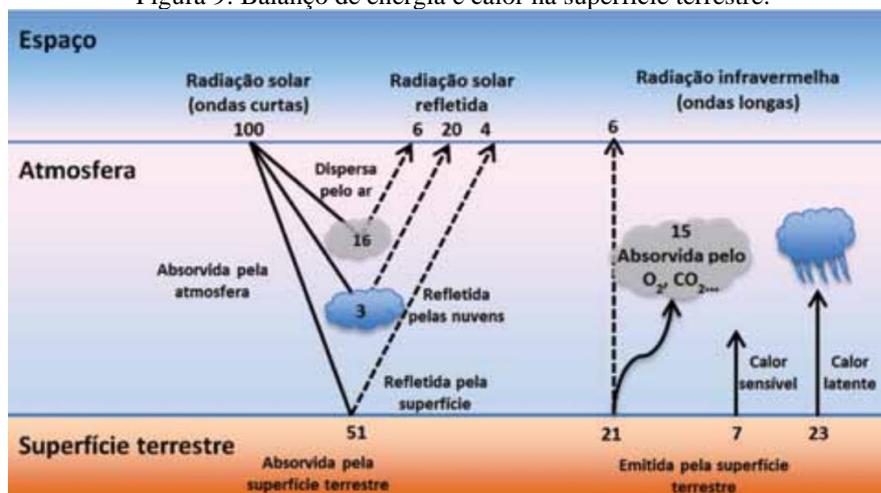
A camada de superfície (ou superficial, apresentada na Figura 10) possui uma espessura que varia entre os 20 e os 200 metros mais próximos à superfície, de modo que, nessa camada, o arrasto por fricção, a condução de calor e a evaporação da superfície causam variações substanciais em função da altura na temperatura, na umidade e no vento. O comportamento da temperatura nessa camada varia de acordo com ciclo diário, de modo que é comum se observar uma inversão térmica para o período noturno, exemplificada conforme a Figura 11. Quanto aos fluxos turbulentos, eles são relativamente uniformes com o incremento da altura, o que permite que a camada de superfície seja conhecida como camada de fluxo constante (STULL, 2017).

Figura 8: Exemplos de perfis de temperatura da camada limite planetária durante (a) dia e (b) noite. A linha verde tracejada mostra a taxa de lapso adiabático.



Fonte: STULL, 2017.

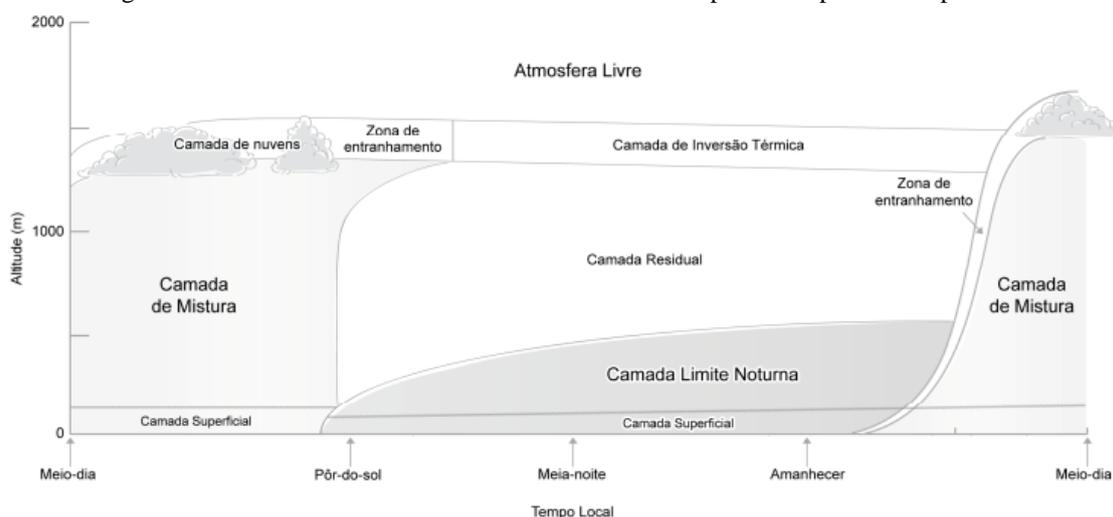
Figura 9: Balanço de energia e calor na superfície terrestre.



Fonte: CARVALHO et al., 2015.

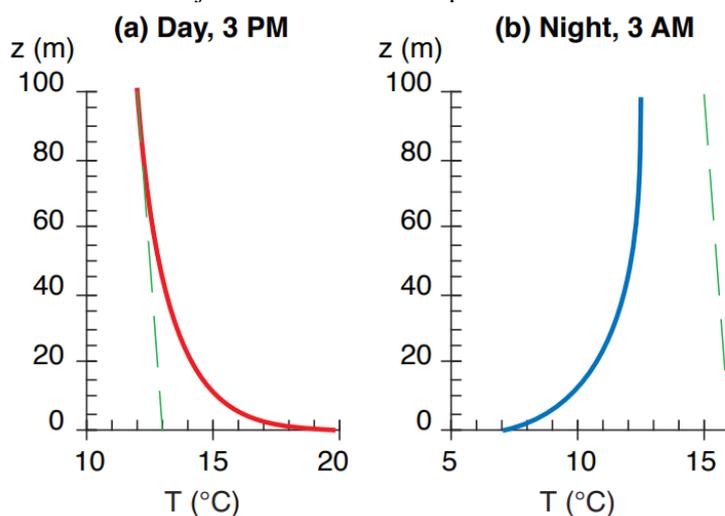
Ainda sobre a camada de superfície, ela é a região na parte inferior da camada limite atmosférica na qual os fluxos turbulentos e as tensões variam em menos de 10% de sua magnitude. Desta forma, a porção mais superficial que abrange uma faixa em torno de 10% da camada limite atmosférica é chamada de camada de superfície, independentemente de fazer parte de uma camada mista ou camada limite estável. Ademais, uma fina camada chamada microcamada ou camada interfacial é identificada nos poucos centímetros mais baixos do ar, onde o transporte molecular rege o transporte turbulento (STULL, 1988).

Figura 10: Camada limite atmosférica com camada de superfície representada próxima ao solo.



Fonte: Adaptado de STULL, 1988.

Figura 11: Exemplos de perfis de temperatura da camada de superfície durante (a) dia e (b) noite. A linha verde tracejada mostra a taxa de lapso adiabático.

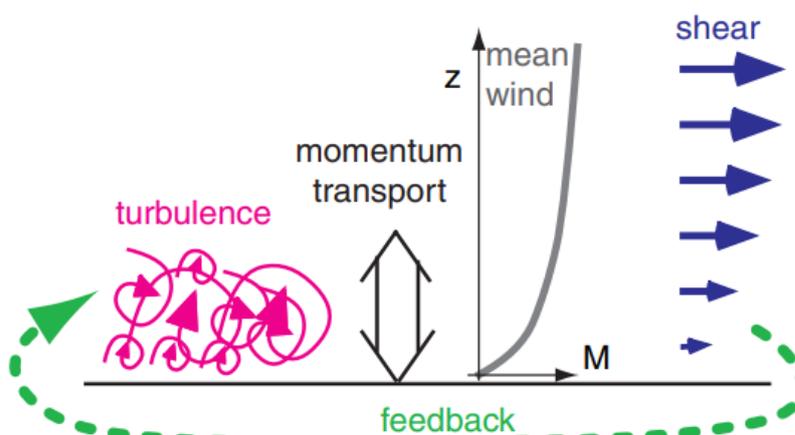


Fonte: STULL, 2017.

A velocidade do vento é nula junto ao solo, ou mais precisamente a uma altura igual ao comprimento da rugosidade aerodinâmica. Essa velocidade aumenta de forma aproximadamente logarítmica com a altura na camada de superfície estaticamente neutra, o que corresponde à faixa entre 50 e 100 metros inferiores da CLA, mas a forma desse perfil depende da rugosidade da superfície. Um perfil de vento perfeitamente logarítmico seria esperado apenas para estabilidade estática neutra sobre uma superfície uniforme. Para outras estabilidades estáticas, o perfil do vento varia ligeiramente de logarítmico. Nesse sentido, a turbulência transporta momento, que controla a forma do perfil do vento, que então determina o cisalhamento. Na camada de superfície neutra (ilustrada na Figura 12) há uma forte realimentação porque o cisalhamento do vento gera a turbulência, que por sua vez controla o cisalhamento do vento. Tal realimentação, no entanto, é quebrada para turbulência convectiva (ilustrada na Figura 13), porque ela é gerada principalmente por flutuação térmica, não por cisalhamento (STULL, 2017).

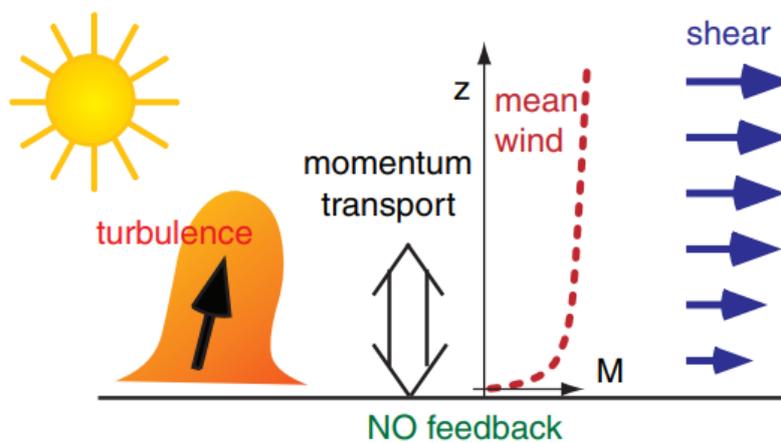
Em seu trabalho relacionado à simulação de camadas limite estratificadas em túnel de vento, Cataldi (2002) destaca que o estudo da camada de superfície turbulenta demanda que se decomponha os valores dos campos de velocidade do vento, temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa seguindo a técnica clássica conhecida por “promediação de Reynolds”. Nesse mesmo trabalho, Cataldi avalia simulações de camadas de superfície lisa, rugosas, estáveis e instáveis, de modo que em alguns de seus perfis de camada lisa e estável é possível constatar o comportamento logarítmico tanto do vento quanto da temperatura.

Figura 12: Processos relevantes para o perfil do vento na camada de superfície dominada por turbulência mecânica (convecção forçada; estabilidade neutra).



Fonte: STULL, 2017.

Figura 13: Processos relevantes para o perfil do vento na camada de superfície durante a turbulência convectiva (convecção livre; estaticamente instável).



Fonte: STULL, 2017.

Este estudo é conduzido no interior da camada de superfície, na qual sensores de baixo custo embarcados em drone são empregados a fim de se coletar dados ambientais que subsidiem a elaboração de perfis verticais atmosféricos a serem comparados com aqueles gerados por modelagem numérica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, são apresentadas contribuições relevantes com relação ao uso de sensores de baixo custo para aquisição de dados ambientais e ao uso do modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF).

3.1 Experimentos atmosféricos com instrumentação de baixo custo

A radiossonda (conforme apresentada na Figura 14) é um dos meios utilizados para medir as variáveis dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera (SAPUCCI et al., 2003). Esse é o equipamento mais comum para obtenção de dados da estrutura vertical da baixa troposfera no interior da CLA, apesar de seu alto custo financeiro (SEIBERT et al., 2000).

O emprego de radiossondas para a coleta de dados atmosféricos em altitude é fundamental para o monitoramento das condições meteorológicas, assim como nos sistemas de assimilação de dados, mas seu custo elevado dificulta, quando não inviabiliza, a utilização desse tipo de equipamento (conforme apresentado na Tabela 8 na seção de custo de implementação).

Figura 14: Radiossonda DFM-09 (Graw) em voo.



Fonte: Squitter, 2023.

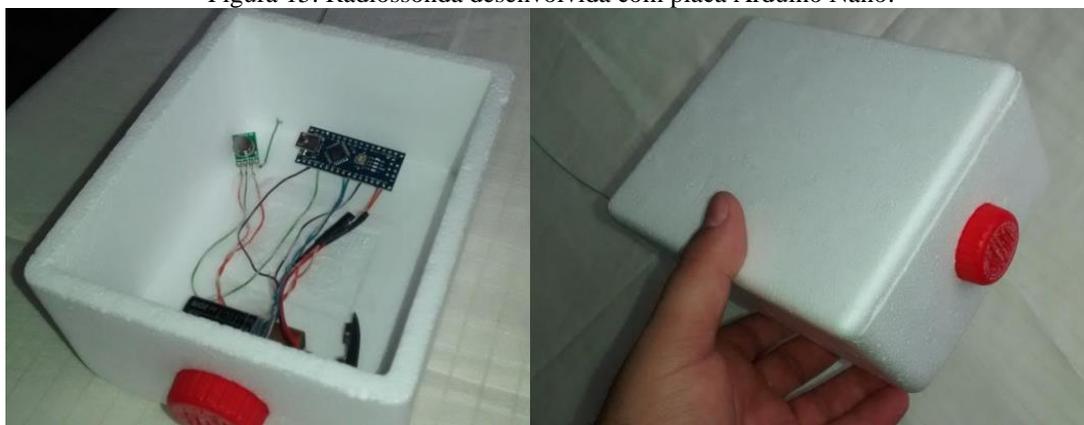
Tal instrumento apresenta sistema de telemetria e sensores de pressão, temperatura e umidade relativa, além de fazer inferência do campo de vento, sendo a taxa de amostragem e o alcance alguns dos fatores que influenciam a aquisição de dados (SILVA; LYRA, 2009).

Com isso, constata-se que a estrutura de aquisição de dados de uma radiossonda é complexa e custosa, dependendo de sensores, condicionamento de sinal, hardware, software e interfaces de comunicação, de modo que o emprego do componente eletrônico Arduino reduz complexidade e custos consideravelmente (SOLOMAN, 2010; GALANTE; GARCIA, 2014).

Para tal, o componente eletrônico deve ser alocado em carcaça customizada, que pode ser produzida, por exemplo, em impressora 3D, cuja tecnologia viabiliza a redução de custos na transformação de materiais (JONES et al., 2011; ZUCCA, 2019). Seu emprego é cada vez mais popular, sendo aplicável em diversas áreas, com ênfase em prototipagem (QUEIROZ; MAURÍCIO; MATRAKAS, 2019).

Nessa perspectiva, projetos têm sido conduzidos a fim de se desenvolver protótipos de radiossondas e perfiladores atmosféricos de baixo custo. Oliveira, Amorim e Dereczynski (2016) elaboraram uma radiossonda com uma placa de prototipagem Arduino Nano Versão 3.0, um sensor de pressão BMP180 (versão anterior ao BMP280 utilizado neste projeto) e um módulo de radiofrequência RF433MHz, e o recipiente de sua radiossonda era composto de isopor e plástico (conforme apresentado na Figura 15). Esse projeto foi concebido para alçar voo com um balão cheio de gás hélio e para que os dados fossem transmitidos por telemetria. Embora a placa Arduino Nano seja bastante restrita quanto à quantidade de dispositivos conectados a ela, os resultados demonstraram a empregabilidade da tecnologia Arduino para esse fim.

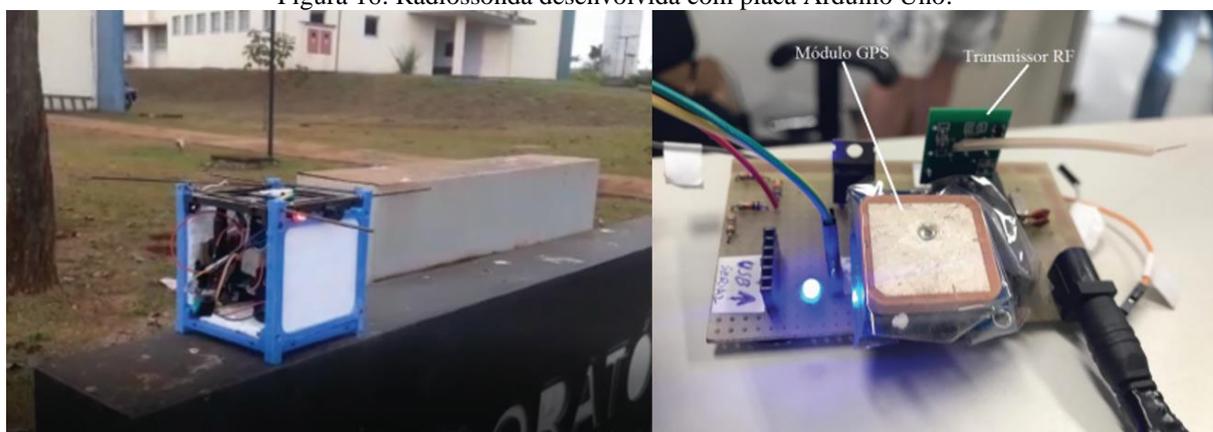
Figura 15: Radiossonda desenvolvida com placa Arduino Nano.



Fonte: Adaptado de Oliveira, Amorim e Dereczynski, 2016.

No caso de Sousa et al. (2022), eles criaram uma radiossonda com placa Arduino Uno (assim como neste projeto), um sensor de temperatura e umidade relativa DHT11 (versão anterior ao DHT22 utilizado neste projeto), um módulo de radiofrequência RF433MHz, um módulo GPS e uma antena do tipo Yagi-Uda com seu adaptador (conforme apresentado na Figura 16). Esse trabalho também foi concebido para uso de balão cheio de gás hélio, com o diferencial de dispor de transmissão de posição GPS para facilitar a localização da radiossonda após seu regresso ao solo.

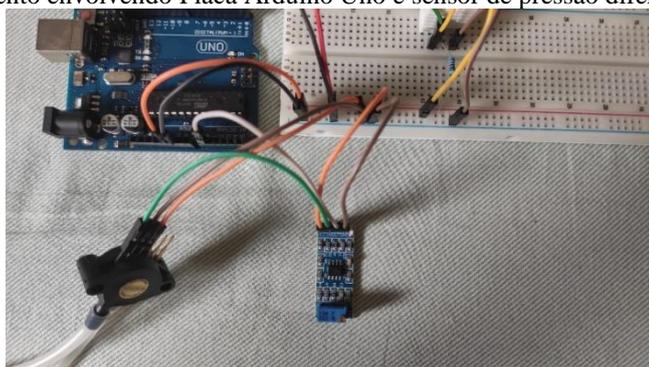
Figura 16: Radiossonda desenvolvida com placa Arduino Uno.



Fonte: Adaptado de Sousa et al., 2022.

Com ênfase na anemometria de um perfilador atmosférico de baixo custo, Ribeiro (2022) empregou uma placa Arduino Uno e um sensor de pressão diferencial MPX5100DP associado a um tubo de Pitot para a medição de fluxos de ar (conforme apresentado na Figura 17). Seu dispositivo foi submetido a diversos fluxos de ar num túnel de vento de baixo custo, o que lhe permitiu obter a curva de calibração do sensor. Ele também sugeriu que se usasse o sensor DHT22 para medições de temperatura e umidade relativa.

Figura 17: Experimento envolvendo Placa Arduino Uno e sensor de pressão diferencial MPX5100DP.



Fonte: Ribeiro, 2022.

Em colaboração com este estudo, Cataldi et al. (2022) desenvolveram um equipamento baseado na placa Arduino Uno juntamente com o sensor de temperatura e umidade relativa DHT22, o sensor de pressão BMP280 e o sensor de pressão diferencial MPX5100DP. Esse equipamento foi transportado pelo drone Phantom 3 Standard da marca DJI com a caixa do equipamento fixa à sua base. Os resultados apontaram para a viabilidade do emprego dos sensores DHT22 e BMP280 para medição de parâmetros atmosféricos, assim como do sensor MPX5100DP para tratamento da influência do ar descendente das hélices do drone nas medições.

Também se tem obtido resultados satisfatórios com o embarque de sensores e seus componentes eletrônicos associados em aeronaves remotamente pilotadas (ARP), traduzido do inglês *remotely-piloted aircrafts* (RPA). Masic et al. (2021) conduziu um experimento no qual foi empregado um drone experimental robusto de seis hélices para lançamento de sensores de temperatura e material particulado em suspensão (apresentado na Figura 18). Nesse estudo, os elementos envolvidos na medição foram dispostos sobre a carcaça do drone a fim de se evitar a influência do ar descendente das hélices, o que só foi possível devido ao afastamento das hélices para o corpo do drone.

Figura 18: Drone experimental utilizado para transporte de instrumento sensor.



Fonte: Masic et al.,2021.

Outro experimento agregando o uso de drone com prototipagem em Arduino para obtenção de dados atmosféricos (conforme apresentado na Figura 19) propôs que tal tecnologia pode ser especialmente útil para a segurança da aviação, sendo capaz de fornecer parâmetros

como temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica (KARACHALIOS; KANELLOPOULOS; LAZARINIS, 2021).

Figura 19: Drone experimental com componentes Arduino embarcados.



Fonte: Karachalios; Kanellopoulos; Lazarinis, 2021.

Nesse ínterim, Laitinen (2019) acoplou uma sonda Vaisala RD41 à parte de baixo do drone Matrice 600 Pro da marca DJI, de modo que as hélices ficaram bastante espaçadas do sensor (conforme apresentado na Figura 20). Seu experimento teve como objetivo a medição de temperatura e umidade relativa, alcançando aproximadamente 450 metros de altitude. Dentre seus resultados, esse estudo considerou que o ar oriundo das hélices pode ser uma problemática a se enfrentar.

Figura 20: Drone de modelo Matrice 600 Pro, da marca DJI, utilizado para transporte de instrumento sensor.



Fonte: Laitinen, 2019.

Assim, aeronaves remotamente pilotadas podem ser especialmente úteis para coleta de dados estatísticos da atmosfera, sendo de grande valia para estudos meteorológicos (RIVA, 2020).

Luz Barcellos (2019), que trabalhou com a otimização do modelo numérico WRF por meio da adaptação de suas constantes paramétricas, recomenda que sejam conduzidos experimentos atmosféricos envolvendo sensores de baixo custo e drones, uma vez que a demanda por recursos financeiros é baixa e que seus resultados podem apresentar uma alta relevância.

Portanto, a fim de se evitar o alto custo relacionado ao uso de radiossondas, este trabalho é conduzido junto ao Laboratório de Monitoramento e Modelagem Numérica de Sistemas Climáticos (LAMMOC) da Universidade Federal Fluminense (UFF) a fim de se utilizar um perfilador para medição de parâmetros atmosféricos, de tecnologia própria, com base em prototipagem Arduíno, para ser embarcado em drone.

3.2 Aplicações do modelo numérico Weather Research and Forecasting

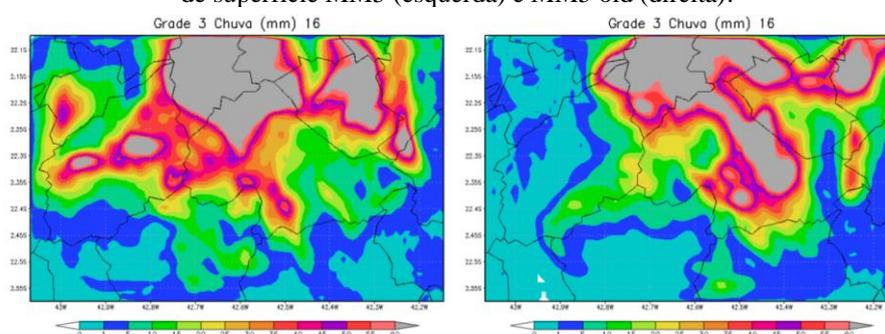
O modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF) dispõe de diversas apresentações de resultados e pode ser utilizado em variados propósitos, tais como prognósticos do tempo para disseminação de alertas meteorológicos ou ainda para a previsão da trajetória de furacões para subsidiar mobilizações e abrigo de pessoas.

Luz Barcellos (2019), ao estudar desastres naturais na Região Serrana do Rio de Janeiro, realizou ajustes em parametrizações do WRF (conforme apresentado na Figura 21), substituindo valores de constantes paramétricas e comparando suas simulações com aquelas geradas sem tal modificação, o que apresentou um resultado bastante proveitoso que lhe permitiu não apenas sugerir maiores estudos nesse sentido, como também que campanhas de experimentação atmosféricas fossem empreendidas em prol desse objetivo. Especificamente no tocante à parametrização de camada de superfície, foi constatado que sua adaptação interfere na intensidade e na distribuição espacial da precipitação prevista.

Vanzan (2020), que trabalhou em melhorar a previsão da trajetória de furacões no Oceano Atlântico, utilizou o modelo WRF para estudar o furacão Irma, que causou grandes impactos socioeconômicos na região do Caribe e do sudeste dos Estados Unidos em 2017. Para tanto, conjuntos de parametrizações foram testados a fim de se verificar se seria possível aprimorar a previsão da trajetória desse tipo de evento extremo (conforme apresentado na Figura 22). Atendendo às especificidades de seu trabalho, simulações foram conduzidas envolvendo

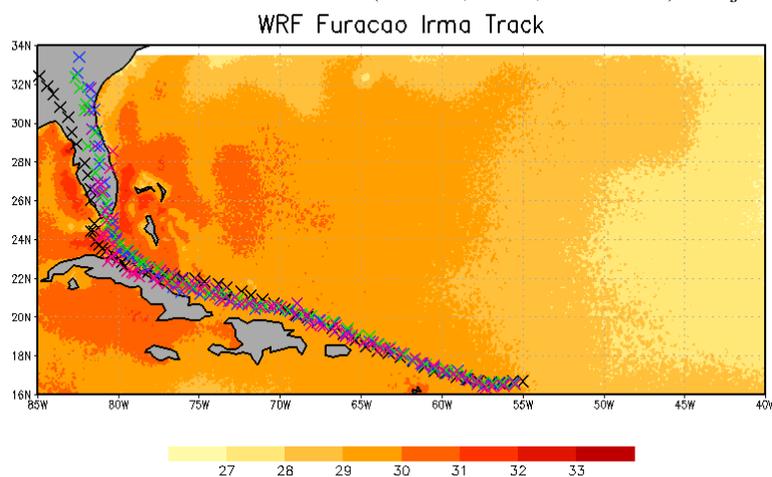
sete parâmetros desse modelo, quais sejam: camada de superfície, camada limite planetária, turbulência e difusão, microfísica de nuvens e precipitação, radiação transferida através da atmosfera, convecção de cumulus e, finalmente, interação com a superfície terrestre. Além disso, foi empregada a Temperatura da Superfície do Mar RTG (TSM RTG) no modelo. Em suas conclusões fica evidenciado que adaptar os conjuntos de parametrizações do WRF gera melhores prognósticos de furacões, contribuindo significativamente para a acurácia de alerta meteorológicos.

Figura 21: Precipitação acumulada (mm) em 3h para 12/01/2011 às 00Z utilizando parametrizações de camada de superfície MM5 (esquerda) e MM5 old (direita).



Fonte: Adaptado de Luz Barcellos, 2019.

Figura 22: Trajetórias simuladas do Furacão Irma (em azul, verde, rosa e roxo) x trajetória real (em preto).



Fonte: Adaptado de Vanzan, 2020.

No caso deste estudo, o WRF é empregado como ferramenta de análise comparativa ao gerar perfis verticais com temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica previstos por modelagem numérica, os quais são contrapostos aos perfis gerados por dados coletados em campo por instrumentação de baixo custo embarcada em drone.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são expostos os materiais empregados na obtenção dos resultados, assim como a metodologia que abrange cada elemento associado à sua funcionalidade específica.

Assim, é dada ênfase na prototipagem em Arduino, detalhando os passos necessários para a elaboração de um perfilador atmosférico de baixo custo, abordando os dispositivos principais e acessórios, a montagem e a configuração, a calibração dos dispositivos sensores e, por fim, os custos de implementação relacionados ao projeto em lide.

Depois disso, aborda-se o tratamento da influência do ar descendente das hélices do drone nas medições que foi realizado para que se pudesse decidir a distância ideal de transporte do perfilador pelos drones.

Destaca-se em seguida o teste de carga com o anemômetro ultrassônico PRSens, que foi realizado para se verificar a possibilidade de empregá-lo para medições de velocidade e direção do vento juntamente com os drones, de modo semelhante ao que é feito com o perfilador de baixo custo.

Após isso, trata-se da caracterização de cada campanha de medição, o que engloba os testes de voo, o tratamento da influência do ar descendente das hélices e a experimentação atmosférica, para os quais são listadas informações como local da experimentação, data, horário e condições reinantes do tempo.

Por fim, é abordado o emprego do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para modelagem numérica de dados ambientais, assim como seu pós-processamento para geração de perfis verticais atmosféricos com o pacote de rotinas de programação WRF-Python.

4.1 Perfilador atmosférico de baixo custo

Uma vez considerada como parte dos objetivos a implementação de um perfilador atmosférico de baixo custo que seja capaz de captar dados atmosféricos, a primeira etapa consiste em buscar no mercado comum uma tecnologia eletrônica e programável, cujos custos possam ser considerados baixos em relação aos valores de radiossondas consagradas quer seja pelo uso científico, quer seja pelo emprego em larga escala com fins econômicos.

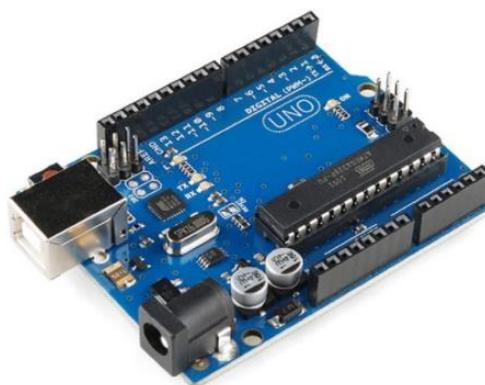
Com o intuito de apresentar os elementos necessários ao projeto, os dispositivos são listados separadamente, destacando-se suas propriedades principais e, em seguida, são descritos os processos relacionados à montagem, configuração, calibração e, finalmente, a seu custo.

4.1.1 Dispositivos principais e acessórios

Como citado anteriormente, a placa Arduino Uno (apresentado na Figura 23) é uma placa microcontroladora de prototipagem baseada no microcontrolador ATmega328P. Sua alimentação pode se dar por computador (o que é especialmente útil para testes de bancada), bateria (como é feito neste estudo) ou adaptador de corrente alternada para contínua. Mais ainda, em caso de mau-funcionamento no microcontrolador, ele pode substituído com pouco trabalho e baixo dispêndio financeiro.

Justamente em função de suas funcionalidades se adequarem aos objetivos do projeto em questão, assim como por causa do baixo custo não apenas de sua aquisição, mas também dos demais sensores e dispositivos acessórios envolvidos, que se optou por essa via de prototipagem.

Figura 23: Placa para prototipagem Arduino Uno.

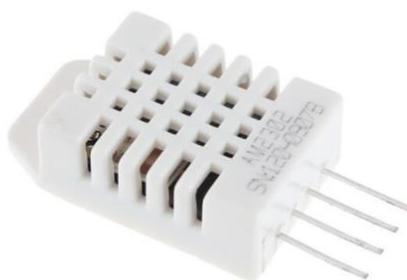


Fonte: Ribeiro, 2022.

Definida a placa a ser utilizada, o próximo passo consiste na escolha dos dispositivos sensores. Como critérios dessa escolha foram considerados a adaptabilidade à placa Arduino Uno, o custo de aquisição, os resultados de trabalhos anteriores numa linha de pesquisa similar e as descrições técnicas dos dispositivos.

Diante disso, para a medição da temperatura e da umidade relativa do ar, foi escolhido o DHT22 (apresentado na Figura 24), pois ele se adapta à placa de prototipagem, seu custo é baixo (conforme apresentado na Tabela 8) e o DHT11 (sua versão anterior) teve boa empregabilidade no estudo de Sousa et al. (2022). Além disso, na comparação de descrições técnicas, constatou-se que o DHT22 (cujas descrições constam na Tabela 1) tem acurácia duas vezes superior à de seu antecessor.

Figura 24: Sensor DHT22, utilizado para a medição de temperatura e umidade relativa do ar.



Fonte: Ribeiro, 2022.

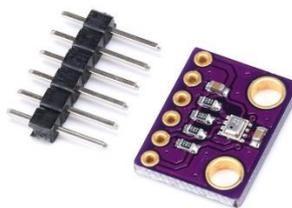
Tabela 1: Descrições técnicas do sensor de temperatura e umidade relativa do ar DHT22.

Descrições técnicas do sensor de temperatura e umidade relativa do ar DHT22	
Alimentação	3,3 - 6 V DC
Faixa de operação	Umidade 0 - 100% UR; Temperatura -40 - 80 °C
Acurácia	Umidade $\pm 2\%$ UR (Máx $+5\%$ UR); Temperatura $\pm 0,5$ °C
Resolução	Umidade 0,1% UR; Temperatura 0,1 °C
Estabilidade de longo prazo	$\pm 0,5\%$ UR/ano

Fonte: adaptado pelo autor diretamente da ficha técnica do equipamento.

Para a medição da pressão atmosférica, assim como para o cálculo da altura em função da pressão medida, foi escolhido o BMP280 (apresentado na Figura 25), pois, considerados os mesmo critérios, ele se adapta à placa Arduino Uno, apresenta baixo custo (conforme apresentado na Tabela 8), seu antecessor, o BMP180, foi empregado com êxito no trabalho de Oliveira, Amorim e Dereczynski (2016) e na comparação de descrições técnicas foi constatado que a acurácia de ambos era semelhante em relação ao valor central, mas a faixa de incerteza do BMP180 poderia fazer com que os erros atingissem até mais do que o dobro daqueles possíveis na faixa do BMP280 (cujas descrições técnicas constam na Tabela 2).

Figura 25: Sensor BMP280, utilizado para a medição de pressão atmosférica e cálculo da altura em função da pressão medida.



Fonte: robocore.net

Tabela 2: Descrições técnicas do sensor de pressão atmosférica BMP280, também utilizado para o cálculo da altura em função da pressão medida.

Descrições técnicas do sensor de pressão atmosférica BMP280	
Alimentação	1,71 - 3,6 V DC
Faixa de operação	300 - 1100 hPa
Acurácia	+1,0 hPa (Máx +1,7 hPa)
Resolução	0,16 Pa
Estabilidade de longo prazo	+1,0 hPa/ano

Fonte: adaptado pelo autor diretamente da ficha técnica do equipamento.

Considerando que o perfilador atmosférico alça voo embarcado num drone, faz-se necessário tratar a influência do ar descendente das hélices do drone nas medições. Para isso, escolheu-se empregar o sensor de pressão diferencial MPX5100DP (apresentado na Figura 26, para o qual suas descrições técnicas constam na Tabela 3), pois, semelhantemente ao que se considerou para a escolha dos sensores DHT22 e BMP280, ele pode ser empregado com placa Arduino Uno, tem baixo custo (conforme apresentado na Tabela 8) e seus resultados no trabalho de Ribeiro (2022) foram não apenas satisfatórios, mas também forneceram uma curva de calibração desse sensor, colaborando ainda mais para os objetivos desta pesquisa.

Figura 26: Sensor MPX5100DP, utilizado para a medição de pressão diferencial e cálculo da velocidade do vento em função da pressão medida.



Fonte: Ribeiro, 2022.

Tabela 3: Descrições técnicas do sensor MPX5100DP, utilizado para a medição de pressão diferencial e cálculo da velocidade do vento em função da pressão medida.

Descrições técnicas do sensor de pressão diferencial MPX5100DP	
Alimentação	4,75 - 5,25 V DC
Faixa de operação	0 - 100 kPa
Acurácia	+/-2,5 %
Resolução	0,045 V/kPa
Estabilidade de longo prazo	+/-0,5 %/1000h

Fonte: adaptado pelo autor diretamente da ficha técnica do equipamento.

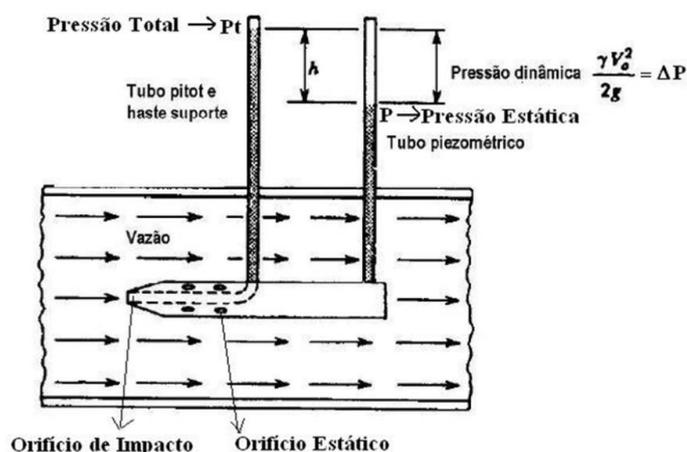
A pressão diferencial é captada pelo sensor MPX5100DP devido ao emprego de um tubo de Pitot (apresentado na Figura 27), que é um dispositivo que apresenta dois canais de medição de pressão diferentes, sendo o canal de pressão total aquele cujo orifício de entrada de ar é voltado para a direção de seu fluxo, o que o permite ser chamado de orifício de impacto, e o canal de pressão estática que é aquele cujo orifício não é voltado para a direção do fluxo de ar, o que o permite ser chamado de orifício estático. Disso resulta uma pressão diferencial, ou dinâmica, que é descrita como a diferença entre as pressões total e estática (conforme diagrama de funcionamento apresentado na Figura 28).

Figura 27: Tubo de Pitot associado ao sensor MPX5100DP, utilizado exposto ao vento gerado pelo drone.



Fonte: mercadolivre.com.br

Figura 28: Diagrama de funcionamento de um tubo de Pitot.



Fonte: Adaptado de Ribeiro,1997.

Ressalta-se que foram dispostos pequenos tubos de silicone (apresentados na Figura 29) entre o sensor e o tubo de Pitot, visto que é necessário que este fique exposto ao vento, diferentemente dos demais dispositivos.

Figura 29: Pequenos tubos de silicone, utilizados para conectar o tubo de Pitot ao sensor MPX5100DP.



Fonte: mercadolivre.com.br.

Escolhidos os dispositivos sensores, faz-se necessário dispor juntamente a eles alguns dispositivos acessórios. Para tais elementos, os critérios de escolha foram tão somente a adaptabilidade aos componentes principais (isto é, a placa de prototipagem e seus sensores de temperatura e umidade relativa, pressão, e pressão diferencial) e seu baixo custo.

Isso considerado, é necessário empregar um dispositivo capaz de registrar os horários da aquisição dos dados, considerando que se busca sincronizar as medições dos sensores e que a própria atmosfera apresenta flutuabilidade diária nos parâmetros medidos, de modo que a noção do horário das medições influencia na interpretação dos dados. Desse modo, o dispositivo escolhido para esse fim foi o RTC (*Real Time Clock*) DS3231 (apresentado na Figura 30), cujas descrições técnicas constam na Tabela 4, o qual funciona como um relógio programável movido à bateria dos tipos CR 2032 (não recarregável, comercializada juntamente com o RTC, e que foi usada neste projeto) ou LIR2032 (recarregável, porém mais onerosa financeiramente).

Figura 30: Relógio programável RTC DS3231 utilizado para sincronia de medições e registro do tempo em horas, minutos e segundos.



Fonte: robocore.net

Tabela 4: Descrições técnicas do relógio programável RTC DS3231 utilizado para sincronia de medições e registro do tempo em horas, minutos e segundos.

Descrições técnicas do relógio programável RTC DS3231	
Alimentação	2,3 - 5,5 V DC
Faixa de operação	0 - 100 kHz
Acurácia	+2 ppm
Resolução	1 s
Estabilidade de longo prazo	+1 ppm/1 ^o ano ; +5 ppm/0 - 10 anos

Fonte: adaptado pelo autor diretamente da ficha técnica do equipamento.

Outra necessidade a ser atendida é a gravação dos dados, para a qual optou-se pelo uso de um módulo de cartão MicroSD (Micro Secure Digital), apresentado na Figura 31, cujas descrições técnicas constam na Tabela 5. O cartão MicroSD associado a ele possui capacidade de armazenamento de 8,0 GB, o que permite com que toda a gravação de dados ocorra sem interrupções, considerando que os arquivos de dados gerados em extensão .csv são da ordem de KB.

Figura 31: Módulo de cartão MicroSD utilizado para gravação de dados.



Fonte: Ribeiro, 2022.

Tabela 5: Descrições técnicas do módulo de cartão MicroSD utilizado para gravação de dados.

Descrições técnicas do módulo de cartão Micro SD	
Alimentação	4,5 - 5,5 V DC
Capacidade de armazenamento	conforme Micro SD inserido (8,0 GB neste caso)

Fonte: adaptado pelo autor diretamente da ficha técnica disponibilizada pelo fornecedor.

A alimentação do perfilador atmosférico foi estabelecida por meio de um carregador portátil do tipo *power bank*, modelo CB077, da marca Multilaser (apresentado na Figura 32), e, posteriormente, por uma bateria recarregável de 9V da marca Elgin (apresentada na Figura 33) que atendem satisfatoriamente às expectativas de autonomia do perfilador em operação.

Figura 32: Carregador portátil do tipo *power bank*, modelo CB077, da marca Multilaser.



Fonte: Infotecline.com.br

Figura 33: Bateria recarregável de 9V, da marca Elgin.



Fonte: reciclemaiscartuchos.com.br

Para armazenar o conjunto componente do perfilador atmosférico de baixo custo, utilizou-se duas caixas retangulares de papelão em função da modalidade de alimentação, sendo a maior para o *power bank* e a menor para a bateria recarregável de 9V. Foram feitos furos nas laterais tanto da caixa maior (apresentada na Figura 34) quanto da menor (apresentada na Figura 35) para facilitar a comunicação entre ar externo e interno. Tais medidas foram tomadas a fim de se evitar enviesamento nas medições. Para viabilizar a fixação das caixas aos drones com fio de poliamida, furos menores foram feitos nas duas quinas superiores de cada lateral (totalizando oito furos) em ambas as caixas.

Figura 34: Caixa retangular de papelão maior com furos nas laterais.



Fonte: autor.

Figura 35: Caixa retangular de papelão menor com furos nas laterais.



Fonte: autor.

Por fim, para transporte da caixa e de seus dispositivos sensores, decidiu-se pela utilização dos drones de modelo Phantom 3 Standard (apresentado na Figura 36, com descrições técnicas conforme Tabela 6) e Mavic Air 2 (apresentado na Figura 37, com descrições técnicas conforme Tabela 7), ambos da marca DJI.

Cabe destacar que os drones são considerados aeronaves remotamente pilotadas, como preconizado pela Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC) no Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial nº 94, emenda nº 2 (BRASÍLIA, 2021). Mais ainda, o item E94.5 desse regulamento descreve que as aeronaves utilizadas neste estudo são de classe 3, pois seus pesos máximos de decolagem são inferiores a 25 kg.

Sobre o emprego dos drones em voo, é importante mencionar que parte dos objetivos desta pesquisa envolve a coleta de dados no interior da camada de superfície. Assim, a experimentação atmosférica buscou alcançar a máxima altura permitida pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), que corresponde a 400 pés, ou aproximadamente 120 metros, a fim de que os dados de campo possam subsidiar uma comparação analítica mais robusta em relação ao perfil vertical da atmosfera gerado nas rodadas do WRF.

Figura 36: Drone Phantom 3 Standard da marca DJI.



Fonte: dji.com/br/phantom-3-standard

Tabela 6: Descrições técnicas do drone DJI Phantom 3 Standard.

Descrições técnicas do drone DJI Phantom 3 Standard	
Drone	
Quantidade de rotores	4
Peso	1,216 Kg
Velocidade máxima	16,0 m/s (horizontal) / 5,0 m/s (em subida) / 3,0 m/s (em descida)
Distância omnidirecional máxima	1,0 Km
Método de estabilização	Estabilizador tipo Gimbal
Sistema de posicionamento	GPS
Capacidade da bateria	4480 mAh
Autonomia de voo	25 minutos
Resolução de imagem	12 megapixels
Resolução de vídeo	2,7K / 30 fps
Controle remoto	
Frequência de operação	2,4 GHz
Capacidade da bateria	2600 mAh

Fonte: Adaptado do manual do usuário.

Figura 37: Drone Mavic Air 2 da marca DJI.



Fonte: dji.com/br/mavic-air-2

Tabela 7: Descrições técnicas do drone DJI Mavic Air 2.

Descrições técnicas do drone DJI Mavic Air 2	
Drone	
Quantidade de rotores	4
Peso	570 g
Velocidade máxima	19,0 m/s (horizontal) / 4,0 m/s (em subida) / 3,0 m/s (em descida)
Distância omnidirecional máxima	18,5 Km
Método de estabilização	Estabilizador tipo Gimbal
Sistema de posicionamento	GPS / GLONASS
Capacidade da bateria	3500 mAh
Autonomia de voo	34 minutos
Resolução de imagem	48 megapixels
Resolução de vídeo	4K / 60 fps

Controle remoto	
Frequência de operação	2,4 GHz
Capacidade da bateria	5200 mAh

Fonte: Adaptado do manual do usuário.

4.1.2 Montagem e configuração

Dispostos todos os elementos necessários à confecção do perfilador atmosférico de baixo custo, o próximo passo consiste em sua montagem, para sua posterior configuração por meio de *script* de programação.

Considerando que os *jumpers* são maleáveis, os dispositivos DHT22, BMP280, RTC DS3221, módulo de cartão MicroSD e lâmpada de LED foram conectados diretamente na matriz de contato (*Protoboard*), e a partir dela foram feitas as conexões com a placa Arduino Uno por meio de *jumpers*. Essa estruturação permitiu aos dispositivos estarem presos mais firmemente. O resistor de 220Ω foi ligado à lâmpada de LED e o resistor de $10K\Omega$ foi ligado ao DHT22. Excepcionalmente no caso do MPX5100DP, como seus pinos não são acopláveis na matriz de contato, sua conexão com ela se deu por meio de *jumpers*.

Os *jumpers* também foram necessários tanto para o estabelecimento de alimentação, fazendo conexão com 5V, 3,3V e GND (aterramento, do termo em inglês *ground*), quanto para comunicação com os pinos digitais e analógicos da placa Arduino Uno.

Ao módulo de cartão MicroSD foi inserido um cartão MicroSD de 8,0 GB de capacidade de armazenamento e ao RTC DS3231 foi inserida uma bateria de lítio CR2032. Quanto aos tubos de silicões, dois tubos foram utilizados, de modo que cada um deles teve uma extremidade ligada ao MPX5100DP (internamente à caixa de armazenamento) e a outra extremidade ligada ao tubo de Pitot (externamente à caixa de armazenamento). A montagem pode ser compreendida com maiores detalhes ao se analisar as vistas superiores das caixas do perfilador atmosférico de baixo custo abertas. Ao longo do projeto foram utilizadas uma caixa maior (apresentada na Figura 38) para que fosse possível utilizar o *power bank* e, posteriormente, uma menor (apresentada na Figura 39), pois a alimentação passou a ser estabelecida por uma bateria recarregável de 9V, conforme citado anteriormente. Quanto às conexões eletrônicas do perfilador, é possível analisá-las pelo diagrama desenvolvido no *software* Fritzing versão 0.9.3 (apresentado na Figura 40).

Figura 38: Vista superior da caixa maior do perfilador atmosférico de baixo custo aberta.



Fonte: autor.

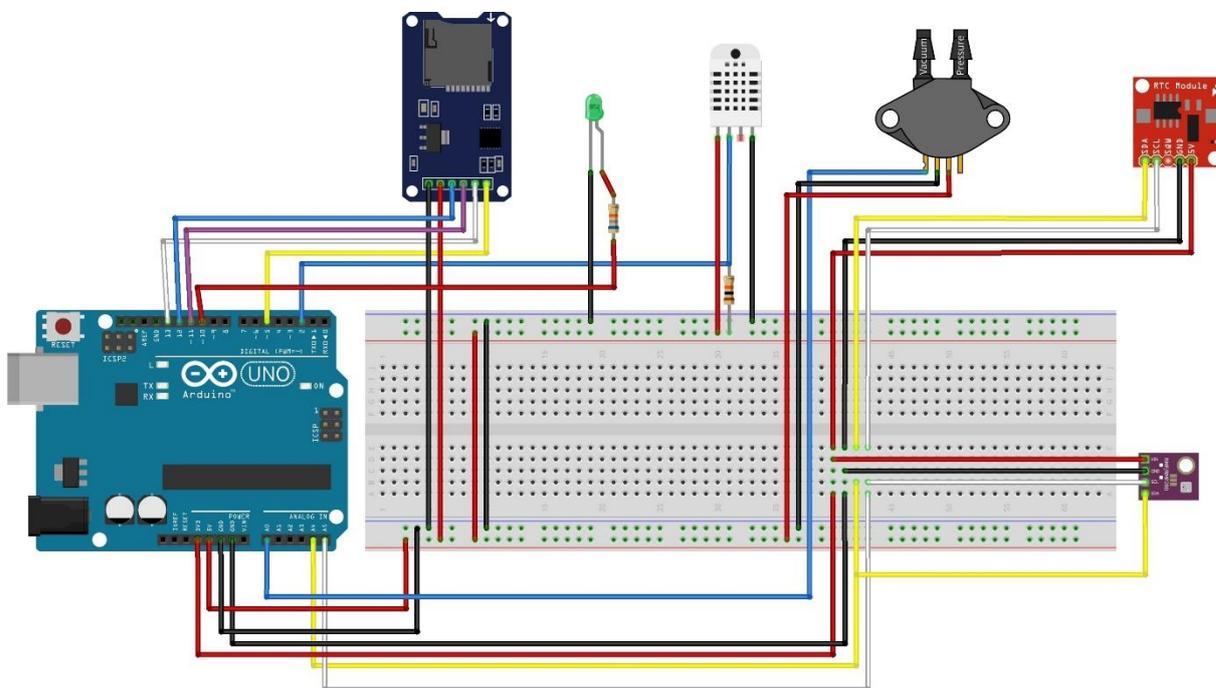
Figura 39: Vista superior da caixa menor do perfilador atmosférico de baixo custo aberta.



Fonte: autor.

Logo em seguida à montagem, inicia-se a fase de configuração, na qual o *script* de programação, gerado por meio do *software* Arduino versão 1.8.19, é importado do computador para a placa Arduino Uno por meio do cabo USB 2.0 A/B. Esse *script* é responsável por fornecer à placa todos os comandos lógicos que serão cumpridos não somente por ela, mas também pelos dispositivos conectados a ela. A lógica de formação desse *script* é demonstrada na Figura 41, assim como o *script* completo utilizado pelo perfilador atmosférico em operação encontra-se no Apêndice A.

Figura 40: Diagrama de conexões do perfilador atmosférico de baixo custo gerado no *software* Fritzing versão 0.9.3. Na parte superior, da esquerda para a direita: módulo de cartão MicroSD, lâmpada de LED verde, DHT22, MPX5100DP e RTC DS3231. Na parte inferior, da esquerda para a direita: placa Arduino Uno, matriz de contato (*Protoboard*) e BMP280.

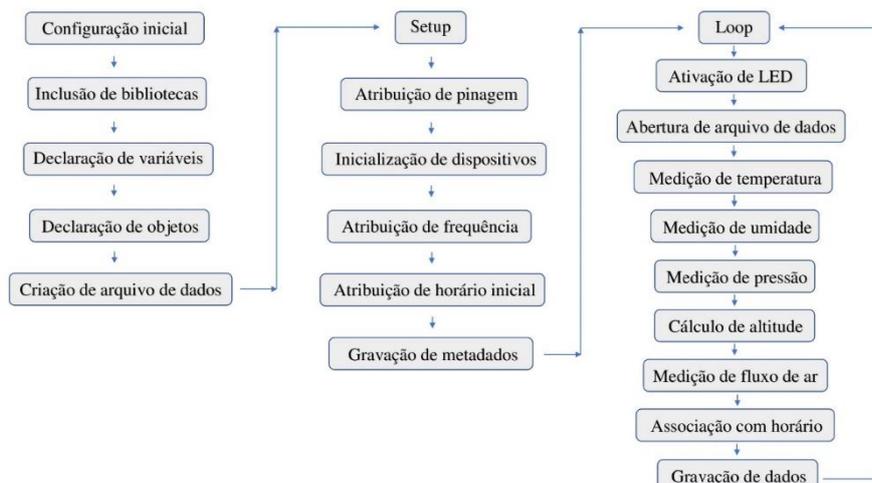


Fonte: autor.

Quanto à linguagem de programação utilizada nesse *script*, ela se chama “Arduino”, semelhantemente ao nome da placa na qual é compilada, e é baseada na linguagem C++ (que é uma linguagem de programação muito utilizada na computação desde a década de 1980). Para que um programa com a linguagem Arduino seja compilado numa placa é necessário fazê-lo por meio de um ambiente de desenvolvimento próprio, chamado *Arduino Integrated Development Environment* (Arduino IDE), que é um aplicativo de computador com compilador integrado (apresentado na Figura 42). Essa é uma linguagem de programação bastante versátil, disponível para os sistemas operacionais macOS, Linux e Windows.

Cabe mencionar que a taxa de amostragem de dados escolhida para esse *script* foi de 10 segundos, isto é, toda a sua lógica de programação e toda a rodada de gravação de dados são assimiladas e reiniciadas após o transcorrer desse período.

Figura 41: Lógica de script importado para placa Arduino Uno.



Fonte: autor.

Figura 42: Trecho de script no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE.

```

dht22-bmp280-mpx5100dp | Arduino 1.8.19
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

//SCRIPT DE INSTRUMENTO SENSOR (SENSORES DHT22, BMP280 E MPX5100DP)
//
// Feito por David Christian de Lima Ferreira

//BIBLIOTECAS
#include <DHT.h> //TEMPERATURA
#include <DHT_U.h> //UMIDADE
#include <SPI.h> //COMUNICAÇÃO DO MODULO SDCARD
#include <SD.h> //CARTÃO SDCARD
#include <Wire.h>
#include <DS3231.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
  
```

Fonte: autor.

4.1.3 Calibração dos dispositivos sensores

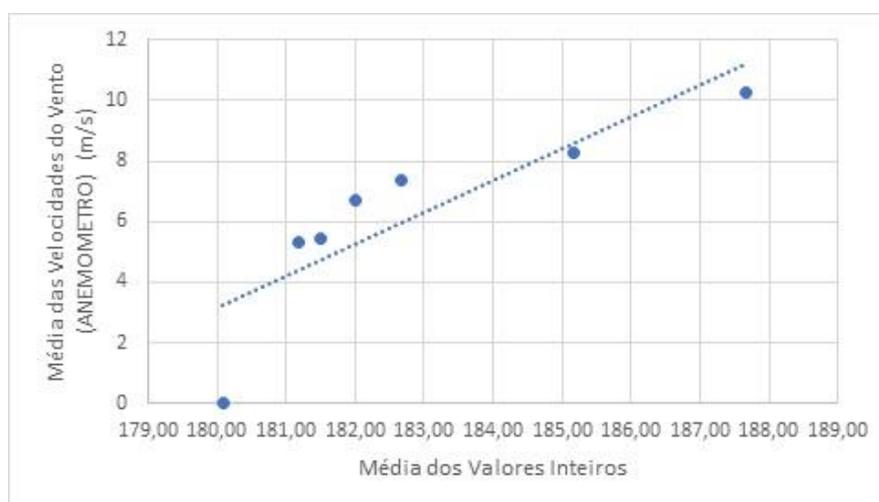
Uma vez montado e configurado o perfilador atmosférico, o próximo passo consiste na calibração dos seus dispositivos sensores, quais sejam o DHT22, o BMP280 e o MPX5100DP.

Os sensores DHT22 e BMP280 possuem calibração feita por seus fabricantes. No caso do DHT22, sua acurácia para medição de temperatura é $<+-0,5$ °C e para a medição de

umidade relativa do ar é +-2% do valor medido (oscilando ao máximo de +-5% desse valor). No caso do BMP280, sua acurácia para medição da pressão atmosférica é +-1,0 hPa (oscilando ao máximo de +-1,7 hPa). Tais valores, além de outras descrições técnicas, estão dispostos na Tabela 1 para o DHT22 e na Tabela 2 para o BMP280. Assim, tais referências de calibração foram admitidas para este estudo.

O sensor MPX5100DP também possui calibração realizada por fabricante, de modo que sua acurácia é +-2,5% (esse valor e outras descrições técnicas estão dispostos na Tabela 3). Para esse sensor, no entanto, foi conduzida também uma calibração própria. Ribeiro (2022) desenvolveu um túnel de vento de baixo custo e submeteu o MPX5100DP a diversas velocidades de vento, registrando os resultados obtidos, o que lhe permitiu ajustar uma regressão linear da curva que abrange os pontos de amostragem, obtendo, assim, uma curva de calibração (conforme apresentado na Figura 43) com sua respectiva equação (apresentada a seguir na equação 2), na qual se considera x como os valores inteiros de resposta do sensor e y como os valores de velocidade do vento, em m/s (variável que se deseja conhecer).

Figura 43: Curva de calibração do sensor MPX5100DP.



Fonte: Ribeiro, 2022.

$$y = 1,0424x - 184,46 \quad (2)$$

Assim, essa equação de calibração foi utilizada no *script* de programação importado para a placa de prototipagem Arduino Uno.

4.1.4 Custo de implementação

A montagem e a configuração do perfilador atmosférico tornam o projeto exequível materialmente, mas seu custo de implementação também deve ser considerado. A proposta de emprego de um perfilador atmosférico de baixo custo visa a atender amplamente a comunidade científica, gerando dados ambientais de boa qualidade demandando recursos orçamentários reduzidos. Portanto, é fundamental que seja feita uma comparação entre os custos envolvidos com a execução deste projeto em relação ao praticado no uso comercial de radiossondas. Tal comparativo é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Comparativo entre perfilador atmosférico de baixo custo deste projeto e instrumentos de uso comercial.

Comparativo entre instrumentos de sondagem atmosférica (baixo custo e comerciais)	
Instrumentos de baixo custo	
Placa Arduino Uno (com cabo USB)	US\$ 25,81
Módulo de cartão MicroSD	US\$ 1,73
Cartão MicroSD	US\$ 4,83
DHT22	US\$ 10,27
RTC DS3231	US\$ 7,75
BMP280	US\$ 2,64
MPX5100DP	US\$ 56,12
Lâmpada de LED	US\$ 0,06
Matriz de contato <i>Protoboard</i>	US\$ 3,30
Tubo de Pitot (com tubos de silicone)	US\$ 18,74
Linha de poliamida simples	US\$ 3,43
Linha de poliamida de pesca	US\$ 0,79
Linha de poliamida grossa	US\$ 4,59
Caixa de papelão maior	US\$ 0,58
Caixa de papelão menor	US\$ 0,52
Mosquetão com trava e olhal	US\$ 4,59
Bateria <i>Power Bank</i> Multilaser	US\$ 10,64
Bateria recarregável de 9V Elgin	US\$ 4,99
Suporte para bateria de 9V com plug P4	US\$ 0,76
Carregador de baterias MO-CP50 Mox	US\$ 7,55
Fita adesiva dupla face 3M	US\$ 6,35
Fita adesiva silver tape 3M	US\$ 3,73
Fita adesiva isolante preta 3M	US\$ 2,60
Fita adesiva isolante branca 3M	US\$ 2,52
Plástico autoadesivo Con-Tact	US\$ 3,48
Resistor 10K Ω 1/4W	US\$ 0,56
Resistor 68K Ω 1/4W	US\$ 0,56
Cabos <i>jumpers</i> macho-macho	US\$ 1,92
Cabos <i>jumpers</i> macho-fêmea	US\$ 1,92

Subtotal (sem drone)	US\$ 193,33
Drone DJI Phantom 3 Standard	US\$ 446,60
Drone DJI Mavic Air 2	US\$ 1.883,60
Total (com Drone DJI Phantom 3 Standard)	US\$ 639,93
Total (com Drone DJI Mavic Air 2)	US\$ 2.076,83
Instrumentos comerciais	
Radiossonda RS41-SG Vaisala	US\$ 37,17
Radiossonda RS92 Vaisala	US\$ 49,86
Balão meteorológico SSTL 800g	US\$ 109,16
Cilindro de gás hélio MAT 40 L (6 m ³)	US\$ 426,36
Gás hélio Air Liquide (6 m ³)	US\$ 873,79
Total (com radiossonda RS41-SG Vaisala)	US\$ 1.446,48
Total (com radiossonda RS92 Vaisala)	US\$ 1.459,17

Fonte: autor.

A análise da Tabela 8 permite que se entenda que um dos diferenciais positivos da implementação do projeto do perfilador atmosférico de baixo custo consiste primordialmente na possibilidade de se realizar lançamentos indefinidamente.

Vale ressaltar que os valores de radiossonda comerciais apresentados estão entre os mais baixos do mercado. Partindo do valor mais barato de radiossonda comercial apresentado e considerando a hipótese de que um observador meteorológico comumente realiza quatro observações atmosféricas diárias nos horários sinóticos (0h, 6h, 12h e 18h GMT), pode-se dizer que seu custo seria de US\$ 4.080,48 por dia (considerando o conjunto de radiossonda, balão meteorológico e gás hélio para cada um dos quatro lançamentos diários), o que corresponde a mais de 21 vezes o subtotal (sem drone) e a quase o dobro do total (com drone, no caso mais caro) do perfilador atmosférico de baixo custo.

Em valores aproximados, conclui-se que com o valor de apenas um dia de observação atmosférica é possível construir 21 perfiladores atmosféricos de baixo custo (sem drone). O resultado mais direto disso é viabilizar com que pesquisas voltadas ao monitoramento ambiental sejam francamente expandidas nos mais diversos âmbitos, tais como universidades e iniciativas privadas.

4.2 Tratamento da influência do ar descendente das hélices do drone nas medições

Os dois primeiros testes de voo com o perfilador atmosférico de baixo contaram com fios de poliamida simples para transporte do perfilador pelo drone DJI Phantom 3 Standard, de modo que o perfilador foi mantido distante no primeiro e próximo no segundo (maiores detalhes na seção de caracterização das campanhas de medição).

Especificamente para o segundo teste, o perfilador passou a contar com medição de vento pelo uso do sensor de pressão diferencial MPX5100DP. Com essa medição, ficou notório que a influência do ar descendente gerado pelas hélices dos drones deveria ser estudada.

Assim, para esse estudo, foram utilizados os drones DJI Phantom 3 Standard e DJI Mavic Air 2 e o anemômetro Akrom KR835 (conforme Figura 44), cujas descrições constam na Tabela 9. E o local escolhido foi o campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF).

Figura 44: Anemômetro Akrom KR835.



Fonte: mercadolibre.com.br

Tabela 9: Descrições técnicas do anemômetro Akrom KR835.

Descrições técnicas do anemômetro Akrom KR835	
Alimentação	9 V DC (bateria 6F22)
Faixa de operação	0,4 - 30 m/s
Acurácia	+3,0 %
Resolução	0,1 m/s

Fonte: adaptado pelo autor diretamente da ficha técnica do equipamento.

A metodologia aplicada foi medir a velocidade do ar gerado pelas hélices para diferentes distâncias entre o anemômetro e os drones. O resultado esperado foi obter subsídios para a decisão a respeito de qual distância deve ser mantida entre o perfilador atmosférico de baixo custo e os drones para a realização da experimentação atmosférica (o que consta na seção de resultados e discussão).

4.3 Teste de carga com anemômetro ultrassônico PRSens

Os dispositivos principais e acessórios do perfilador atmosférico de baixo custo lhe conferem a capacidade de medir temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica sem restrições, mas a medição de vento realizada pelo sensor de pressão diferencial MPX5100DP é restrita à direção para a qual o tubo de Pitot, que está acoplado a ele, apontar.

Por isso, vislumbrou-se a possibilidade de se utilizar um equipamento que pudesse ser embarcado em drone para medir velocidade e direção do vento sem as restrições presentes no MPX5100DP. A solução adotada para essa finalidade foi realizar um teste de carga com o anemômetro ultrassônico PRSens (apresentado na Figura 45) pertencente ao LAMMOC, cujas descrições constam na Tabela 10.

Figura 45: Anemômetro ultrassônico PRSens.



Fonte: aliexpress.com

Tabela 10: Descrições técnicas do anemômetro ultrassônico PRSens.

Descrições técnicas do anemômetro ultrassônico PRSens	
Alimentação	10 V DC
Faixa de operação	0 - 60,0 m/s - 0° a 360°
Acurácia	+-(0,2 +- 0,02*medição) m/s
Resolução	0,01 m/s - 1°

Fonte: adaptado pelo autor diretamente da ficha técnica do equipamento.

A metodologia desse teste de carga foi fixar esse anemômetro ao drone DJI Phantom 3 Standard, que possui capacidade de carga superior à do drone DJI Mavic Air 2, com um cabo de tração feito com 4 fios de poliamida grossos. O local escolhido para o teste foi Itaipu, de modo que ele ocorreu logo após a realização da experimentação com o perfilador atmosférico de baixo custo.

4.4 Caracterização das campanhas de medição

No transcorrer deste estudo, o perfilador atmosférico de baixo custo foi empregado de formas variadas e em dias distintos, assim como um tratamento da influência do ar descendente das hélices do drone nas medições foi conduzido. Isso fez com que fosse relevante a caracterização de cada campanha de medição.

A primeira vez em que o perfilador atmosférico foi utilizado ocorreu das 10:25 às 10:38 AM no dia 22 de agosto de 2022, em caráter de teste, no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF). Por ocasião desse dia, a caixa do perfilador atmosférico (a maior, para comportar o *power bank*) foi presa à base do drone DJI Phantom 3 Standard por quatro fios de poliamida simples, de modo a distanciar o perfilador atmosférico do drone (maiores detalhes na seção de resultados e discussão). O céu estava parcialmente encoberto, com ventos moderados (conforme descrito na ficha de campo no Apêndice B).

A segunda vez em que o perfilador atmosférico foi empregado para voo ocorreu das 10:32 às 11:00 AM no dia 5 de setembro de 2022, novamente em caráter de teste, também no campus Praia Vermelha da UFF. Nesse dia, a caixa do perfilador atmosférico (mais uma vez a maior, pelo mesmo motivo da vez anterior) também foi presa à base do drone DJI Phantom 3 Standard por quatro fios de poliamida simples, mas bastante curtos dessa vez, de modo a manter o perfilador atmosférico e o drone em contato permanentemente (maiores detalhes na seção de resultados e discussão). O céu estava totalmente encoberto, com ventos fracos (conforme descrito na ficha de campo no Apêndice C).

Após esse segundo teste, no qual a caixa ficou próxima do drone DJI Phantom 3 Standard, realizou-se um tratamento da influência do ar descendente das hélices do drone nas medições das 05:44 às 06:15 PM no dia 18 de janeiro de 2023, novamente no campus Praia Vermelha da UFF. Esse estudo contou com emprego dos drones (sem perfilador embarcado) DJI Phantom 3 Standard e DJI Mavic Air 2, e do anemômetro Akrom KR835. O objetivo foi mensurar a velocidade desse ar oriundo das hélices para, com isso, decidir a respeito da distância de transporte entre o perfilador atmosférico de baixo custo e os drones (maiores detalhes na seção de resultados e discussão). O céu estava claro, sem vento (conforme descrito na ficha de campo no Apêndice D).

A terceira vez do uso do perfilador ocorreu das 05:05 às 05:20 PM no dia 14 de fevereiro de 2023, também em caráter de teste, no campus Praia Vermelha da UFF. Nesse dia, a caixa do perfilador atmosférico (a menor, pois o *power bank* foi substituído pela bateria recarregável) foi presa a um protótipo de cabo de tração com 4 fios de poliamida grossos presos

às hastes dos rotores das hélices do drone DJI Mavic Air 2 (maiores detalhes na seção de resultados e discussão). O céu estava pouco encoberto, sem vento (conforme descrito na ficha de campo no E).

A quarta vez do uso do perfilador ocorreu das 02:30 às 03:34 PM no dia 6 de março de 2023, em caráter de teste, no campus Praia Vermelha da UFF. Nesse dia, a caixa do perfilador atmosférico (mais uma vez a menor, pelo mesmo motivo da vez anterior) foi presa ao cabo de tração adaptado do seu protótipo, dessa vez com 1 fio de poliamida grosso e com um mosquetão com trava e olhal em cada extremidade. Esse cabo, por sua vez, foi preso a um dispositivo composto por 4 fios de poliamida de pesca curtos e um mosquetão montados próximos às bases de cada drone. Nessa ocasião, foi testada a estabilidade em voo de ambos os drones. Após esse teste, decidiu-se por empregar apenas o drone DJI Mavic Air 2 no transporte do perfilador de baixo custo (maiores detalhes na seção de resultados e discussão). O céu estava quase encoberto, com ventos fracos (conforme descrito na ficha de campo no Apêndice F).

Finalmente, a quinta vez do emprego do perfilador atmosférico ocorreu para 3 voos consecutivos, os quais se deram das 08:03 às 08:14 AM, das 08:19 às 08:26 AM e das 08:46 às 08:54 AM no dia 14 de março de 2023, dessa vez para realização da experimentação atmosférica propriamente dita, em Itaipu. Nesse dia, a caixa do perfilador atmosférico (novamente a menor, pelo mesmo motivo das vezes anteriores) foi presa ao cabo de tração, e esse foi preso ao drone DJI Mavic Air 2 (maiores detalhes são expostos na seção de resultados e discussão). Logo após essa experimentação, o drone Phantom 3 Standard foi utilizado num teste de carga com o anemômetro ultrassônico PRSens. Ao fim desse teste, constatou-se a impossibilidade do emprego do anemômetro com esse drone. O céu estava parcialmente encoberto, com ventos fracos e rajadas ocasionais (conforme descrito na ficha de campo no Apêndice G).

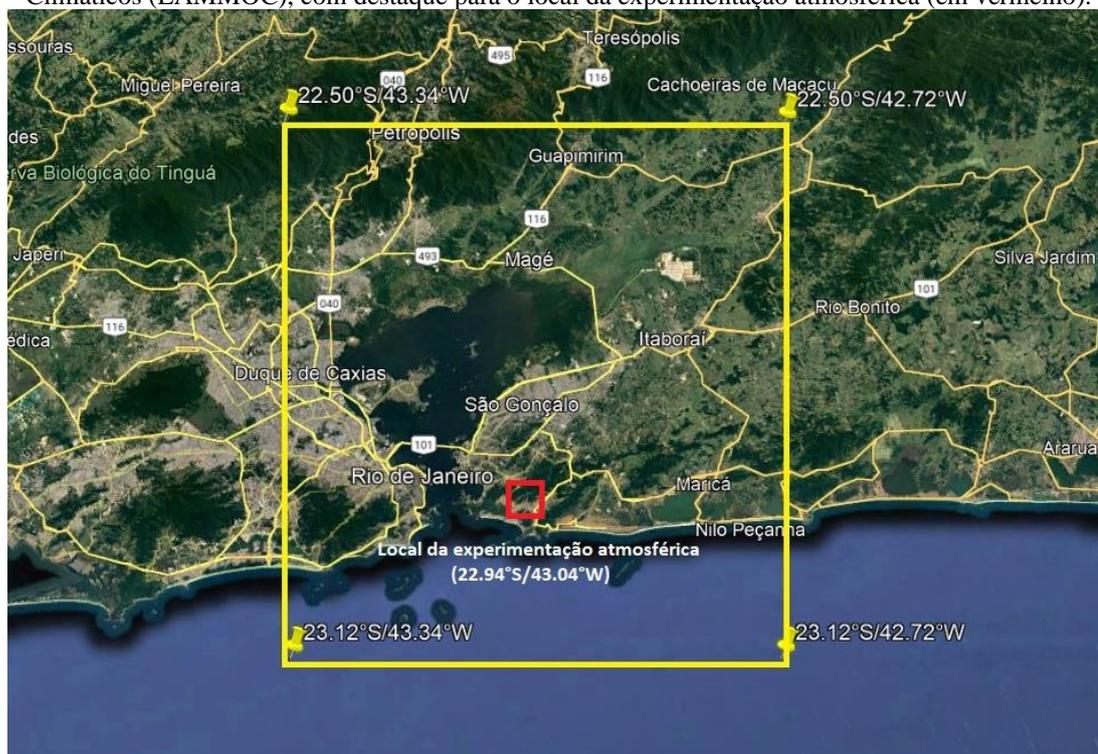
De modo geral, as condições ambientais demandaram atenção à segurança, pois a possibilidade de precipitação e de incremento na velocidade do vento aumentaria o risco da atividade, ainda mais levando-se em consideração que os drones realizavam transporte de material e que suas responsabilidades em condições do tempo adversas não são plenamente conhecidas.

4.5 Emprego do modelo numérico Weather Research and Forecasting

Ao ser agendada a experimentação atmosférica para o dia 14 de março de 2023, o modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF) do Laboratório de Monitoramento e Modelagem Numérica de Sistemas Climáticos (LAMMOC) foi utilizado para geração

de dados para esse mesmo dia a se contar desde às 00:00 AM GMT até as próximas 96 horas subsequentes. Essa rodada contou com três domínios, mas apenas o terceiro atende aos objetivos desta pesquisa. Esse domínio de interesse abrangeu a área delimitada pelos pontos de latitudes 22.50°S e 23.13°S e longitudes 42.72°W e 43.34W (conforme apresentado pela Figura 46).

Figura 46: Área de abrangência do terceiro domínio da rodada de 14 de março de 2023 do modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF) do Laboratório de Monitoramento e Modelagem Numérica de Sistemas Climáticos (LAMMOC), com destaque para o local da experimentação atmosférica (em vermelho).

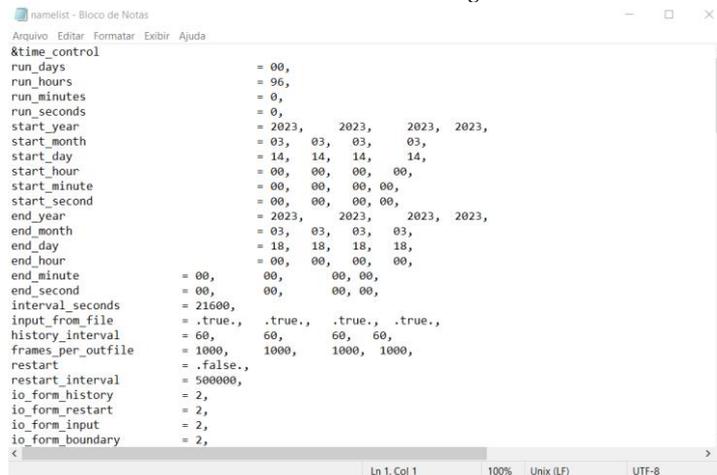


Fonte: autor.

Essa rodada gerou dados para diversas variáveis em 34 níveis verticais distintos, com seu nível mais elevado superior a 18.000 metros de altura. Para fins deste estudo, foram utilizados dados de temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica e altura. Como o WRF gerou mais dados em níveis superiores do que a campanha de experimentação atmosférica com o perfilador de baixo custo, os dados desses parâmetros atmosféricos foram aproveitados para análise comparativa numa faixa de 995 a 1015 hPa de pressão atmosférica, de modo a abarcar a totalidade dos dados observados pela experimentação.

A configuração dessa rodada do WRF foi feita com base nos arquivos “namelist.in-put” (conforme trecho na Figura 47 e configuração completa no Apêndice H) e “namelist.wps” (conforme trecho na Figura 48 e configuração completa no Apêndice I).

Figura 47: Trecho do arquivo "namelist.input" utilizado para configuração do modelo numérico *Weather Research and Forecasting*.



```

namelist - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
&time_control
run_days = 00,
run_hours = 96,
run_minutes = 0,
run_seconds = 0,
start_year = 2023, 2023, 2023, 2023,
start_month = 03, 03, 03, 03,
start_day = 14, 14, 14, 14,
start_hour = 00, 00, 00, 00,
start_minute = 00, 00, 00, 00,
start_second = 00, 00, 00, 00,
end_year = 2023, 2023, 2023, 2023,
end_month = 03, 03, 03, 03,
end_day = 18, 18, 18, 18,
end_hour = 00, 00, 00, 00,
end_minute = 00, 00, 00, 00,
end_second = 00, 00, 00, 00,
interval_seconds = 21600,
input_from_file = .true., .true., .true., .true.,
history_interval = 60, 60, 60, 60,
frames_per_outfile = 1000, 1000, 1000, 1000,
restart = .false.,
restart_interval = 500000,
io_form_history = 2,
io_form_restart = 2,
io_form_input = 2,
io_form_boundary = 2,

```

Fonte: autor.

Figura 48: Trecho do arquivo "namelist.wps" utilizado para configuração do modelo numérico *Weather Research and Forecasting*.



```

namelist - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 3,
start_date = '2023-03-14_00:00:00', '2023-03-14_00:00:00', '2023-03-14_00:00:00', '2023-03-14_00:00:00',
end_date = '2023-03-18_00:00:00', '2023-03-18_00:00:00', '2023-03-18_00:00:00', '2023-03-18_00:00:00',
interval_seconds = 21600,
io_form_geogrid = 2,
opt_output_from_geogrid_path = '/home/lammoc/wrf_operacional/operacional/modelo',
debug_level = 0,
/

&geogrid
parent_id = 1,1,2,
parent_grid_ratio = 1,3,3,
i_parent_start = 1,61,54,
j_parent_start = 1,70,34,
e_we = 146, 151,64,
e_sn = 160, 115,70,
geog_data_res = 'default', 'default', 'default',
dx = 9000,
dy = 9000,
map_proj = 'mercator',
ref_lat = -24.878,
ref_lon = -45.858,
truelat1 = -24.878,
truelat2 = 0,
stand_lon = -45.858,

```

Fonte: autor.

Assim, os dados de interesse dessa rodada foram concentrados no arquivo de saída do modelo sob nome “wrfout_d03_2023-03-14_00_00_00”, a partir do qual se procedeu com o pós-processamento com o pacote de rotinas WRF-Python.

4.5.1 Pós-processamento de dados modelados com WRF-Python

Os dados ambientais modelados pelo WRF para 14 de março de 2023 foram pós-processados com o pacote de rotinas de programação WRF-Python. Para isso, estabeleceu-se em sistema operacional Windows um ambiente de desenvolvimento integrado, que foi o Anaconda. Esse ambiente dispõe do Anaconda Navigator, que é uma interface gráfica do usuário,

traduzido do inglês *graphical user interface* (GUI), que permite ao usuário iniciar aplicativos e gerenciar pacotes de programação “conda”. Dentre os aplicativos disponibilizados pelo Anaconda Navigator, optou-se pelo JupyterLab, que é uma interface de usuário que oferece todos os blocos de construção familiares do aplicativo Notebook Jupyter clássico em formato flexível e baseado na rede de alcance mundial, traduzido do inglês *World Wide Web* (WWW), o que torna seu emprego é muito comum entre cientistas de dados.

Iniciada a interface JupyterLab, as bibliotecas necessárias foram instaladas, tais como Numpy, Matplotlib e NetCDF4 (do inglês, *Network Common Data Form*), conforme apresentado na Figura 49. Após isso, procedeu-se com a instalação do pacote de rotinas WRF-Python, conforme apresentado na Figura 50.

Figura 49: Trecho da interface de usuário JupyterLab com comandos de instalação de bibliotecas Numpy, Matplotlib e NetCDF4.

```
[3]: pip install numpy
Requirement already satisfied: numpy in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (1.21.5)
Note: you may need to restart the kernel to use updated packages.

[4]: pip install matplotlib
Requirement already satisfied: matplotlib in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (3.5.2)
Requirement already satisfied: pyparsing>=2.2.1 in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (from matplotlib) (3.0.9)
Requirement already satisfied: numpy>=1.17 in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (from matplotlib) (1.21.5)
Requirement already satisfied: python-dateutil>=2.7 in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (from matplotlib) (2.8.2)
Requirement already satisfied: fonttools>=4.22.0 in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (from matplotlib) (4.25.0)
Requirement already satisfied: kiwisolver>=1.0.1 in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (from matplotlib) (1.4.2)
Requirement already satisfied: pillow>=6.2.0 in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (from matplotlib) (9.2.0)
Requirement already satisfied: packaging>=20.0 in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (from matplotlib) (21.3)
Requirement already satisfied: cycler>=0.10 in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (from matplotlib) (0.11.0)
Requirement already satisfied: six>=1.5 in c:\users\david\anaconda3\lib\site-packages (from python-dateutil>=2.7->matplotlib) (1.16.0)
Note: you may need to restart the kernel to use updated packages.

[4]: conda install netcdf4
Collecting package metadata (current_repodata.json): ...working... done
Solving environment: ...working... done

## Package Plan ##

  environment location: C:\Users\David\anaconda3

added / updated specs:
- netcdf4
```

Fonte: autor.

Figura 50: Trecho da interface de usuário JupyterLab com comando de instalação do pacote de rotinas de programação WRF-Python.

```
[10]: conda install -c conda-forge wrf-python
Collecting package metadata (current_repodata.json): ...working... done
Solving environment: ...working... done

## Package Plan ##

  environment location: C:\Users\David\anaconda3

added / updated specs:
- wrf-python

The following packages will be downloaded:

package | build
-----|-----
m2w64-gcc-libgfortran-5.3.0 | 6 | 342 KB | conda-forge
m2w64-gcc-libs-5.3.0 | 7 | 520 KB | conda-forge
m2w64-gcc-libs-core-5.3.0 | 7 | 214 KB | conda-forge
m2w64-gmp-6.1.0 | 2 | 726 KB | conda-forge
python_abi-3.9 | 2_cp39 | 4 KB | conda-forge
wrf-python-1.3.4.1 | py39h412d2f7_2 | 5.3 MB | conda-forge
Total: 7.0 MB

The following NEW packages will be INSTALLED:

m2w64-gcc-libgfor- conda-forge/win-64::m2w64-gcc-libgfortran-5.3.0-6 None
m2w64-gcc-libs conda-forge/win-64::m2w64-gcc-libs-5.3.0-7 None
m2w64-gcc-libs-co conda-forge/win-64::m2w64-gcc-libs-core-5.3.0-7 None
m2w64-gmp conda-forge/win-64::m2w64-gmp-6.1.0-2 None
python_abi conda-forge/win-64::python_abi-3.9-2_cp39 None
wrf-python conda-forge/win-64::wrf-python-1.3.4.1-py39h412d2f7_2 None
```

Fonte: autor.

Em sequência, tanto o WRF-Python quanto as demais bibliotecas instaladas foram importados para o ambiente da interface JupyterLab e iniciou-se a extração de dados do arquivo de saída “wrfout_d03_2023-03-14_00_00_00” gerado pela modelagem numérica do WRF do LAMMOC.

Para tanto, foram selecionados os passos de tempo correspondentes a 11 e 12 horas após o início da rodada do WRF, pois a experimentação atmosférica com o perfilador ocorreu no período entre 08:00 e 09:00 AM BRT (*Brasilia Time*) do dia 14 de março, o que corresponde ao intervalo entre 11 e 12 horas após o início da rodada do WRF em 00:00 AM GMT desse mesmo dia (equivalente a 09:00 PM BRT do dia anterior).

Para a malha (*grid*) do domínio de interesse, com 69 pontos em “x” por 63 pontos em “y”, todos os dados modelados foram extraídos para o ponto de coordenadas ($x = 20$, $y = 30$), o qual equivale ao local de coordenadas $22,938454^\circ\text{S}$ de latitude e $43,042240^\circ\text{W}$ de longitude, que, sendo o ponto mais próximo do local da experimentação, dista aproximadamente 450 metros para ele.

Com relação às unidades de medida dos parâmetros atmosféricos, foi adotado graus Célsius ($^\circ\text{C}$) para temperatura, percentual (%) para umidade relativa e hectopascal (hPa) para a pressão atmosférica. Com essas definições, foi utilizado o comando “getvar” para a criação de novas variáveis com os valores desses parâmetros para o ponto de grade de interesse (conforme apresentado na Figura 51).

Figura 51: Trecho da interface de usuário JupyterLab com comando "getvar" para geração de variáveis com parâmetros atmosféricos para o ponto de grade de interesse.

```
[1]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.cm import get_cmap
from matplotlib.colors import from_levels_and_colors
from cartopy import crs
from cartopy.feature import NaturalEarthFeature, COLORS
from netCDF4 import Dataset
from wrf import (getvar, to_np, get_cartopy, latlon_coords, vertcross,
                cartopy_xlim, cartopy_ylim, interpline, CoordPair)

[2]: wrfnc = Dataset('C:/Users/David/Desktop/wrfout_d03_2023-03-14_00_00_00')

[3]: pressao_11 = getvar(wrfnc, "pres", units="hPa", timeidx=11)[:,:20,30]
temp_11 = getvar(wrfnc, "temp", units="degC", timeidx=11)[:,:20,30]
rh_11 = getvar(wrfnc, "rh", timeidx=11)[:,:20,30]
z_11 = getvar(wrfnc, "z", units="m", timeidx=11)[:,:20,30]

pressao_12 = getvar(wrfnc, "pres", units="hPa", timeidx=12)[:,:20,30]
temp_12 = getvar(wrfnc, "temp", units="degC", timeidx=12)[:,:20,30]
rh_12 = getvar(wrfnc, "rh", timeidx=12)[:,:20,30]
z_12 = getvar(wrfnc, "z", units="m", timeidx=12)[:,:20,30]
```

Fonte: autor.

Com as variáveis no formato adequado, foram gerados os perfis verticais através das ferramentas de plotagem da biblioteca gráfica Matplotlib (conforme apresentado na Figura

52). A análise a respeito desses perfis é feita na seção de resultados e discussão e o “*notebook*” da interface de usuário JupyterLab com as linhas de comando e programação deste projeto consta no Apêndice J.

Figura 52: Trecho da interface de usuário JupyterLab com comandos de plotagem da biblioteca gráfica Matplotlib.

```
[6]: plt.plot(t13, pt13)
plt.plot(t23, pt23)
plt.plot(t33, pt33)
plt.plot(temp_11, pressao_11)
plt.plot(temp_12, pressao_12)
plt.xlabel("Temperatura (°C)\n\nTempo de amostragem de dados: 10 segundos")
plt.ylabel("Pressão atmosférica (hPa)")
plt.title("Comparativo entre perfis verticais de temperatura gerados por dados observados\n e por modelagem numérica pelo WRF-Python para Itaipu")
plt.axis([20, 32, 1015, 995])
plt.grid(True)
plt.legend(['dados observados (08:03 - 08:14 AM)', 'dados observados (08:19 - 08:26 AM)', 'dados observados (08:46 - 08:54 AM)', 'dados WRF-PyT
plt.show()
```

Fonte: autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção enfatiza os resultados obtidos com a implementação do perfilador atmosférico de baixo custo, que foi viabilizado por meio de programação em Arduino associada ao embarque em drone para a geração de perfis verticais de parâmetros atmosféricos.

Deste modo, inicialmente são apresentados os resultados com ênfase nos testes de voos realizados, abordando os sucessos e as dificuldades encontrados, no tratamento da influência do ar descendente das hélices do drone nas medições, cujas conclusões subsidiaram uma nova abordagem na distância de transporte do perfilador atmosférico de baixo custo pelos drones, e na experimentação atmosférica, detalhando as atividades relacionadas a essa campanha de medição.

Em seguida, é realizada a análises dos perfis verticais atmosféricos obtidos tanto por dados observados em teste e na experimentação quanto por dados de modelagem numérica pós-processados pelo WRF-Python.

5.1 Teste de voo do dia 22 de agosto de 2022

Considerando que o drone é um instrumento que gera fluxos descendentes de ar, idealizou-se que a caixa do perfilador atmosférico deveria ficar presa a ele com uma distância suficiente para evitar esse fluxo gerado. Com isso, o primeiro teste de voo realizado ocorreu em 22 de agosto de 2022, com o objetivo de verificar se o drone DJI Phantom 3 Standard era capaz de carregar o perfilador atmosférico. O local de lançamento escolhido foi o campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF). Nessa ocasião estavam ausentes o sensor de pressão diferencial MPX5100DP e a lâmpada de LED. A ligação da caixa do perfilador atmosférico ao drone foi estabelecida por quatro fios de poliamida simples de 2 metros cada um (o que pode ser observado na Figura 53).

Tão logo que o perfilador atmosférico se distanciou da superfície, percebeu-se que ele pendulava muito, provavelmente em função de um incremento na velocidade dos ventos, atrapalhando consideravelmente seu governo pelo controle remoto (A Figura 54 ajuda a ilustrar a deriva da caixa do perfilador atmosférico em relação ao drone). Considerada a segurança dos instrumentos, decidiu-se pela aterrissagem.

Figura 53: Lançamento do perfilador atmosférico de baixo custo no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 22 de agosto de 2022.



Fonte: autor.

Figura 54: Perfilador atmosférico de baixo custo em operação com comportamento pendular no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 22 de agosto de 2022.



Fonte: autor.

Quando o cartão de memória foi inserido no computador para a leitura dos dados coletados, percebeu-se que a gravação foi interrompida com apenas 3 ciclos (conforme apresentado na Figura 55). Com isso, o módulo de cartão MicroSD foi submetido a teste de bancada, não apresentando qualquer problema. Assim, existe a possibilidade de que o movimento pendular do perfilador atmosférico tenha sido brusco o suficiente para causar algum mau contato elétrico.

Figura 55: Dados gravados por perfilador atmosférico de baixo custo em 22 de agosto com interrupção súbita.

	A	B	C	D	E	F
1	Dia	Hora	Temperatura	Umidade	Pressao	Altitude
2	22/08/2022	10:25:00	22,1	62,7	1025,73	12,06
3	22/08/2022	10:25:10	21,9	63,1	1025,69	12,37
4	22/08/2022	10:25:20	21,9	63,1	1025,73	12,06
5						
6						

Fonte: autor.

5.2. Teste de voo do dia 5 de setembro de 2022

Diante dos resultados da experimentação do dia 22 de agosto, foi decidido que o próximo voo seria realizado com a caixa fixa o mais próximo possível da base do drone DJI Phantom 3 Standard, o que implicaria em submeter o perfilador atmosférico diretamente ao ar descendente gerado pelas hélices. Assim, para tratar essa influência, foi conectado ao perfilador atmosférico o sensor de pressão diferencial MPX5100DP. Para isso, o tubo de Pitot externo à caixa foi posicionado verticalmente, de forma a fazer com que o ar incidisse diretamente sobre ele.

Além disso, a lâmpada de LED foi conectada ao perfilador atmosférico para servir como sinal mais evidente de que ele permanece ligado e executando os ciclos programados, pois, embora a placa Arduino Uno apresente pequenas luzes quando alimentada, a lâmpada de LED apresenta brilho mais intenso e foi programada para piscar segundo a periodicidade das medições, deixando inequívoco que o *script* importado para a placa seguia sendo devidamente executado.

O perfilador atmosférico com essa disposição foi colocado em operação no dia 5 de setembro de 2022, novamente no campus Praia Vermelha da UFF (conforme apresentado na Figura 56). Tão logo que o perfilador atmosférico alçou voo, foi verificado não haver problemas de governo com o controle remoto, tampouco a oscilação presente no voo anterior. Mesmo assim, foi percebido que a bateria do drone DJI Phantom 3 Standard estava acabando mais rapidamente do que o previsto por sua autonomia usual de 25 minutos. É possível que o motivo para isso esteja na fixação da caixa do perfilador atmosférico, que pode ter criado um deslocamento (*offset*) do ponto de equilíbrio do drone, fazendo que seu esforço de compensação fosse maior do que seria em caso de não realizar qualquer transporte de material.

Figura 56: Lançamento do perfilador atmosférico de baixo custo no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 5 de setembro de 2022.



Fonte: autor.

Por ocasião do voo desse dia, o perfilador atmosférico ficou das 10:32 às 10:42 AM em solo, das 10:43 às 10:51 AM no ar, e das 10:52 às 11:00 AM em solo novamente. Dessa forma foi possível haver períodos de medição em solo antes e depois das medições em voo. Com isso, foi possível se notar como os dados se comportaram em relação à implementação de drone. A altura máxima de voo alcançada nesse teste foi de 10,6 metros. Desejava-se alcançar altura superior, obtendo-se assim ainda mais dados, mas o ineditismo da modalidade de perfilador atmosférico associado ao aumento na velocidade dos ventos foram os fatores que preponderaram na decisão encerrar esse teste.

5.3 Tratamento da influência do ar descendente das hélices do drone nas medições

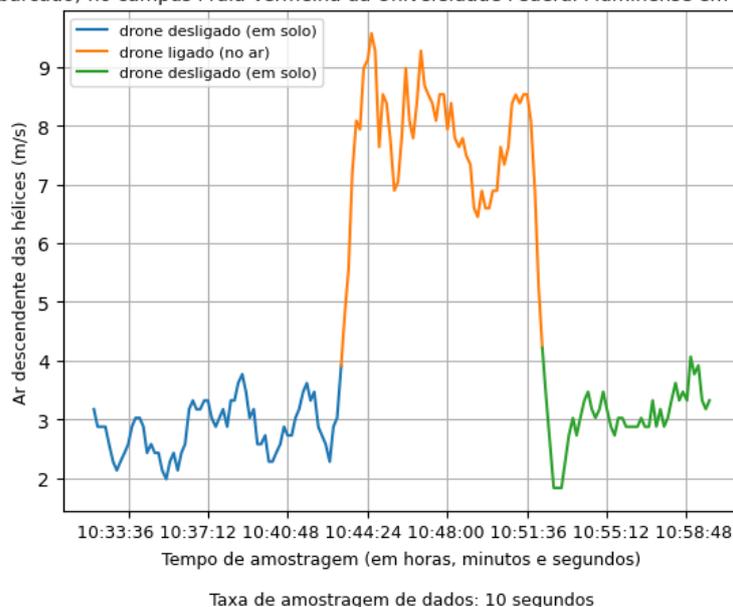
Mesmo que tenha sido percebida melhora na estabilidade de voo com a caixa próxima à base do drone DJI Phantom 3 Standard, essa disposição também submetia o conjunto ao ar descendente das hélices, o que poderia alterar as características do ar próximo ao perfilador atmosférico. Diante disso, o sensor de pressão diferencial MPX5100DP foi empregado juntamente com um tubo de Pitot para quantificar a velocidade desse ar. Os dados obtidos foram

submetidos a uma média móvel de 7 valores (o valor central, 3 valores anteriores e 3 valores posteriores) a fim de suavizar dados espúrios ou ruidosos.

Como resultado, constatou-se que o valor da velocidade do ar oscilava aproximadamente entre 2 m/s e 4 m/s enquanto o drone estava em solo, tanto antes quanto depois do voo, e aproximadamente entre 6 m/s e 10 m/s enquanto o drone estava em voo (conforme apresentado na Figura 57). Como nos momentos anterior e posterior ao voo as hélices estavam inativas, a faixa de valores com as menores velocidades do ar é atribuída à condição do ambiente. De semelhante modo, como no momento do voo as hélices estavam ativas, a faixa de valores com as maiores velocidades do ar é atribuída ao drone em operação.

Figura 57: Ar descendente das hélices do drone Phantom 3 Standard medido por sensor MPX5100DP (embarcado) no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 5 de setembro de 2022 (taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Ar descendente das hélices do drone Phantom 3 Standard medido por sensor MPX5100DP (embarcado) no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 05/09/2022



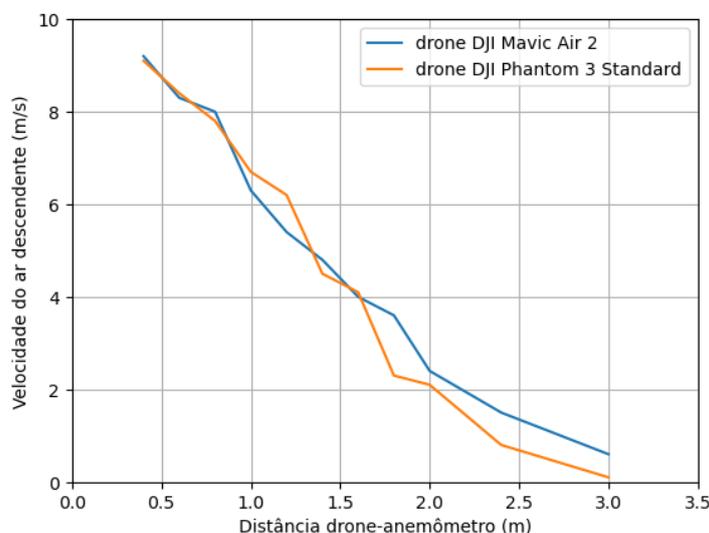
Fonte: autor.

Devido à constatação de que drones em voo causam um fluxo de ar que pode interferir nas medições de interesse, foi conduzido um estudo no campus Praia Vermelha da UFF no dia 18 de janeiro de 2023 para se quantificar essa influência gerada pelos drones DJI Phantom 3 Standard e DJI Mavic Air 2. Esse estudo consistiu em posicionar o anemômetro Akrom KR835 sob esse fluxo de ar ao passo em que se variava a distância dos drones, um de cada vez, em relação ao anemômetro.

Como resultado, percebeu-se que a velocidade do ar decaía para ambos os drones em função do incremento de suas distâncias para o anemômetro, de modo que foi possível constatar que a velocidade do ar se tornava praticamente nula quando essa distância alcançava 3 metros para ambos os drones (conforme apresentado na Figura 58).

Figura 58: Medição da velocidade do ar descendente das hélices dos drones DJI Mavic Air 2 e DJI Phantom 3 Standard em função da distância para o anemômetro Akrom KR835 realizada no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 18/01/2023.

Medição da velocidade do ar descendente das hélices dos drones DJI Mavic Air 2 e DJI Phantom 3 Standard em função da distância para o anemômetro Akrom KR835 realizada no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 18/01/2023



Fonte: autor.

5.4 Teste de voo do dia 14 de fevereiro de 2023

Em face desses resultados, foi realizado um voo de teste com o drone Mavic Air 2 no dia 14 de fevereiro de 2023 no campus Praia Vermelha da UFF. O teste consistiu em aumentar a distância entre a caixa do perfilador atmosférico e o drone para se verificar a estabilidade do voo.

Nessa ocasião, a configuração adotada foi utilizar a placa Arduino com todos os sensores e dispositivos alimentados pela bateria recarregável, o que viabilizou o transporte dos componentes eletrônicos pela caixa menor. Isso permitiu que o perfilador se tornasse menor e mais leve, contribuindo para reduzir o esforço de carga realizados pelos drones em voo.

Com o intuito de reduzir o movimento pendular, passou-se a utilizar o fio de poliamida grosso. Nessa configuração, foram utilizados 4 desses fios de poliamida, de modo que cada extremidade superior da caixa teve um fio passado por ela. Como o drone Mavic Air 2 não

possui base (diferentemente do drone Phantom 3 Standard), cada fio foi preso a uma haste de rotor das hélices. Esse tipo de fio tem como característica a tendência de voltar a assumir a posição de quando enrolado em seu carretel (conforme apresentado na Figura 59). Isso lhe dava um aspecto espiralado que poderia comprometer a estabilidade do dispositivo. Por isso, tiras de fita isolante foram dispostas por todo o comprimento dos fios, unindo-os em apenas um protótipo de cabo de tração mais grosso. Considerando o experimento com o anemômetro Akrom KR835, esse cabo de tração foi testado em voo disposto para manter uma distância de 3 metros da caixa do perfilador para o drone (conforme a Figura 60).

Figura 59: Protótipo de cabo de tração de fio de poliamida grosso com padrão espiralado.



Fonte: autor.

Como ainda se percebeu um movimento pendular (embora inferior ao do dia 22 de agosto), decidiu-se que deveria ser reduzida a distância entre drone e caixa para 2,5 metros. Essa decisão buscou um meio-termo entre a necessidade de estabilidade e a redução da velocidade do ar descendente das hélices. Com relação à fixação dos fios às hastas dos rotores, embora essa modalidade tenha funcionado bem, decidiu-se substituir os fios grossos pelos de pesca juntamente ao drone por motivo de segurança.

Figura 60: Perfilador atmosférico de baixo custo em operação no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 14 de fevereiro de 2023.



Fonte: autor.

5.5 Teste de voo do dia 6 de março de 2023

A fim de resolver a questão relacionada ao movimento pendular da caixa do perfilador atmosférico, passou-se a adotar 2,5 metros de cabo de tração (conforme mencionado anteriormente). Considerando a tendência do fio a gerar um padrão espiralado, passou-se a utilizar apenas um fio grosso para suportar a carga. Como decidiu-se por usar fio de poliamida de pesca para ligar o cabo de tração ao drone, colocou-se um mosquetão com trava e olhal na parte inferior dos drones DJI Mavic Air 2 e DJI Phantom 3 Standard, bem como em ambas as extremidades do cabo de tração. Isso viabilizou a conexão entre fios de pesca e grosso de forma segura, além de ter proporcionado uma acoplagem e desacoplagem rápida (conforme Figura 61, Figura 62 e Figura 63).

Figura 61: Drone Mavic Air 2 com seu dispositivo de acoplamento do cabo de tração.



Fonte: autor.

Figura 62: Drone Phantom 3 Standard com seu dispositivo de acoplamento do cabo de tração.



Fonte: autor.

Figura 63: Cabo de tração do perfilador atmosférico de baixo custo elaborado com fio de poliamida grosso, mosquetão de trava e olhal e fita isolante.



Fonte: autor.

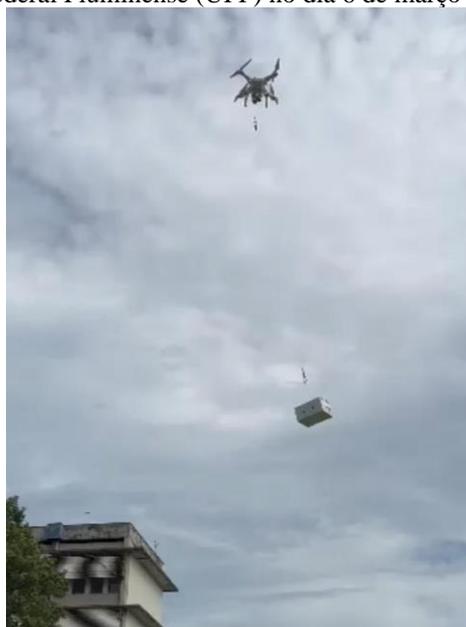
Assim, no dia 6 de março de 2023 foi realizado voo com os dois drones ora citados para transportar a caixa do perfilador. Primeiramente, foi utilizado o drone Mavic Air 2 (conforme apresentado na Figura 64) e, por fim, o drone Phantom 3 Standard (conforme apresentado na Figura 65).

Figura 64: Teste de estabilidade em voo com drone Mavic Air 2 no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 6 de março de 2023.



Fonte: autor.

Figura 65: Teste de estabilidade em voo com drone Phantom 3 Standard no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF) no dia 6 de março de 2023.



Fonte: autor.

Como resultado, o drone Mavic Air 2 realizou um voo estável, dispensando quaisquer necessidades de novos ajustes. Cabe destacar que sua estabilidade foi satisfatória tanto em movimentos verticais ascendentes e descendentes quanto fixo em cota altimétrica constante (isto é, em voo, mas em posição praticamente invariável). Por outro lado, o drone Phantom 3 Standard mais uma vez se comportou com movimento pendular. Como este projeto pretende levar o perfilador atmosférico a alturas ainda maiores do que aquelas praticadas próximas do solo nos testes de estabilidade, isso faz com que apenas o drone Mavic Air 2 seja considerado seguro para o transporte do perfilador.

5.6 Experimentação atmosférica do dia 14 de março de 2023

Após todas as adaptações necessárias terem sido feitas, foi possível proceder com a experimentação atmosférica em maiores alturas. A configuração adotada para tal ocasião, semelhantemente ao realizado nos testes de voo dos dias 14 de fevereiro e 6 de março, foi utilizar a placa Arduino com todos os sensores e dispositivos alimentados pela bateria recarregável, de modo que os componentes eletrônicos foram novamente transportados pela caixa menor. Nessa ocasião, o perfilador foi embarcado no drone Mavic Air 2 através do cabo de tração elaborado. Assim, o perfilador atmosférico foi posto em operação em Itaipu em 14 de março de 2023 (conforme apresentado na Figura 66).

O local da experimentação é definido mais precisamente pela área circular definida por 50 metros de raio ao redor do ponto de latitude 22,9350130°S e longitude 43,0445020°W. Esse local se caracteriza por ser exclusivamente residencial, predominantemente arborizado com alguns pontos de vegetação baixa, e com risco reduzido relacionado à passagem de pessoas ou veículos.

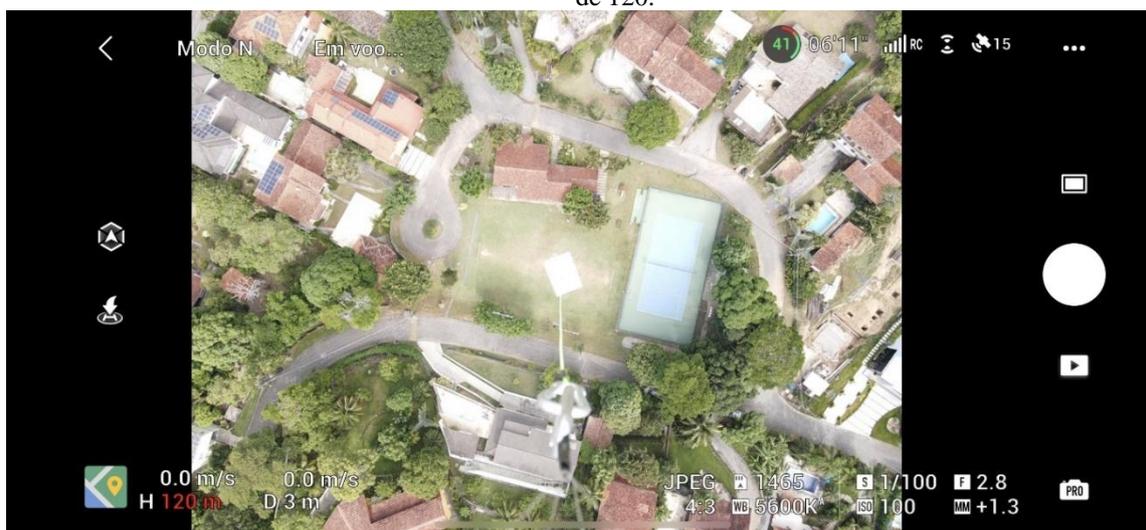
Como esse experimento alcançou 120 metros de altura (conforme apresentado na Figura 67), foi necessário adotar procedimentos legais e de segurança para acesso do drone ao espaço aéreo. Ambos os drones foram cadastrados na Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) como aeronaves não tripuladas de uso não recreativo (conforme apresentado nos Apêndices K e L). Também foi solicitada à Força Aérea Brasileira (FAB) através do sistema de Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS) uma autorização de acesso ao espaço aéreo (conforme apresentado no Apêndice M). Por fim, foi elaborada uma Avaliação de Risco Operacional (ARO) a fim de incrementar o grau de segurança da experimentação conduzida (conforme apresentado no Apêndice N).

Figura 66: Perfilador atmosférico de baixo custo em operação em Itaipu no dia 14 de março de 2023.



Fonte: autor.

Figura 67: Tela de controle do drone Mavic Air 2 registrando imagem aérea do local de voo e indicando altura de 120.



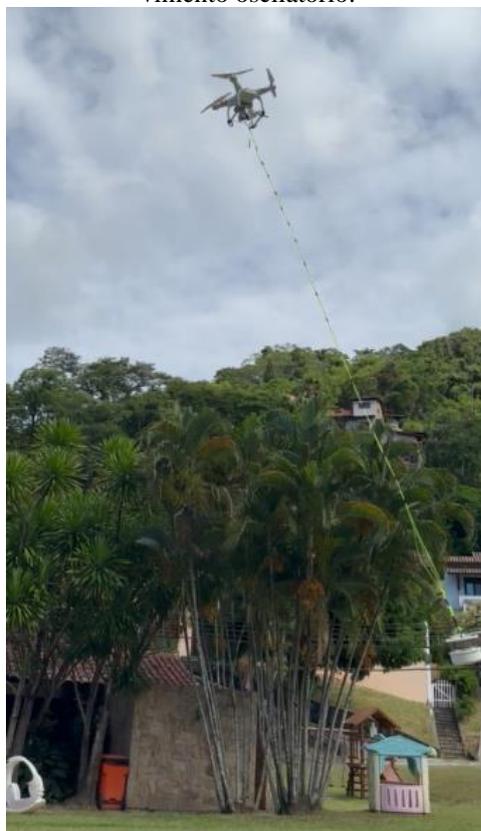
Fonte: autor.

Ao todo, foram realizados 3 voos verticais das 08:03 às 08:14 AM, das 08:19 às 08:26 AM e das 08:46 às 08:54 AM, os quais se deram com velocidade de ascensão entre 0,1 m/s e 0,4 m/s. Em todos os voos se observou comportamento estável do perfilador embarcado, de modo que não houve qualquer oscilação que atrapalhasse a condução da aeronave ou reduzisse o grau de segurança da operação.

Após o término do uso do drone Mavic Air 2 para coleta de dados ambientais, o drone Phantom 3 Standard foi conectado ao cabo de tração para teste de estabilidade com o perfilador de baixo custo. Como foi observado novamente movimento oscilatório da caixa do perfilador com esse drone assim que se iniciou o voo, decidiu-se por não o utilizar para coleta de dados atmosféricos.

Posteriormente foi conduzido um teste de carga envolvendo o drone Phantom 3 Standard e o anemômetro ultrassônico PRSens pertencente ao LAMMOC (conforme Figura 68). A configuração do dispositivo para essa ocasião contou com o protótipo de cabo de tração com 4 fios de poliamida grossos (apresentado na Figura 59).

Figura 68: Drone Phantom 3 Standard em teste de carga do anemômetro ultrassônico PRSens apresentando movimento oscilatório.



Fonte: autor.

Esse teste consistiu em verificar se esse drone seria capaz de suportar o peso do anemômetro a fim de se viabilizar a coleta de dados relacionados a velocidade e direção do vento, uma vez que o perfilador atmosférico desenvolvido não é capaz de coletar tais dados, pois, como citado anteriormente, o conjunto do sensor MPX5100DP com o tubo de Pitot apenas poderia ser empregado para medir a velocidade do vento numa única direção, que seria aquela para qual o tubo de Pitot apontaria.

Ao término do teste, foi constatado que o drone Phantom 3 Standard é capaz de aguentar o peso do anemômetro, mas a oscilação do conjunto em voo influencia no governo pelo controle remoto, atribuindo risco à operação. Assim, é necessário que se empregue um drone com a estabilidade do Mavic Air 2 e a capacidade de carga do Phantom 3 Standard para uso seguro do anemômetro ultrassônico.

5.7 Análise dos perfis verticais atmosféricos

Esta seção é dedicada à análise dos perfis verticais atmosféricos, os quais foram gerados tanto a partir de dados ambientais coletados com o perfilador de baixo custo embarcado em drones quanto a partir de dados modelados pós-processados pelo WRF-Python. Inicialmente são analisados os dados obtidos em caráter de teste com emprego do drone Phantom 3 Standard. Posteriormente são analisados os dados coletados em experimentação atmosférica até 120 metros de altura obtidos com emprego do drone Mavic Air 2. Em sequência são apresentados os perfis gerados por modelagem numérica e, finalmente, é feita comparação entre os perfis gerados por dados observados e modelados.

5.7.1 Análise dos perfis verticais de dados ambientais de teste

Dois testes distintos com o perfilador obtiveram dados ambientais, os quais foram realizados nos dias 22 de agosto e 5 de setembro de 2022. Como os dados do dia 22 de agosto representam apenas 20 segundos de operação, sua obtenção serviu apenas para atestar a possibilidade do emprego do perfilador. O teste de 5 de setembro, por sua vez, obteve dados atmosféricos até 10,6 metros de altura sem interrupções. Assim, apenas o teste desse dia subsidiou a análise preliminar dos dados do perfilador.

Uma vez realizada a coleta dos dados ambientais no dia 5 de setembro, quais sejam temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica, eles foram submetidos a uma média móvel

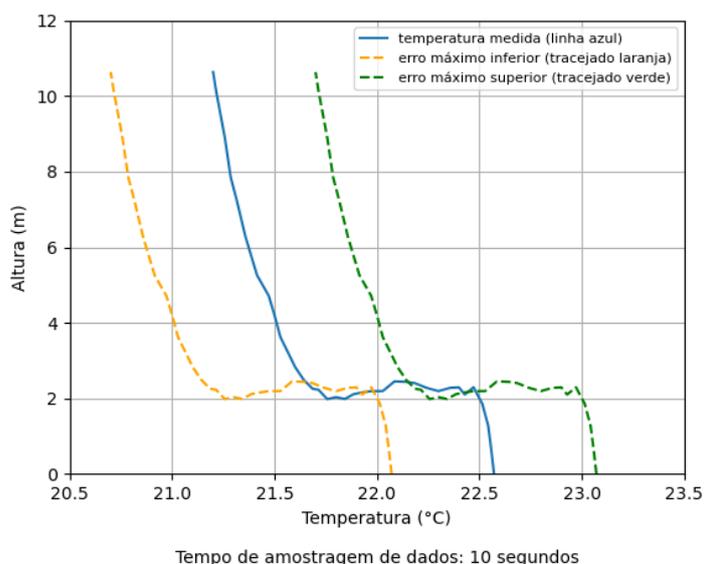
de 7 valores (o valor central, 3 valores anteriores e 3 valores posteriores) a fim de suavizar possíveis dados espúrios ou ruidosos que porventura figurassem entre o conjunto de medições.

No tocante aos dados ambientais coletados, percebe-se que ocorre redução nos valores de temperatura em função do aumento de altura do drone (conforme apresentado na Figura 69), o que é razoável, levando-se em consideração que a superfície terrestre aquece mais intensamente o ar conforme sua proximidade do solo. O comportamento suavizado da curva indica não haver prejuízo nas medições em função do ar oriundos das hélices. Nota-se que próximo à cota de 2 metros de altura ocorre um gradiente acentuado na medição de aproximadamente $0,8^{\circ}\text{C}$, mas é possível que esse gradiente tenha sido de apenas $0,3^{\circ}\text{C}$, levando-se em consideração a acurácia de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ do sensor DHT22.

Levando em consideração que o ar descendente das hélices é aproximadamente constante independentemente da altura que se alcance, uma vez que a força ascendente de sustentação do drone tem como principal parâmetro a massa total do conjunto, o perfilador atmosférico mostra-se invariavelmente competente enquanto sensor de temperatura.

Figura 69: Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Phantom 3 Standard com movimento ascendente no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 5 de setembro de 2022 (taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado em drone com movimento ascendente no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 05/09/2022 das 10:25 às 10:38 AM



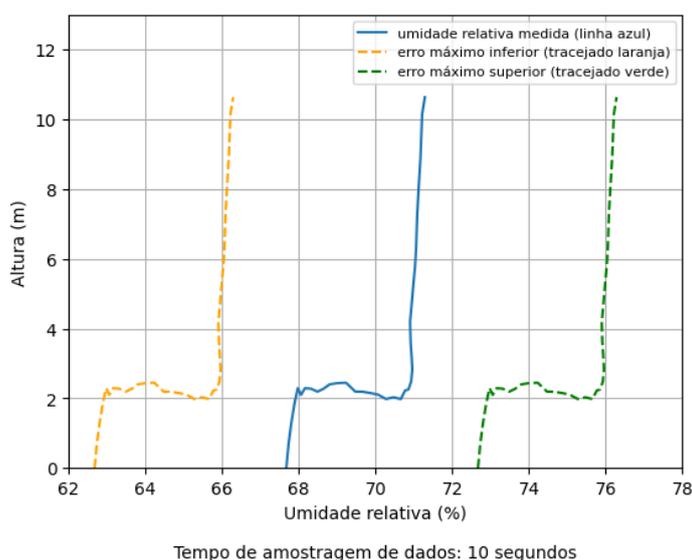
Fonte: autor.

Quanto à umidade relativa do ar, ocorre incremento de seus valores conforme o drone aumenta sua altura (conforme apresentado na Figura 70). Tal como ocorre em relação à

temperatura, também se pode notar gradiente acentuado na medição da umidade relativa próximo aos 2 metros de altura, mas essa variação é completamente abrangida pela faixa de acurácia do sensor DHT22. O comportamento suavizado da curva (embora menos suave em relação à curva de temperatura) também indica não haver prejuízo nas medições em função do ar oriundos das hélices do drone em voo. Portanto, o sensor DHT22 é eficiente nessa modalidade de perfilador atmosférico de baixo custo.

Figura 70: Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Phantom 3 Standard com movimento ascendente no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 5 de setembro de 2022 (taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado em drone com movimento ascendente no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 05/09/2022 das 10:25 às 10:38 AM



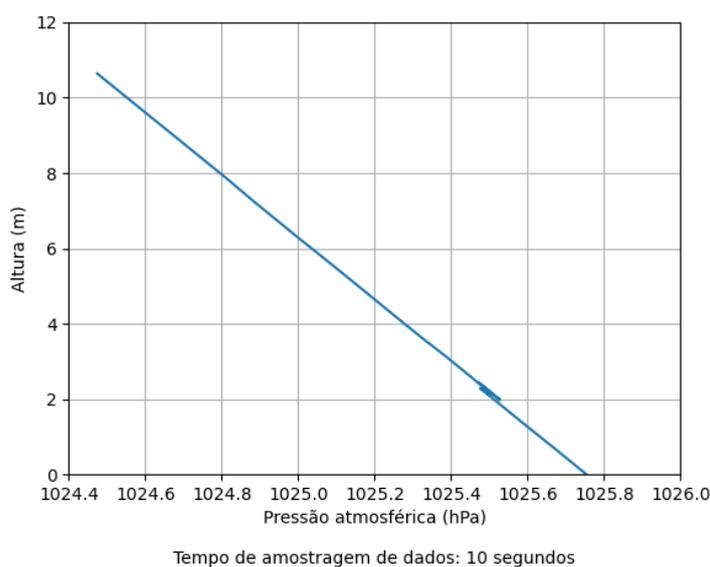
Fonte: autor.

No tocante à pressão atmosférica, percebe-se que ocorre redução em seus valores em função do drone aumentar sua altura até alcançar 10,6 metros do nível do solo, o que também era esperado, pois as parcelas de ar menos densas ascendem por convecção e as parcelas de ar mais densas ocupam os níveis mais superficiais. Assim, com o aumento de altura do drone, o sensor foi exposto a porções de ar menos densas, assim como também foi submetido a menor valor de peso de ar incidindo verticalmente sobre ele. Quanto à altura, que é obtida em função da pressão atmosférica medida, o comportamento linear de sua curva indica que seu cálculo apresenta valores coerentes (conforme apresentado na Figura 71).

Dessa forma, constatou-se que os sensores escolhidos para a elaboração do perfilador atmosféricos de baixo custo atendem à expectativa deste projeto, que é realizar uma experimentação atmosférica no interior da camada de superfície. Os perfis verticais gerados pelos dados observados dessa experimentação são analisados na seção a seguir.

Figura 71: Altura em função da pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Phantom 3 Standard com movimento ascendente no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 5 de setembro de 2022 (taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Altura em função da pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Phantom 3 Standard com movimento ascendente no campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense em 05/09/2022 das 10:25 às 10:38 AM



Fonte: autor.

5.7.2 Análise dos perfis verticais de dados ambientais da experimentação atmosférica

A experimentação atmosférica propriamente dita ocorreu no dia 14 de março de 2023. Nessa ocasião, semelhantemente ao teste de voo do dia 5 de setembro de 2023, os sensores funcionaram como esperado, de modo que foi possível coletar dados ambientais de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica até pouco abaixo do limite máximo de voo de 120 metros de altura do drone DJI Mavic Air 2, pois o cabo de tração fez com que a caixa do perfilador alcançasse o máximo de 117,5 metros de altura. Como ocorreram 3 voos consecutivos no período entre 08:00 e 09:00 AM desse dia, foi possível observar a evolução de cada parâmetro nesse intervalo.

Com relação à temperatura, no primeiro voo registrou-se valores máximos pouco superiores à 28°C na faixa entre 40 e 60 metros de altura, que corresponde à faixa entre 1010 e

1008 hPa de pressão atmosférica (conforme apresentado na Figura 72). Os dados do perfil desse voo indicam que houve uma inversão térmica desde o solo até pouco acima de 40 metros de altura, o que aparenta ser resultado remanescente do término do regime estável da camada de superfície noturna. A partir desse nível, a camada de superfície apresentou o comportamento de uma camada parcialmente neutra.

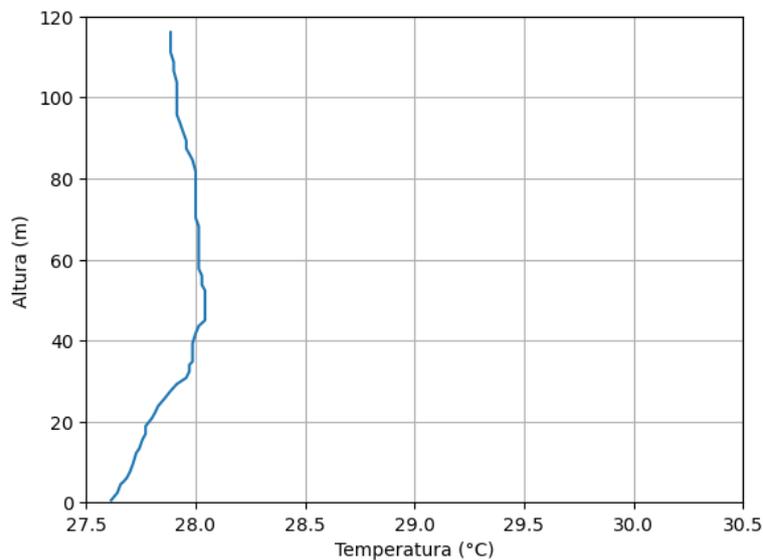
No segundo voo, os valores de temperatura foram superiores, chegando aos 28,5°C na faixa desde 80 metros (1006 hPa de pressão atmosférica) até o máximo de altura (conforme apresentado na Figura 73). Os dados desse voo apontam para a redução do gradiente de inversão observado no primeiro voo, apresentado uma camada de superfície predominantemente neutra, com muito pouca variação vertical da temperatura.

No terceiro voo a variação da temperatura foi ainda maior, passando a registrar 30,1°C nos primeiros 20 metros do perfil, com valores de 1014 a 1012 hPa de pressão atmosférica (conforme apresentado na Figura 74). Com relação ao perfil gerado para esse voo, seus dados indicam a ocorrência de uma pequena inversão nos primeiros 20 metros de altura, de onde a camada superfície passa a estar neutra até 60 metros, e, a partir desse nível até o topo, o perfil desenvolve o comportamento de uma camada de superfície instável, com variação vertical aproximadamente logarítmica da temperatura.

Desse modo, os dados dos três perfis de temperatura apontam para uma mudança de regime de camada de superfície, que varia desde uma camada estável noturna com ligeira inversão, passando por uma camada de estabilidade neutra, até manifestar o início da condição de instabilidade.

Figura 72: Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (primeiro perfil – das 08:03 às 08:14 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14/03/2023 (primeiro perfil - das 08:03 às 08:14 AM)

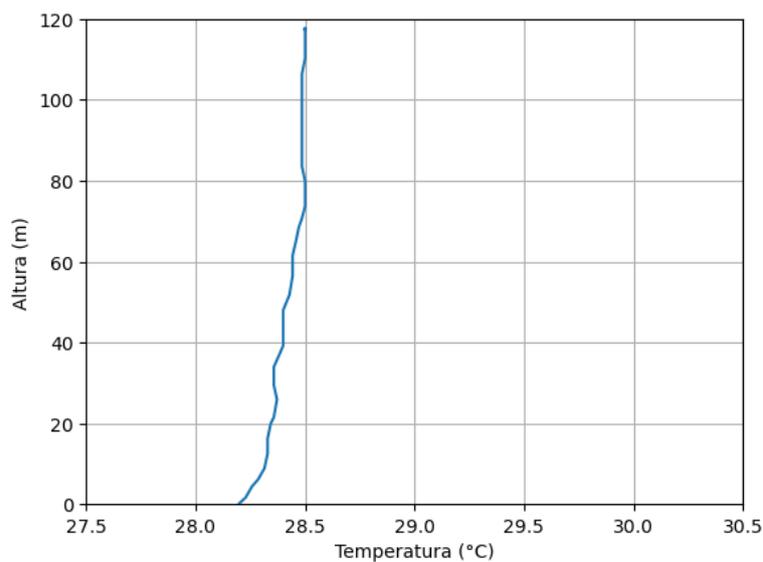


Tempo de amostragem de dados: 10 segundos

Fonte: autor.

Figura 73: Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (segundo perfil – das 08:19 às 08:26 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14/03/2023 (segundo perfil - das 08:19 às 08:26 AM)

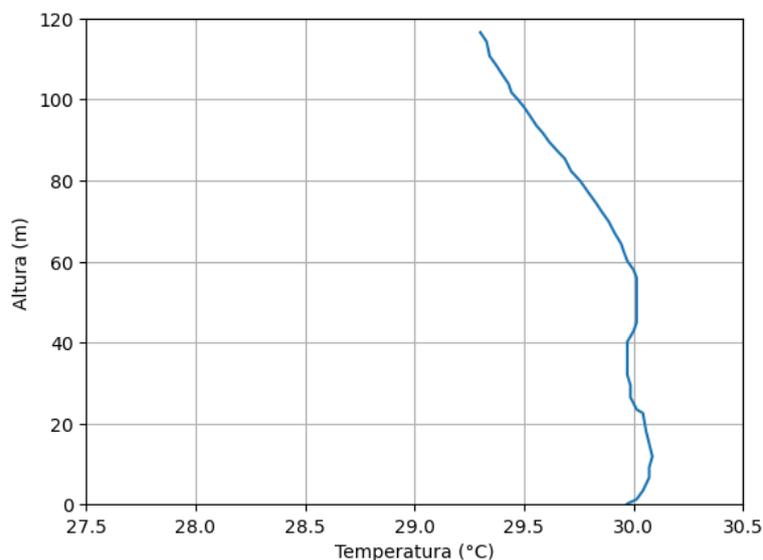


Tempo de amostragem de dados: 10 segundos

Fonte: autor.

Figura 74: Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (terceiro perfil – das 08:46 às 08:54 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Temperatura medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14/03/2023 (terceiro perfil - das 08:46 às 08:54 AM)



Tempo de amostragem de dados: 10 segundos

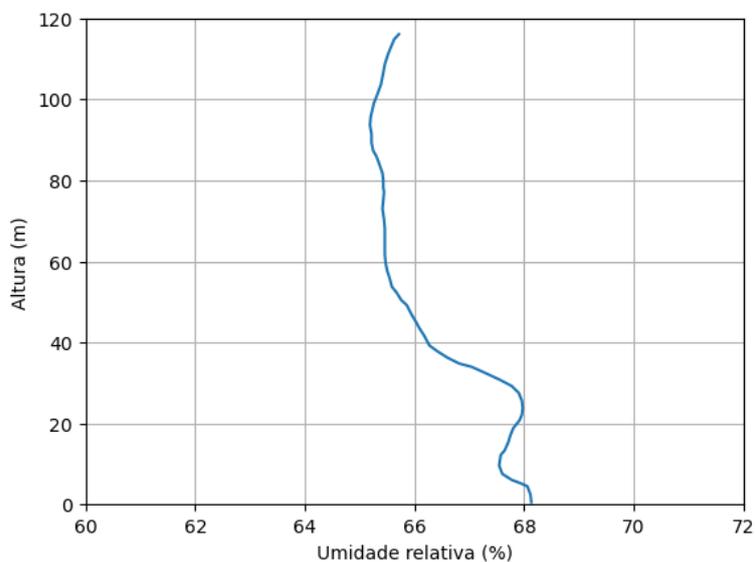
Fonte: autor.

Sobre a umidade relativa, no primeiro voo registrou-se valores entre 65% e 68% ao longo de todo o perfil (conforme apresentado na Figura 75). No segundo voo, os valores registrados ficaram entre 66,2% e 70,2% (conforme apresentado na Figura 76). E no terceiro voo, os valores de umidade relativa passaram a abranger uma faixa desde 70,8 % próximo ao nível do solo, ao redor dos 1014 hPa de pressão atmosférica, até o mínimo de 61,6% na faixa próxima de 80 metros de altura, entre 1006 e 1004 hPa de pressão atmosférica (conforme apresentado na Figura 77).

A faixa que compreende os máximos e mínimos de umidade relativa em cada perfil se tornou cada vez mais ampla com o passar do tempo e consequente aumento da temperatura, de modo que o terceiro perfil apresentou a variação mais pronunciada nos valores observados, com um aumento significativo da umidade próximo ao nível do solo, o que se mostra coerente com o incremento esperado da taxa de evaporação para o período matutino, já que o experimento foi realizado em um campo gramado. Além disso, a diminuição da umidade com a altura, de forma mais acentuada no último horário de medição, é mais um fator associado ao início do regime de instabilidade da camada de superfície.

Figura 75: Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (primeiro perfil – das 08:03 às 08:14 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14/03/2023 (primeiro perfil - das 08:03 às 08:14 AM)

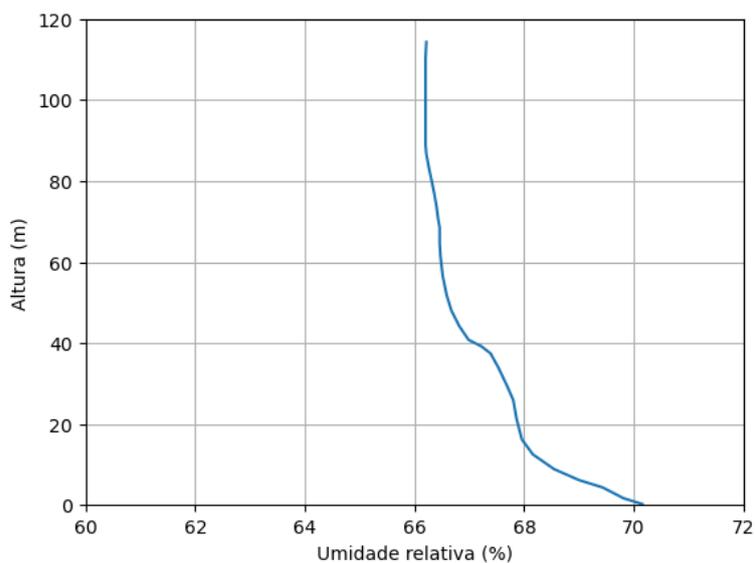


Tempo de amostragem de dados: 10 segundos

Fonte: autor.

Figura 76: Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (segundo perfil – das 08:19 às 08:26 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14/03/2023 (segundo perfil - das 08:19 às 08:26 AM)

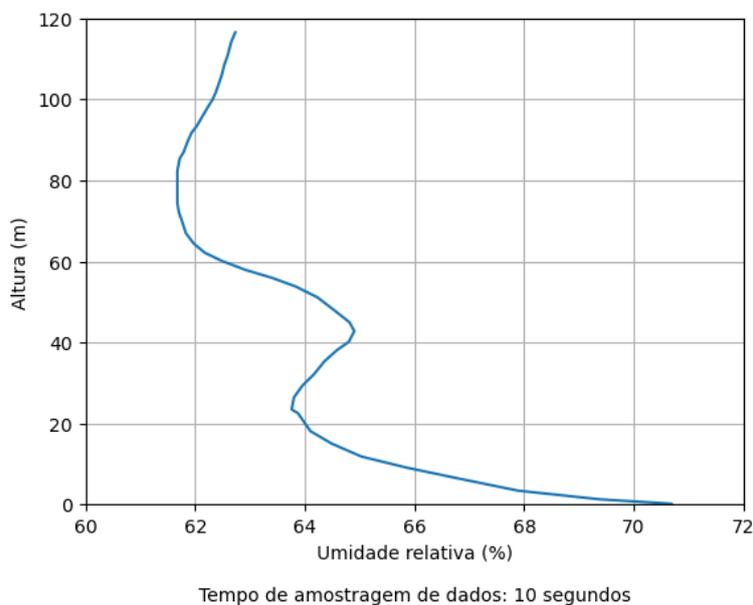


Tempo de amostragem de dados: 10 segundos

Fonte: autor.

Figura 77: Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (terceiro perfil – das 08:46 às 08:54 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Umidade relativa medida por sensor DHT22 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14/03/2023 (terceiro perfil - das 08:46 às 08:54 AM)



Fonte: autor.

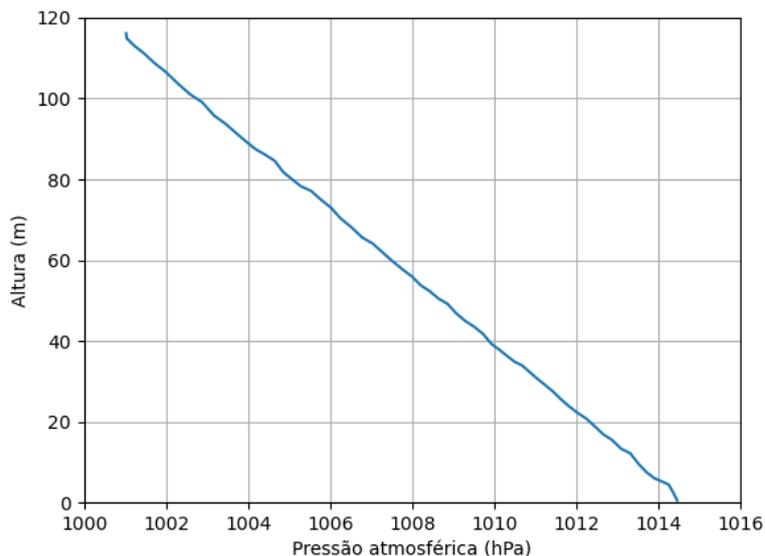
Em relação à pressão atmosférica, como os três voos alcançaram o máximo de altura de 120 metros (com a caixa do perfilador alcançando 2,5 metros a menos), todos os perfis gerados por essa experimentação registraram pressões na faixa entre 1014,4 e 1001 hPa (conforme Figura 78, Figura 79 e Figura 80).

Com relação à altura, é possível notar comportamento predominantemente linear em relação à pressão para os três perfis, com ligeiras oscilações que provavelmente são relacionadas à velocidade de subida do perfilador. Como citado anteriormente, a velocidade adotada pelo conjunto do perfilador se manteve entre 0,1 m/s e 0,4 m/s durante toda experimentação, o que é suficientemente baixa para evitar oscilações em voo, mas difícil de manter invariável, pois o controle remoto é bastante sensível, sendo capaz de demandar uma velocidade de até 4,0 m/s em subida.

É relevante destacar que os valores máximos de altura de 117,5 para todos os voos são corroborados pelo altímetro do drone Mavic Air 2, que registrou a marca limite de 120 metros (conforme Figura 67). Isso contribui para a validação das medições realizadas.

Figura 78: Pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (primeiro perfil – das 08:03 às 08:14 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14/03/2023 (primeiro perfil - das 08:03 às 08:14 AM)

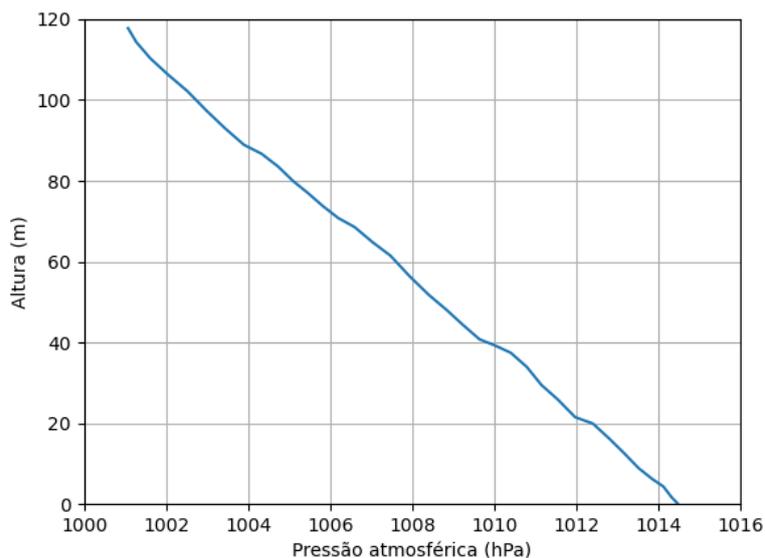


Tempo de amostragem de dados: 10 segundos

Fonte: autor.

Figura 79: Pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (segundo perfil – das 08:19 às 08:26 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14/03/2023 (segundo perfil - das 08:19 às 08:26 AM)

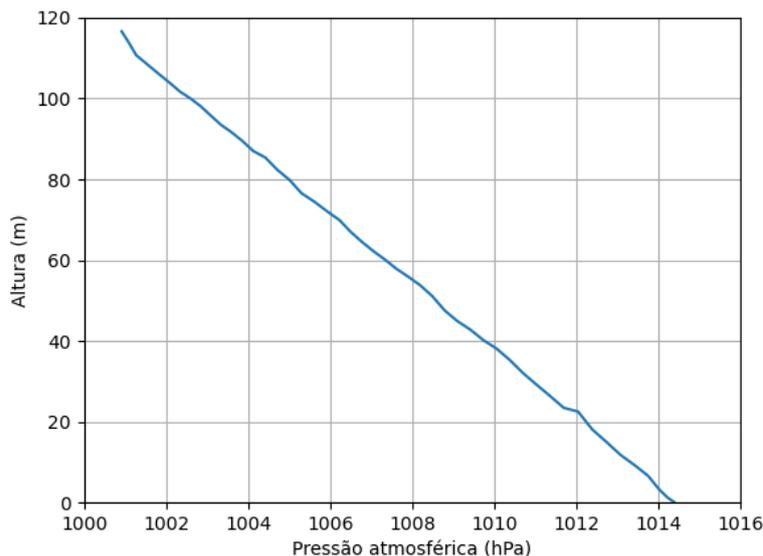


Tempo de amostragem de dados: 10 segundos

Fonte: autor.

Figura 80: Pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14 de março de 2023 (terceiro perfil – das 08:46 às 08:54 AM – taxa de amostragem da dados: 10 segundos).

Pressão atmosférica medida por sensor BMP280 embarcado no drone Mavic Air 2 com movimento ascendente em Itaipu em 14/03/2023 (terceiro perfil - das 08:46 às 08:54 AM)



Tempo de amostragem de dados: 10 segundos

Fonte: autor.

Essa experimentação atmosférica foi significativa para demonstrar a aplicabilidade do perfilador de baixo custo com seus sensores e sua configuração. A capacidade de detectar a inversão térmica e a mudança de regime de camada de superfície, desde o comportamento estável, passando pelo neutro, até o instável, viabiliza que esse perfilador seja utilizado em estudos sobre poluição atmosférica e previsão imediata do tempo (*nowcasting*), por exemplo.

Os resultados também confirmam a viabilidade do emprego de drones para tal fim, desde que sejam observados os devidos cuidados práticos, como estabilidade em voo, e legais, como cadastro junto à Agência Nacional de Aviação Civil e autorização para acesso ao espaço aéreo junto à Força Aérea Brasileira.

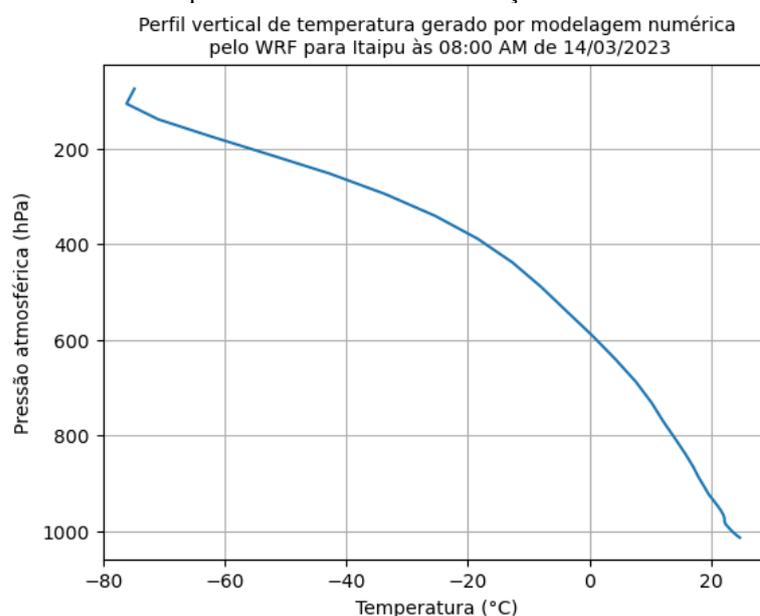
5.7.3 Análise dos perfis verticais de modelagem numérica pelo WRF-Python

A experimentação atmosférica no interior da camada de superfície realizada em 14 de março de 2023 foi relevante para reforçar a viabilidade de se adotar a metodologia de uso drones e prototipagem de baixo custo para medição de parâmetros atmosféricos, mas é interessante avaliar qualitativamente os perfis gerados pelos dados observados.

Assim, foram gerados dados ambientais por modelagem numérica pelo modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) do LAMMOC, os quais foram pós-processados pelo pacote de rotinas WRF-Python para a elaboração de perfis verticais que possam ser usados para comparação com os perfis relativos à experimentação atmosférica. Como a experimentação ocorreu entre 08:00 e 09:00 AM, foram gerados perfis tanto para 08:00 AM quanto para 09:00 AM, tanto de toda a troposfera como só da região da camada de superfície.

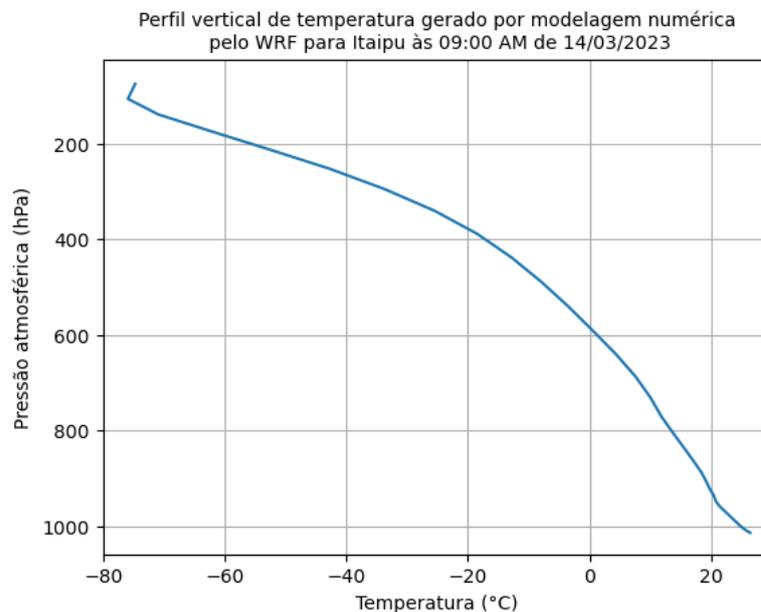
Com relação aos perfis verticais de temperatura para toda a troposfera nos dois horários (conforme Figura 81 e Figura 82), é possível perceber que eles são semelhantes, com valores máximos pouco superiores aos 20°C em baixos níveis com mínimos próximos de -80°C no alto da troposfera (cerca de 10 a 12 km de altura), mas as maiores diferenças são percebidas em baixos níveis, o que contribui para comparação com os perfis de dados observados (o que é tratado mais adiante ainda nesta seção), uma vez que a experimentação não gerou dados em níveis tão altos quanto a modelagem.

Figura 81: Perfil vertical de temperatura para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 08:00 AM de 14 de março de 2023.



Fonte: autor.

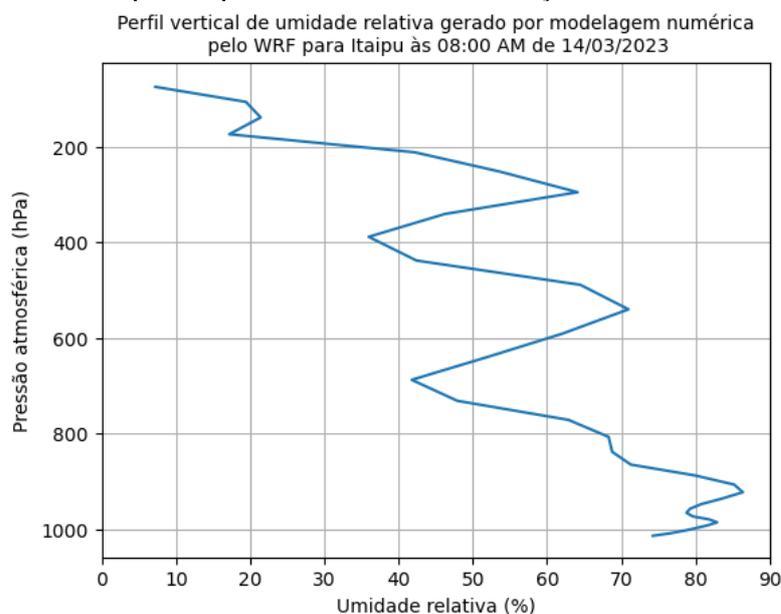
Figura 82: Perfil vertical de temperatura para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 09:00 AM de 14 de março de 2023.



Fonte: autor.

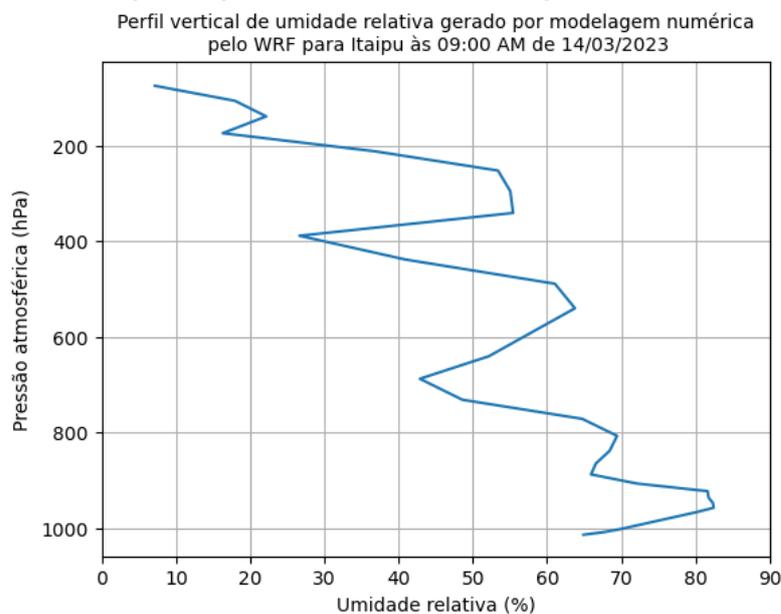
Os perfis verticais de umidade relativa para esses dois horários (conforme Figura 83 e Figura 84) também apresentam comportamento semelhante entre si, com acentuadas oscilações em baixos, médios e altos níveis. Os valores máximos são registrados em baixos níveis, sendo pouco superiores a 80%, e o valor mínimo de ambos é registrado em altos níveis, coincidindo em 7%.

Figura 83: Perfil vertical de umidade relativa para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 08:00 AM de 14 de março de 2023.



Fonte: autor.

Figura 84: Perfil vertical de umidade relativa para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 09:00 AM de 14 de março de 2023.



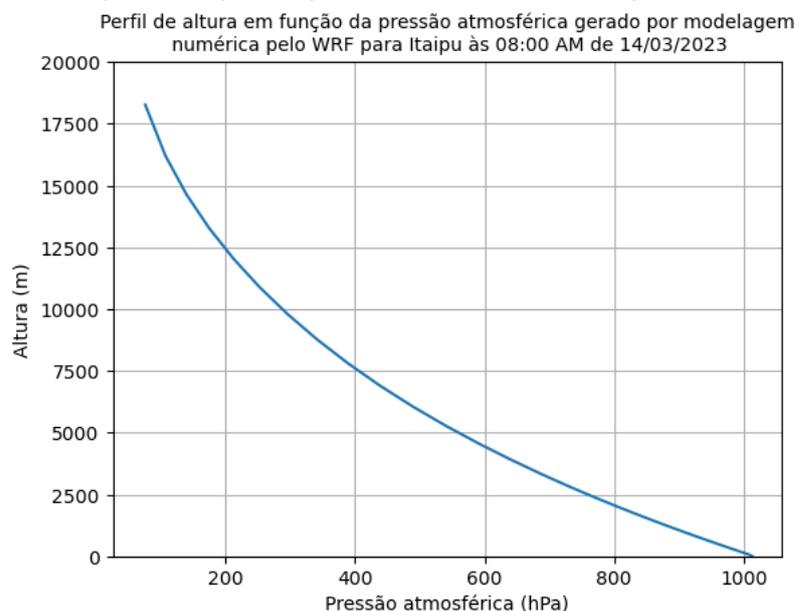
Fonte: autor.

Esse comportamento de pouca variação que se nota tanto para os perfis de temperatura quanto para os de umidade indicam que as condições do tempo estavam estáveis no intervalo considerado, o que foi percebido visualmente em campo e que favoreceu a segurança da experimentação atmosférica.

Os perfis de altura em função da pressão atmosférica para os dois horários considerados (conforme Figura 85 e Figura 86) não apresentam qualquer diferença notória, reforçando a percepção de que a condição do tempo era estável.

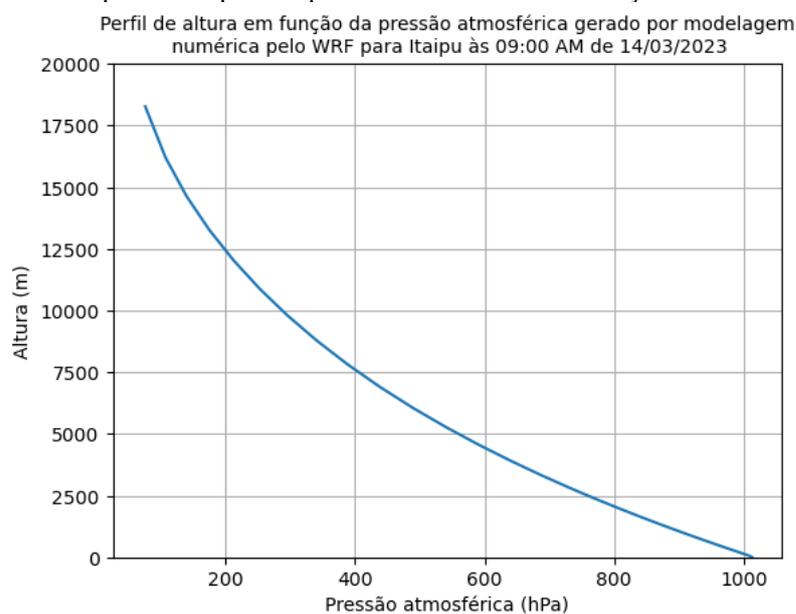
Esses perfis possuem comportamento curvilíneo, diferentemente dos perfis gerados por dados observados, mas isso não representa prejuízo na comparação entre eles, pois essa variação de comportamento não é perceptível ao nível da camada de superfície.

Figura 85: Perfil de altura em função da pressão atmosférica para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 08:00 AM de 14 de março de 2023.



Fonte: autor.

Figura 86: Perfil de altura em função da pressão atmosférica para toda a troposfera gerado por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu às 09:00 AM de 14 de março de 2023.



Fonte: autor.

Cabe ressaltar que os dados observados pelo perfilador atmosférico desenvolvido são restritos à camada de superfície. Deste modo, para a comparação entre perfis verticais gerados por dados observados e modelados, foi necessário empregar as partes mais superficiais dos perfis de modelagem numérica. Com isso, foram utilizados os 5 níveis verticais de maiores

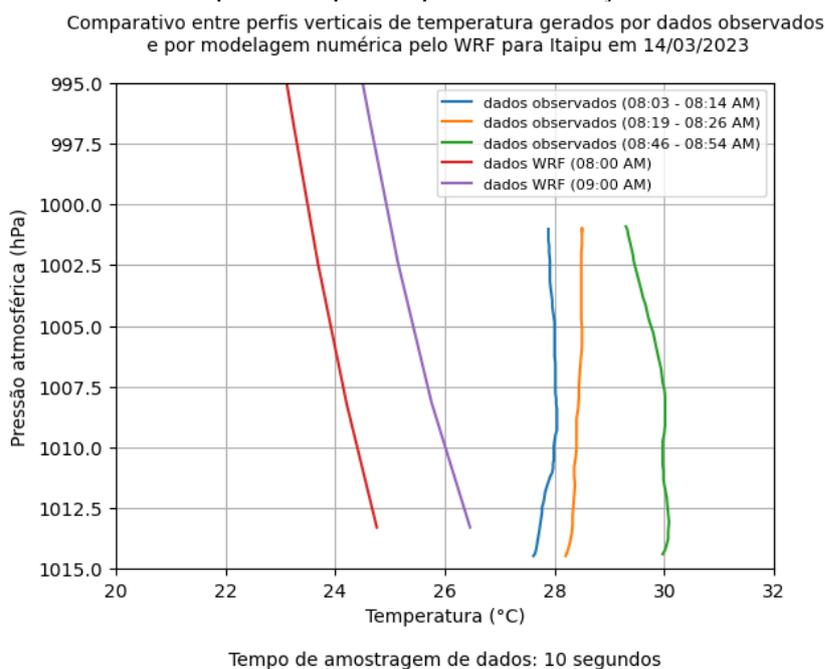
pressões atmosféricas (e menores cotas altimétricas) do modelo WRF, variando numa faixa de 990,8 a 1013,4 hPa.

Com relação à comparação entre os perfis verticais de temperatura gerados por dados observados e por modelagem numérica (apresentada na Figura 87), é possível notar que em ambos os casos houve incremento nos valores em função do avanço do horário. Os dados observados variam de 27,6°C a 30,1°C, enquanto os modelados variam de 24,8°C a 26,4°C no nível mais inferior, o que representa uma diferença máxima de 3,7°C.

Percebe-se ainda que a detecção da inversão térmica e de uma sutil mudança de regime da camada de superfície, desde estável, passando pelo neutro, até o instável, o que somente é visto nos dados observados, pois os dados modelados não apresentam sensibilidade suficiente para esse fim.

Tal fato evidencia a importância deste tipo de experimento, já que ele poderia ser realizado em todos os dias (a um custo muito baixo – relacionado só a energia elétrica associada ao carregamento das baterias) e estes dados poderiam ser assimilados por modelos operacionais, quer seja o caso do WRF ou de diversos outros modelos numéricos, aumentando a sua capacidade de representar os fluxos de superfície e, conseqüentemente, toda a energia térmica transferida para a média atmosfera.

Figura 87: Comparativo entre perfis verticais de temperatura gerados por dados observados e por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu em 14 de março de 2023.

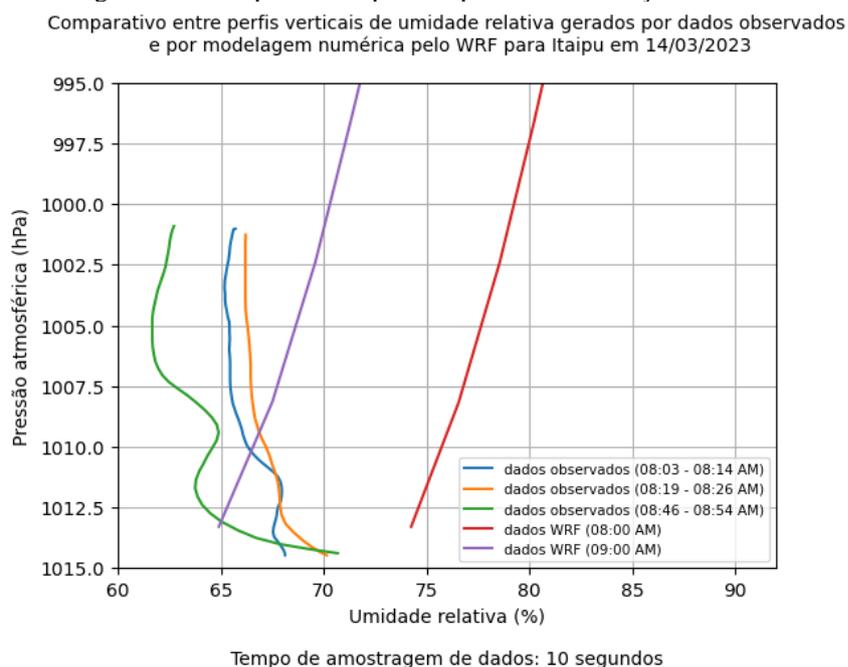


Fonte: autor.

No caso da comparação entre os perfis verticais de umidade relativa gerados por dados observados e por modelagem (apresentada na Figura 88), pode-se perceber que os valores dos dados observados primeiramente experimentam um incremento para depois sofrerem uma redução de maior magnitude, enquanto os valores dos modelados apresentam apenas o decréscimo no intervalo considerado.

Observa-se que na região em que se é possível realizar a comparação dos dados, a umidade relativa simulada pelo WRF foi predominantemente superior à observada no experimento, o que pode estar associado com a subestimativa da temperatura do ar verificada nas simulações do modelo nesses mesmos níveis, o que aumentaria a capacidade de retenção de vapor d'água na parcela de ar e, conseqüentemente, a umidade relativa.

Figura 88: Comparativo entre perfis verticais de umidade relativa gerados por dados observados e por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu em 14 de março de 2023.

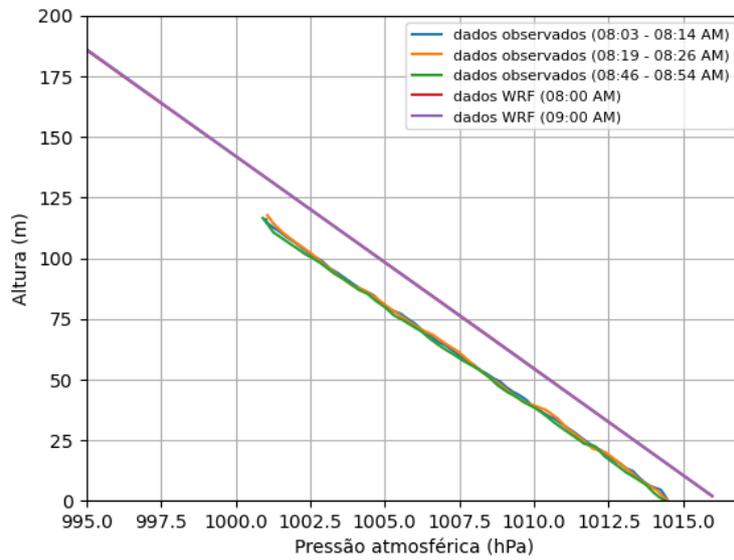


Fonte: autor.

Quanto à comparação entre os perfis de altura em função da pressão atmosférica gerados por dados observados e por modelagem (apresentada na Figura 89), há correlação entre os perfis de suas modalidades, mas um descasamento que varia de 1,6 a 1,8 hPa entre os perfis gerados por dados observados e modelados, o que pode estar associado com a diferença na densidade atmosférica entre ambos, já que a temperatura próxima da superfície simulada pelo WRF foi cerca de 4°C menor do que a observada.

Figura 89: Comparativo entre perfis de altura em função da pressão atmosférica gerados por dados observados e por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu em 14 de março de 2023.

Comparativo entre perfis de altura em função da pressão atmosférica gerados por dados observados e por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu em 14/03/2023



Tempo de amostragem de dados: 10 segundos

Fonte: autor.

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver juntamente ao LAMMOC-UFF um perfilador atmosférico de baixo custo baseado em prototipagem em Arduino para ser embarcado em drone, gerar perfis verticais atmosféricos na camada de superfície com esse perfilador, analisar comparativamente os perfis verticais gerados por dados observados em experimentação atmosférica com aqueles obtidos por meio do modelo WRF, pós-processados pelo WRF-Python, e, finalmente, avaliar como essa abordagem pode ser relevante para meteorologia operacional e assimilação de dados.

Para tanto, a condução de testes de voo foi fundamental para que o perfilador atmosférico de baixo custo chegasse a seu estágio final, pois foi através desses testes que se constatou a funcionalidade da montagem e da configuração do perfilador, a empregabilidade dos sensores escolhidos, as dimensões adequadas do cabo de tração, e, por fim, a estabilidade em voo. Com isso, foi possível conduzir uma experimentação atmosférica, coletando dados que subsidiaram a geração de perfis verticais.

A fim de se analisar comparativa e qualitativamente esses perfis gerados, o WRF do LAMMOC foi utilizado para realizar uma simulação para a ocasião da experimentação, provendo dados modelados para serem pós-processados pelo WRF-Python, que gerou seus próprios perfis.

Como resultado da comparação entre os perfis gerados por dados observados e aqueles gerados por dados de modelagem numérica, foi possível notar que a capacidade de percepção da inversão térmica e da mudança de regime de camada de superfície, desde seu comportamento estável, passando pelo neutro, até o instável, faz com que a metodologia do uso desse perfilador possa ser empregada em diversos estudos atmosféricos, tais como poluição atmosférica, calibração de modelos numéricos e previsão imediata do tempo (*nowcasting*).

Com relação à altura em função da pressão atmosférica, é verificado um descasamento que varia de 1,6 a 1,8 hPa entre os perfis gerados por dados observados e modelados, que provavelmente se deve à modelagem dos dados de pressão.

Portanto, ao ser realizada essa análise comparativa entre perfis gerados por dados observados e modelados, avalia-se que o potencial de empregabilidade dessa metodologia para proveito em áreas como meteorologia operacional e assimilação de dados de modelos numéricos se mostra promissor, uma vez que é possível se obter qualidade satisfatória em dados de experimentações atmosféricas com uso de drones e instrumentação de baixo custo para medição de parâmetros ambientais.

Cabe ressaltar que essa modalidade de embarque de sensores em drone viabiliza medições sucessivas indefinidamente, sendo esse um significativo diferencial em relação ao lançamento de radiossondas convencionais transportadas por balão meteorológico em função dos altos custos operacionais envolvidos com tais lançamentos.

Desta forma, acredita-se que o trabalho cumpriu seu propósito, que foi o de construir uma abordagem metodológica que permite sua replicação e aprimoramento para fins de medições do perfil vertical da atmosfera, inicialmente limitando-se à camada de superfície, além de ter contribuído para ilustrar a deficiência dos modelos atmosféricos em representar os fluxos de superfície, o que gera impactos na previsibilidade de diversas variáveis e, entre elas, a precipitação, por exemplo. Diante disso, pode-se afirmar que o objetivo geral deste trabalho foi satisfatoriamente alcançado para cada um dos objetivos específicos a ele relacionados.

Concernente a trabalhos futuros, recomenda-se a realização intensiva de mais experimentos, em diferentes horários do dia, e que outros sensores sejam considerados na prototipagem de perfiladores atmosféricos, preferencialmente aqueles que cumpram diretrizes emanadas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Recomenda-se também que se estude um modo de realizar medições de velocidade e direção do vento, levando em consideração o tipo de sensor a ser empregado e a capacidade de carga do meio transporte.

Por fim, faz-se oportuno destacar que este trabalho teve como motivações a redução de impactos de desastres naturais e a propagação da ciência através de metodologia de baixo custo. Quanto à multidisciplinaridade, o estudo conduzido abrangeu eletrônica de prototipagem, 3 linguagens de programação distintas (Arduino, FORTRAN e Python), além de operação de aeronaves remotamente pilotadas. E, a respeito do que se entende por “fronteira do conhecimento” (a saber, avanços mais recentes e relevantes em determinada área do conhecimento científico), estudos relacionando ARP e sensores de parâmetros ambientais são recentes e apresentam muitas perspectivas futuras, tais como as descritas neste trabalho. Deste modo, entende-se que a pesquisa em lide obteve êxito em seus objetivos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOSONG ELETRONICS. **Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)**. Aosong Eletronics Limited Company, 2017. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132459/ETC2/DHT22.html>. Acesso em: 10 mar. 2022.

ARDUINO. **Arduino Uno Rev3**, 2023. Disponível em: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?selectedStore=us>. Acesso em: 20 fev. 2023.

BENDER, F. D. **Avaliação da Previsão do tempo em São Paulo com o Modelo Operacional WRF**, 2012. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BOSCH. **BMP280 Digital Pressure Sensor**. Bosch Sensortec, 2018. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132069/BOSCH/BMP280.html>. Acesso em: 10 mar. 2022.

BRASÍLIA, Ministério da Infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial, N° 94, emenda N° 2**. 2021. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-1/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf. 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.

BRETHERTON, C. S. et al. The Epic 2001 Stratocumulus Study. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 85, p. 967-977, 2004.

CARVALHO, J. C.; et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

CARVALHO, M. A. V.; ABRUNHOSA, M.L.; LOPES, J.R.O. **Manual de instalação, compilação e execução do modelo de mesoescala WRF no ICEA (versão 3.4.1)**. São José dos Campos: Instituto de Controle do Espaço Aéreo, 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/7197053/manual_de_instala%C3%87%C3%83o_compila%C3%87%C3%83o_e_execu%C3%87%C3%83o_do_modelo_de_mesoescala_wrf_no_icea_vers%C3%83o_3_4_1_miguel_%C3%82ngelo_vargas_de_carvalho_pbca_icea_milton_luiz_abrunhosa_fsdtp_icea_instituto_de_controle_do_espao%C3%87o_a%C3%89reo. Acesso em: 2 fev. 2021.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de Defesa Civil: estudos de riscos e medicina de desastres**. 1998, Brasília, 283p. Disponível em: <http://www.defesacivil.mg.gov.br/images/documentos/Defesa%20Civil/manuais/GLOSSARIO-Dicionario-Defesa-Civil.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2023.

CATALDI, M. **Simulação de Camadas Limite estratificadas em Túnel de vento**, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 2002.

CATALDI, M.; et al. Atmospheric experimentation with low-cost radiosonde attached to a drone. In: VIII Workshop on Biosystems Engineering, 2022, Niterói. **Anais eletrônicos...** Niterói: AGRHA, 2023. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/27951>. Acesso em 10 mar. 2023.

CASSANO, J. J.; HIGGINS, M. E.; SEEFELDT, M. W. Performance of the Weather Research and Forecasting Model for month-long Pan-Arctic simulations. **Monthly Weather Review**, v. 139, p. 3469-3488, 2011.

COMIN, A. N. et al. Análise do Desempenho do Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) com Diferentes Esquemas de Microfísica e Camada Limite Planetária na Ilha Deception, Antártica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 415-427, 2016.

EXAME. **Um resumo do estrago do furacão Irma no Caribe e EUA até agora**, 2017. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/mundo/o-que-se-sabe-do-furacao-irma/>. Acesso em: 20 fev. 2023.

GALANTE, A. C.; GARCIA, R. F. Sistema de aquisição de dados de sensores de baixo custo baseado no Arduíno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. **Anais 2014**. São Pedro, 2014.

GALL, M. et al. The Unsustainable Trend of Natural Hazard Losses in the United States. **Sustainability**, v.3, p. 2157–2181, 2011.

GANDU, A. W. **Introdução a modelagem atmosférica de mesoescala**. Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GAR, 2015. **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction**. Disponível em: https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/gar-pdf/GAR15_Pocket_EN.pdf. 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.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX)**, 2012. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/srex/>. Acesso em: 20 jan. 2021.

JONES, R. et al. RepRap – the replicating rapid prototyper. **Robotica**. v. 29, n. 1, p. 177-191, 2011.

KARACHALIOS, T.; KANELLOPOULOS, D.; LAZARINIS, F. Arduino sensor integrated drone for weather indices: a prototype for pre-flight preparation. arXiv preprint arXiv:2106.16083, 2021.

KROGSAETER, O.; REUDER, J. Validation of boundary parameterization schemes in the Weather Research and Forecasting (WRF) model under the aspects of offshore wind energy

applications – part II: boundary layer height and atmospheric stability. **Wind Energy**, v. 18, n. 7, p. 1291-1302, 2015.

LADWIG, W. **WRF-Python (version 1.3.4.1)**. UCAR/NCAR: Boulder, 2017. Disponível em: <https://github.com/NCAR/wrf-python>. Acesso em: 15 jan. 2023.

LAITINEN, A. **Utilization of drones in vertical profile measurements of the atmosphere**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Naturais) – Tampere University, 2019.

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, p. 341-353, 2016.

LUZ, P. C. **Precipitações intensas na cidade do Rio de Janeiro: Probabilidade e Previsibilidade**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

LUZ BARCELLOS, P.C. **Prevenção a desastres naturais: experimentos e alterações nas parametrizações de chuva**. 2019. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.

MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias: Conceitos básicos**. 2007, Santa Maria, Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.02.16.22/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2021.

MASIC, A. et al. Drone measurements of temperature inversion characteristics and particulate matter vertical profiles in urban environments. **DAAAM Symposium**. Vienna, 2021. p. 0123–0126.

MCROBERTS, M. **Arduíno Básico**. São Paulo: Novatec, 2011.

MOTOROLA. **Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated: MPX5100/MPXV5100 Series**. Motorola, 2004. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/84246/MOTOROLA/MPX5100DP.html>. Acesso em: 10 mar. 2022.

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: https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Fabiano_Oliveira/material_instrucional_Fabiano_Oliveira.pdf. Acesso em: 15 ago. 2022.

POWERS, J. G. et al. Realtime mesoscale modeling over Antarctica. **American Meteorological Society**, v. 84, n. 11, p. 1533-1545, 2003.

POWERS, J. G. et al. **The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 98, n. 8, p. 1717-1737, 2017.

QUEIROZ, L. J.; MAURÍCIO, C. R. M.; MATRAKAS, M. D. Construção de uma impressora 3D: Projetos abertos de baixo custo e possibilidades da aplicação na educação. **The Academy Society Journal**, v. 3, n. 1, p. 113-118, 2019.

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.

RIBEIRO, M. A. (1997) **Medição de Vazão – Fundamentos e Aplicações**. 5 Ed. Salvador: TEK Treinamento & Consultoria, 1997.

RIVA, L. F. O. **Estudo sobre VANT ancorado através de um cabo**. 2020. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Aeroespacial) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/218495>. Acesso em: 15 jun. 2021.

ROCHA, F. P. **Estudos de ciclones e de padrões de circulação atmosférica no oceano Atlântico Sul próximo à costa das regiões sul e sudeste do Brasil usando dados da reanálise do ERA-Interim**. 2014. 145 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

SAPUCCI, L. F. et al. Predições do atraso zenital troposférico na América do Sul para posicionamento GNSS em tempo real. **Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, p. 1-13, 2003. Disponível em: http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/08.18.08.53/doc/Sapucci_Predicoes%20do%20atraso.pdf. Acesso em: 12 jun. 2021.

SEIBERT, P. et al. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 1001-1027, 2000.

SILVA, C. M. S.; LYRA, R. F.F. Comparação do perfil de vento medido por Radiossondas e por um SODAR durante o experimento DRYTO WET-AMC/LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 356-363, 2009.

SILVA, A. F.; FISCH, G. Avaliação do Modelo WRF para a Previsão do Perfil do Vento no Centro de Lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 259-270, 2014.

SKAMAROCK, W. C. et al. A description of the Advanced Research WRF version 3. **NCAR/TN-475+STR**. 2008, 113 p. Disponível em: [doi:10.5065/D68S4MVH](https://doi.org/10.5065/D68S4MVH). Acesso em: 5 fev. 2021.

SOLOMAN, S. **Sensors Handbook**. 2 Ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2010.

SOUSA, P. A. et al. Lançamento de uma sonda atmosférica de baixo custo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 44, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/DpW34H7BwrXzCgMS5yysr9y/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 14 ago. 2022.

SQUITTER. **Radiossondas (estação meteorológica de altitude)**, 2023. Disponível em: <http://www.squitter.com.br/produtos/10/radiossondas-estacao-meteorologica-de-altitude>. Acesso em: 29 jan. 2023.

STRAWBRIDGE, K. B.; SNYDER, B. J. Planetary boundary layer height determination during Pacific 2001 using the advantage of a scanning lidar instrument. **Atmospheric Environment**. v. 38, p. 5861-5871, 2004.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Kluwer Academic, 1988.

STULL, R. B. **Meteorology for Scientists & Engineers**, 3 Ed. University of British Columbia, Vancouver, 2011.

STULL, R. B. **Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science**, Versão 1.02b. University of British Columbia, Vancouver, 2017.

TOBIN G. A, MONTZ B. E. **Natural hazards: explanation and integration**. New York: The Guilford Press, 1997.

TOMINAGA L. K., SANTORO J., AMARAL R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico. 2009, 196 p.

UNISDR. **The Human Cost of Weather-Related Disasters. 1995-2015**. 2015. Disponível em: http://www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21_WeatherDisastersReport_2015_FINAL.pdf. Acesso em: 18 jan. 2021.

UNISDR - International Strategy for Disaster Reduction. **Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives**. Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), Genebra, Suíça. 2004, 152p. Disponível em: <http://www.unisdr.org>. Acesso em: 11 fev. 2023.

UNISDR - International Strategy for Disaster Reduction. **Terminology on Disaster Risk Reduction**. 2009. Disponível em <http://www.unisdr.org>. Acesso em: 11 fev. 2023.

VANZAN, M. E. P. **Avaliação numérica na influência da TSM e parametrizações na trajetória de ciclones tropicais no Atlântico**. 2020. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biosistemas) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

W3 News. **Furacão Catarina: 15 anos de destruição**, 2019. Disponível em: <https://portalw3.com.br/catarina-15-anos-do-maior-furacao-do-pais/>. Acesso em: 27 jan. 2023.

WRF USERS PAGE. **WRF Model Physics Options and References**, 2023. Disponível em: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_references.html#SL. Acesso em: 22 fev. 2023.

WRF-ARW ONLINE TUTORIAL. **Basics for Running the Model**, 2023. Disponível em: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/index.php>. Acesso em: 22 fev. 2023.

ZUCCA, R. **Desenvolvimento de impressora 3D de baixo custo para prototipagem de peças para o meio rural**. 2019. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/943>. Acesso em: 12 jun. 2021.

APÊNDICE A – *Script* importado para a placa Arduino Uno

```
//SCRIPT DE PERFILADOR ATMOSFÉRICO (SENSORES DHT22, BMP280 E
MPX5100DP)
```

```
//
```

```
// Feito por David Christian de Lima Ferreira
```

```
//BIBLIOTECAS
```

```
#include <DHT.h> //TEMPERATURA
```

```
#include <DHT_U.h> //UMIDADE
```

```
#include <SPI.h> //COMUNICAÇÃO DO MODULO SDCARD
```

```
#include <SD.h> //CARTÃO SDCARD
```

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <DS3231.h>
```

```
#include <Adafruit_Sensor.h>
```

```
#include <Adafruit_BMP280.h>
```

```
//#include <Adafruit_I2CDevice.h>
```

```
//#include <RTClib.h>
```

```
#define DHTPIN 2 //PINO DIGITAL AO QUAL O SENSOR DHT22 ESTÁ CONECTADO
```

```
#define DHTTYPE DHT22 //DHT 22 (AM2302)
```

```
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); //INICIALIZA O SENSOR DHT
```

```
RTClib RTC; // INICIALIZA O REAL TIME CLOCK (RTC)
```

```
Adafruit_BMP280 bmp; //OBJETO DO TIPO Adafruit_BMP280 (I2C)
```

```
// VARIÁVEIS
```

```
float T, h, P, A, voltagem, velocidade;
```

```
int YEAR, MONTH, DAY, HOUR, MINUTE, SECOND;
```

```
uint32_t delayMS;
```

```
DS3231 Clock;
```

```

bool Century = false;
bool h12;
bool PM;
byte ADay, AHour, AMinute, ASecond, ABits;
bool ADy, A12h, Apm;
byte year, month, date, DoW, hour, minute, second;

File arqdht;

void setup()
{
  // SINAL LUMINOSO DE FUNCIONAMENTO
  pinMode(10, OUTPUT); // configura o pino digital 10 como saída

  pinMode(A0, INPUT); //PINO ANALOGICO AO QUAL O SENSOR MPX5100DP ESTÁ
  CONECTADO
  analogReference (INTERNAL); // MUDA A REFERÊNCIA PARA 1.1V

  Serial.begin(57600); // INICIALIZA O MONITOR SERIAL
  dht.begin(); //INICIALIZA O SENSOR DHT22
  Wire.begin();
  delay(1000);
  delayMS = 8000; // CONFIGURA O INTERVALO ENTRE AS MEDIÇÕES EM
  MILISSEGUNDOS
  // CICLO COMPLETO = delayMS + tempo LED aceso + tempo LED apagado

  // CONFIGURAÇÃO INICIAL DE DIA DA SEMANA, HORA E DATA ("COMENTAR"
  APÓS CONFIGURAR)
  Clock.setHour(10); //Set the hour
  Clock.setMinute(29); //Set the minute
  Clock.setSecond(58); //Set the second
  Clock.setDate(05); //Set the date of the month
  Clock.setMonth(9); //Set the month of the year

```

```
Clock.setYear(22); //Set the year (Last two digits of the year)
Clock.setDoW(2); //Set the day of the week

Serial.print("Inicializando SD card...");
if (!SD.begin(4))
{
  //MENSAGEM DE FALHA
  Serial.println("Inicialização falhou!");
  while (1);
}
Serial.println("Inicialização do SD card feita.");

Serial.print("Inicializando BMP280...");
if (!bmp.begin(0x76))
{
  //MENSAGEM DE FALHA
  Serial.println(F("Inicialização falhou!"));
  while (1);
}
Serial.println("Inicialização do BMP280 feita.");

arqdht = SD.open("DHT22.csv", FILE_WRITE); //CRIA ARQUIVO DE DADOS
if (arqdht)
{
  Serial.println("Arquivo aberto");
}
else
{
  Serial.println("Erro na abertura do arquivo");
}
arqdht.close();

//CRIANDO CABEÇALHO DE DADOS NO ARQUIVO
```

```

    arqdht = SD.open("DHT22.csv", FILE_WRITE); //ABRE O ARQUIVO CRIADO NO SD
CARD
    arqdht.println("Dia,Hora,Temperatura,Umidade,Pressao,Altitude,Vento    (voltagem),Vento
(m/s)");
    arqdht.close();

}

void loop()
{
    // SINAL LUMINOSO DE FUNCIONAMENTO
    digitalWrite(10, HIGH); // ativa o pino digital 10
    delay(1000);           // espera por um segundo
    digitalWrite(10, LOW); // desativa o pino digital 10
    delay(1000);           // espera por um segundo

    DateTime now = RTC.now();

    Serial.println(" ");
    Serial.print(now.year(), DEC);
    Serial.print('/');
    Serial.print(now.month(), DEC);
    Serial.print('/');
    Serial.print(now.day(), DEC);
    Serial.print(' ');
    Serial.print(now.hour(), DEC);
    Serial.print(':');
    Serial.print(now.minute(), DEC);
    Serial.print(':');
    Serial.print(now.second(), DEC);
    Serial.println();

    P = bmp.readPressure();

```

```

Serial.print(F("Pressão: "));
Serial.print(P / 100);
Serial.println(" hPa (Hectopascal)");

A = bmp.readAltitude(1027.2), 0; //A=bmp.readAltitude(PRESSÃO AO NÍVEL DO MAR),0
Serial.print(F("Altitude aprox.: "));
Serial.print(A);
Serial.println(" m (Metros)");

arqdht = SD.open("DHT22.csv", FILE_WRITE); //ABRE O ARQUIVO CRIADO NO SD
CARD

if (arqdht)
{
  //Serial.println("Aberto com sucesso");

  T = dht.readTemperature(); //RECEBE TEMPERATURA
  if (isnan(T))
  {
    Serial.println("Erro ao ler a Temperatura!"); //MENSAGEM DE ERRO
  }
  else
  {
    Serial.print("Temperatura: ");
    Serial.print(T);
    Serial.print(" *C");
  }

  Serial.print(" / ");

  h = dht.readHumidity(); // RECEBE UMIDADE
  if (isnan(h))
  {

```

```
Serial.println("Erro ao ler a Umidade!"); // MENSAGEM DE ERRO
}
else
{
Serial.print("Umidade: ");
Serial.print(h);
Serial.println("%");
}

Serial.print(" / ");

voltage = analogRead(A0); // RECEBE VENTO BRUTO (VOLTS)
if (isnan(h))
{
Serial.println("Erro ao ler o Vento!"); // MENSAGEM DE ERRO
}
else
{
Serial.print("Vento (bruto): ");
Serial.print(voltage);
Serial.print("V");
}

Serial.print(" / ");

velocity = 1.0424 * voltage - 184.46; // CALCULA VENTO (M/S) - TRABALHO
FELLIPE FIALHO RIBEIRO
if (isnan(h))
{
Serial.println("Erro ao ler o Vento!"); // MENSAGEM DE ERRO
}
else
{
```

```
Serial.print("Vento (calculado): ");
Serial.print(velocidade);
Serial.println("m/s");
}

Serial.print(" ");
Serial.print(" - - - - ");
Serial.print(" ");

YEAR = now.year();
MONTH = now.month();
DAY = now.day();
HOUR = now.hour();
MINUTE = now.minute();
SECOND = now.second();

//SALVANDO DADOS NO CARTÃO DE MEMÓRIA
arduino.print(YEAR);
arduino.print("-");
arduino.print(MONTH);
arduino.print("-");
arduino.print(DAY);
arduino.print(",");
arduino.print(HOUR);
arduino.print(":");
arduino.print(MINUTE);
arduino.print(":");
arduino.print(SECOND);
arduino.print(",");
arduino.print(T);
arduino.print(",");
arduino.print(h);
arduino.print(",");
```

```
    arqdht.print(P / 100);
    arqdht.print(",");
    arqdht.println(A);
    arqdht.print(",");
    arqdht.print(voltagem);
    arqdht.print(",");
    arqdht.print(velocidade);
    //arqdht.println(" ");
}

arqdht.close();
delay(delayMS); //configura o tempo de repetição
}
```

APÊNDICE B – Ficha de campo do dia 22/08/2022

FICHA DE CAMPO

FICHA PREENCHIDA POR: David Christian de Lima Ferreira

LOCAL: Campus Praia Vermelha (Universidade Federal Fluminense)

LATITUDE: 22°54'20,0'' S LONGITUDE: 43°08'02,1'' O

DATA: 22/08/2022

HORA DE INÍCIO: 10:25 AM HORA DE TÉRMINO: 10:38 AM

OBJETIVO: Realizar primeiro teste com o perfilador atmosférico de baixo custo desenvolvido para a medição de temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica.

CARACTERÍSTICAS DO LOCAL: A estação de lançamento do perfilador atmosférico no Campus Praia Vermelha, localizada nas proximidades do Instituto de Física dessa universidade, é um local aberto, sem árvores, com vegetação rasteira, de baixa movimentação de pessoas. No dia, o céu estava parcialmente encoberto, com ventos moderados.

COBERTURA DE NUVENS: 7/10

TEMPERATURA: 22 °C UMIDADE: 63 % VENTO: moderado

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE: O perfilador atmosférico foi presa à base do drone por fios de poliamida. Em seguida ela seu sistema foi ligado e procedeu-se com a decolagem. Tão logo que se alcançou uma maior altura, o perfilador atmosférico começou a pendular muito, provavelmente por causa do vento. Por causa disso, decidiu-se pela aterrissagem.

OBSERVAÇÕES GERAIS: Em bancada, logo após o voo, foi constatado que os dados atmosféricos não foram gravados. O módulo de cartão MicroSD foi testado e encontrado em perfeito estado. É possível o problema tenha sido causado por algum mau contato elétrico causado pela oscilação brusca do perfilador atmosférico em voo.

APÊNDICE C – Ficha de campo do dia 05/09/2022

FICHA DE CAMPO

FICHA PREENCHIDA POR: David Christian de Lima Ferreira

LOCAL: Campus Praia Vermelha (Universidade Federal Fluminense)

LATITUDE: 22°54'20,0'' S LONGITUDE: 43°08'02,1'' O

DATA: 05/09/2022

HORA DE INÍCIO: 10:32 AM HORA DE TÉRMINO: 11:00 AM

OBJETIVO: Realizar segundo teste com o perfilador atmosférico de baixo custo desenvolvido para a medição de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, e ar descendente oriundo das hélices dos drones (através de sensor de pressão diferencial).

CARACTERÍSTICAS DO LOCAL: A estação de lançamento do perfilador atmosférico no Campus Praia Vermelha, localizada nas proximidades do Instituto de Física dessa universidade, é um local aberto, sem árvores, com vegetação rasteira, de baixa movimentação de pessoas. No dia, o céu estava encoberto, com ventos fracos.

COBERTURA DE NUVENS: 9/10

TEMPERATURA: 22,6 °C UMIDADE: 67,7 % VENTO: fraco

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE: Como o perfilador atmosférico pendulou muito na campanha anterior, dessa vez ela alçou voo em contato constante com a base do drone, também presa com

fios de poliamida, mas muito curtos. Isso demandou que fosse medido também o ar descendente oriundo das hélices do drone, dada a proximidade entre o perfilador atmosférico e o drone. Por isso, esse é o primeiro teste com o sensor de pressão diferencial. Não foi observado qualquer movimento pendular nesse voo.

OBSERVAÇÕES GERAIS: Em bancada, logo após o voo, foi verificado se houve qualquer problema de gravação, mas o módulo de cartão MicroSD gravou perfeitamente os dados atmosféricos no cartão de memória.

APÊNDICE D – Ficha de campo do dia 18/01/2023

FICHA DE CAMPO

FICHA PREENCHIDA POR: David Christian de Lima Ferreira

LOCAL: Campus Praia Vermelha (Universidade Federal Fluminense) – outra localidade

LATITUDE: 22°54'16,0'' S LONGITUDE: 43°07'49,5'' O

DATA: 18/01/2023

HORA DE INÍCIO: 05:44 PM

HORA DE TÉRMINO: 06:15 Pe

OBJETIVO: Realizar um estudo a respeito do ar gerado pelas hélices dos drones DJI Phantom 3 Standard e DJI Mavic Air 2.

CARACTERÍSTICAS DO LOCAL: A estação de lançamento da radiossonda no Campus Praia Vermelha, localizado nas proximidades da Escola de Engenharia dessa universidade, é um local arborizado, abrigado do vento, de baixa movimentação de pessoas. No dia, o céu estava claro, sem vento.

COBERTURA DE NUVENS: 1/10

TEMPERATURA: 25,2 °C

UMIDADE: 73,4 % VENTO: inexistente

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE: Nesse teste, foram utilizados os drones DJI Phantom 3 Standard e DJI Mavic Air 2 e o anemômetro Akrom KR835 com o objetivo de se medir a velocidade do ar em função da distância de cada um dos drones para o anemômetro.

OBSERVAÇÕES GERAIS: Após a realização do estudo, constatou-se que a velocidade do ar das hélices dos drones sobre o anemômetro é praticamente nula com 3 metros de distância para ambos os drones.

APÊNDICE E – Ficha de campo do dia 14/02/2023

FICHA DE CAMPO

FICHA PREENCHIDA POR: David Christian de Lima Ferreira

LOCAL: Campus Praia Vermelha (Universidade Federal Fluminense)

LATITUDE: 22°54'20,0'' S LONGITUDE: 43°08'02,1'' O

DATA: 14/02/2023

HORA DE INÍCIO: 05:05 PM

HORA DE TÉRMINO: 05:20 PM

OBJETIVO: Realizar terceiro teste com o perfilador atmosférico de baixo custo desenvolvido para a medição de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, e ar descendente oriundo das hélices dos drones (através de sensor de pressão diferencial).

CARACTERÍSTICAS DO LOCAL: A estação de lançamento da radiossonda no Campus Praia Vermelha, localizada nas proximidades do Instituto de Física dessa universidade, é um local aberto, sem árvores, com vegetação rasteira, de baixa movimentação de pessoas. No dia, o céu estava pouco encoberto, sem vento.

COBERTURA DE NUVENS: 4/10

TEMPERATURA: 26,4 °C

UMIDADE: 84,9 % VENTO: inexistente

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE: Esse foi o primeiro teste a utilizar o drone Mavic Air 2. Houve mudança na caixa do perfilador em função do método da sua alimentação. Nesse teste, foi utilizado um protótipo de cabo de tração com 4 fios de poliamida grossos.

OBSERVAÇÕES GERAIS: Após esse teste, percebeu-se que o cabo de tração precisa de ajustes e que o drone Mavic Air 2 apresenta boa estabilidade em voo.

APÊNDICE F – Ficha de campo do dia 06/03/2023

FICHA DE CAMPO

FICHA PREENCHIDA POR: David Christian de Lima Ferreira

LOCAL: Campus Praia Vermelha (Universidade Federal Fluminense)

LATITUDE: 22°54'20,0'' S LONGITUDE: 43°08'02,1'' O

DATA: 06/03/2023

HORA DE INÍCIO: 02:30 PM

HORA DE TÉRMINO: 03:34 PM

OBJETIVO: Realizar quarto teste com o perfilador atmosférico de baixo custo desenvolvido para a medição de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, e ar descendente oriundo das hélices dos drones (através de sensor de pressão diferencial).

CARACTERÍSTICAS DO LOCAL: A estação de lançamento da radiossonda no Campus Praia Vermelha, localizada nas proximidades do Instituto de Física dessa universidade, é um local aberto, sem árvores, com vegetação rasteira, de baixa movimentação de pessoas. No dia, o céu estava quase encoberto, com ventos fracos.

COBERTURA DE NUVENS: 8/10

TEMPERATURA: 27,9 °C

UMIDADE: 64,7 % VENTO: fraco

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE: Nesse teste, foi utilizado um cabo de tração adaptado do seu protótipo, com apenas 1 fio de poliamida grosso. Cada drone também contou com um dispositivo de conexão com esse cabo através de mosquetão. Também foi conduzido teste de estabilidade em voo com ambos os drones.

OBSERVAÇÕES GERAIS: Após o teste do cabo de tração, percebeu-se que ele atende bem aos objetivos da pesquisa em sua configuração atual. Após o teste de estabilidade em voo, o drone DJI Mavic Air 2 obteve resultado superior ao do DJI Phantom 3 Standard.

APÊNDICE G – Ficha de campo do dia 14/03/2023

FICHA DE CAMPO

FICHA PREENCHIDA POR: David Christian de Lima Ferreira

LOCAL: Itaipu

LATITUDE: 22,9350130°S

LONGITUDE: 43,0445020°W

DATA: 14/03/2023

HORA DE INÍCIO: 08:03 AM

HORA DE TÉRMINO: 08:54 AM

OBJETIVO: Realizar experimentação atmosférica com o perfilador atmosférico de baixo custo desenvolvido para a medição de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, e ar descendente oriundo das hélices dos drones (através de sensor de pressão diferencial), alcançando 120 metros de altura.

CARACTERÍSTICAS DO LOCAL: A estação de lançamento do perfilador se caracteriza por ser uma localidade exclusivamente residencial, predominantemente arborizada com alguns pontos de vegetação baixa, e com risco reduzido relacionado à passagem de pessoas ou veículos. No dia, o céu estava parcialmente encoberto, com ventos fracos e rajadas ocasionais.

COBERTURA DE NUVENS: 7/10

TEMPERATURA: 27,4 °C

UMIDADE: 64,7 % VENTO: fraco, com rajadas ocasionais

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE: Nessa experimentação, foram realizados 3 voos consecutivos, os quais se deram das 08:03 às 08:14 AM, das 08:19 às 08:26 AM e das 08:46 às 08:54 AM, um para cada bateria do drone Mavic Air 2. Todos os voos alcançaram 120 metros de altura. Depois disso, ambos os drones foram utilizados num teste de carga com o anemômetro ultrassônico PRSens.

OBSERVAÇÕES GERAIS: A experimentação atmosférica foi um sucesso. Sobre o teste de carga, constatou-se a impossibilidade do emprego do anemômetro com esses drones. O método de registro da longitude e da longitude foi adaptado para facilitar o processamento de dados.

APÊNDICE H – Arquivo de configuração do WRF “namelist.input”

```

&time_control
run_days           = 00,
run_hours          = 96,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2023, 2023, 2023, 2023,
start_month        = 03, 03, 03, 03,
start_day          = 14, 14, 14, 14,
start_hour         = 00, 00, 00, 00,
start_minute       = 00, 00, 00, 00,
start_second       = 00, 00, 00, 00,
end_year           = 2023, 2023, 2023, 2023,
end_month          = 03, 03, 03, 03,
end_day            = 18, 18, 18, 18,
end_hour           = 00, 00, 00, 00,
end_minute         = 00, 00, 00, 00,
end_second         = 00, 00, 00, 00,
interval_seconds   = 21600,
input_from_file    = .true., .true., .true., .true.,
history_interval   = 60, 60, 60, 60,
frames_per_outfile = 1000, 1000, 1000, 1000,
restart            = .false.,
restart_interval    = 500000,
io_form_history     = 2,
io_form_restart     = 2,
io_form_input       = 2,
io_form_boundary    = 2,
debug_level        = 0,
/

```

```

&domains

```

```

time_step          = 54,
time_step_fract_num    = 0,
time_step_fract_den    = 1,
max_dom            = 3,
e_we               = 146,   151,   64,
e_sn               = 160,   115,   70,
e_vert             = 35,    35,    35,
eta_levels         = 1.000, 0.994, 0.988, 0.982, 0.976,
                   0.9701, 0.9636, 0.9564, 0.9483, 0.9389,
                   0.9281, 0.9153, 0.9001, 0.882, 0.8604,
                   0.8348, 0.8047, 0.77, 0.7306, 0.6867,
                   0.639, 0.5883, 0.5355, 0.4818, 0.428,
                   0.375, 0.3236, 0.2742, 0.2272, 0.1829,
                   0.1414, 0.1026, 0.0667, 0.0334, 0.000,
p_top_requested     = 6000,
num_metgrid_levels  = 34,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                 = 9000,   3000, 1000,
dy                 = 9000,   3000, 1000,
grid_id            = 1,     2,     3,
parent_id          = 1,     1,     2,
i_parent_start     = 1,     61,    54,
j_parent_start     = 1,     70,    34,
parent_grid_ratio   = 1,     3,     3,
parent_time_step_ratio = 1,   3,     3,
feedback           = 0,
smooth_option      = 0,

```

/

```

&physics
mp_physics         = 3,     3,     3, 3,
ra_lw_physics      = 1,     1,     1, 1,

```

```

ra_sw_physics      = 1,   1,   1,  1,
radt               = 30,  30,  30, 30,
sf_sfclay_physics = 1,   1,   1,  1,
sf_surface_physics = 2,   2,   2,  2,
bl_pbl_physics     = 1,   1,   1,  1,
bldt              = 0,   0,   0,  0,
cu_physics         = 1,   1,   0,  0,
cudt              = 5,   5,   5,  5,
isfflx            = 1,
ifsnow            = 0,
icloud            = 1,
surface_input_source = 1,
num_soil_layers   = 4,
sf_urban_physics  = 0,   0,   0,  0,
maxiens           = 1,
maxens            = 3,
maxens2           = 3,
maxens3           = 16,
ensdim            = 144,

/

&fdda

/

&dynamics
w_damping         = 0,
diff_opt          = 1,
km_opt            = 4,
diff_6th_opt      = 0,   0,   0,
diff_6th_factor   = 0.12, 0.12, 0.12, 0.12,
base_temp         = 290.,
damp_opt          = 0,

```

```
zdamp          = 5000., 5000., 5000., 5000.,
dampcoef       = 0.2, 0.2, 0.2, 0.2,
khdif          = 0, 0, 0, 0,
kvdif          = 0, 0, 0, 0,
non_hydrostatic = .true., .true., .true., .true.,
moist_adv_opt  = 1, 1, 1, 1,
scalar_adv_opt = 1, 1, 1, 1,
```

```
/
```

```
&bdy_control
```

```
spec_bdy_width = 5,
spec_zone      = 1,
relax_zone     = 4,
specified      = .true., .false., .false., .false.,
nested         = .false., .true., .true., .true.,
```

```
/
```

```
&grib2
```

```
/
```

```
&namelist_quilt
```

```
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups           = 1,
```

```
/
```

```
&logging
```

```
/
```

APÊNDICE I – Arquivo de configuração do WRF “namelist.wps”

&share

```
wrf_core = 'ARW',  
max_dom = 3,  
start_date = '2023-03-14_00:00:00','2023-03-14_00:00:00','2023-03-14_00:00:00','2023-03-14_00:00:00',  
end_date = '2023-03-18_00:00:00','2023-03-18_00:00:00','2023-03-18_00:00:00','2023-03-18_00:00:00',  
interval_seconds = 21600,  
io_form_geogrid = 2,  
opt_output_from_geogrid_path = '/home/lammoc/wrf_operacional/operacional/modelo',  
debug_level = 0,  
/  

```

&geogrid

```
parent_id = 1,1,2,  
parent_grid_ratio = 1,3,3,  
i_parent_start = 1,61,54,  
j_parent_start = 1,70,34,  
e_we = 146, 151,64,  
e_sn = 160, 115,70,  
geog_data_res = 'default','default','default',  
dx = 9000,  
dy = 9000,  
map_proj = 'mercator',  
ref_lat = -24.878,  
ref_lon = -45.858,  
truelat1 = -24.878,  
truelat2 = 0,  
stand_lon = -45.858,  
geog_data_path = '/home/lammoc/WPS_GEOG',  
opt_geogrid_tbl_path = '/home/lammoc/wrf_operacional/operacional/modelo',
```

```
ref_x = 50.0,
```

```
ref_y = 59.0,
```

```
/
```

```
&ungrib
```

```
out_format = 'WPS',
```

```
prefix = 'FILE',
```

```
/
```

```
&metgrid
```

```
fg_name = 'FILE',
```

```
io_form_metgrid = 2,
```

```
opt_output_from_metgrid_path = '/home/lammoc/wrf_operacional/operacional/modelo',
```

```
opt_metgrid_tbl_path = '/home/lammoc/wrf_operacional/operacional/modelo',
```

```
/
```

```
&mod_levs
```

```
press_pa = 201300 , 200100 , 100000 ,
```

```
95000 , 90000 ,
```

```
85000 , 80000 ,
```

```
75000 , 70000 ,
```

```
65000 , 60000 ,
```

```
55000 , 50000 ,
```

```
45000 , 40000 ,
```

```
35000 , 30000 ,
```

```
25000 , 20000 ,
```

```
15000 , 10000 ,
```

```
5000 , 1000
```

```
/
```

APÊNDICE J – *Notebook* da interface de usuário Jupyterlab

```
# INSTALAÇÃO DE PACOTES DE ROTINAS E BIBLIOTECAS
```

```
pip install numpy
```

```
pip install matplotlib
```

```
conda install netCDF4
```

```
pip install wrapt
```

```
pip install setuptools
```

```
pip install xarray
```

```
conda install -c conda-forge wrf-python
```

```
# IMPORTAÇÃO DE ROTINAS DE PROGRAMAÇÃO
```

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
from matplotlib.cm import get_cmap
```

```
from matplotlib.colors import from_levels_and_colors
```

```
from cartopy import crs
```

```
from cartopy.feature import NaturalEarthFeature, COLORS
```

```
from netCDF4 import Dataset
```

```
from wrf import (getvar, to_np, get_cartopy, latlon_coords, vertcross,  
                cartopy_xlim, cartopy_ylim, interpline, CoordPair)
```

```
# IMPORTAÇÃO DE DADOS DO ARQUIVO DE SAÍDA DO WRF (WRFOUT)
```

```
wrfnc = Dataset('C:/Users/David/Desktop/wrfout_d03_2023-03-14_00_00_00')
```

```
# GERAÇÃO DE VARIÁVEIS COM PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS MODELADOS  
PARA O PONTO DE GRADE DE INTERESSE
```

```
# Obtendo dados sem o nível mais inferior (2m)
```

```
pressao_11 = getvar(wrfnc, "pres", units="hPa", timeidx=11)[:.,20,30]
```

```
temp_11 = getvar(wrfnc, "temp", units="degC", timeidx=11)[:.,20,30]
```

```
rh_11 = getvar(wrfnc, "rh", timeidx=11)[:.,20,30]
```

```
z_11 = getvar(wrfnc, "z", units="m", timeidx=11)[:.,20,30]
```

```
pressao_12 = getvar(wrfnc, "pres", units="hPa", timeidx=12)[:20,30]
temp_12 = getvar(wrfnc, "temp", units="degC", timeidx=12)[:20,30]
rh_12 = getvar(wrfnc, "rh", timeidx=12)[:20,30]
z_12 = getvar(wrfnc, "z", units="m", timeidx=12)[:20,30]
```

```
# Obtendo dados do nível mais inferior (2m)
```

```
todos_temp_2m_11 = getvar(wrfnc, "T2", timeidx=11)
temp_2m_11 = todos_temp_2m_11[20,30] - 273.15
todos_rh_2m_11 = getvar(wrfnc, "rh2", timeidx=11)
rh_2m_11 = todos_rh_2m_11[20,30]
```

```
todos_temp_2m_12 = getvar(wrfnc, "T2", timeidx=12)
temp_2m_12 = todos_temp_2m_12[20,30] - 273.15
todos_rh_2m_12 = getvar(wrfnc, "rh2", timeidx=12)
rh_2m_12 = todos_rh_2m_12[20,30]
```

```
# regressão linear de (z_11, pressao_11) com 17 níveis mais inferiores:  $y = -0.1057x + 1013.5$ 
# regressão linear de (z_12, pressao_12) com 17 níveis mais inferiores:  $y = -0.1057x + 1013.5$ 
(mesma regressão)
```

```
pressao_2m_11 = -0.1057*(2) + 1013.5
pressao_2m_12 = -0.1057*(2) + 1013.5
```

```
z_2m_11 = 2
z_2m_12 = 2
```

```
# regressão linear de (z_11, pressao_11) com 4 níveis mais inferiores:  $y = -0.1142x + 1016.2$ 
# regressão linear de (z_12, pressao_12) com 4 níveis mais inferiores:  $y = -0.1136x + 1016.2$ 
```

```
pressao_2m_11_alt = -0.1142*(2) + 1016.2
pressao_2m_12_alt = -0.1136*(2) + 1016.2
```

```
z_2m_11_alt = 2
z_2m_12_alt = 2

# Gerando vetores completos

temp_11_total = np.zeros(35)
temp_11_total[0] = temp_2m_11
for i in range(34):
    temp_11_total[i+1] = temp_11[i]

rh_11_total = np.zeros(35)
rh_11_total[0] = rh_2m_11
for i in range(34):
    rh_11_total[i+1] = rh_11[i]

pressao_11_total = np.zeros(35)
pressao_11_total[0] = pressao_2m_11
for i in range(34):
    pressao_11_total[i+1] = pressao_11[i]

z_11_total = np.zeros(35)
z_11_total[0] = z_2m_11
for i in range(34):
    z_11_total[i+1] = z_11[i]

temp_12_total = np.zeros(35)
temp_12_total[0] = temp_2m_12
for i in range(34):
    temp_12_total[i+1] = temp_12[i]

rh_12_total = np.zeros(35)
rh_12_total[0] = rh_2m_12
for i in range(34):
```

```
rh_12_total[i+1] = rh_12[i]

pressao_12_total = np.zeros(35)
pressao_12_total[0] = pressao_2m_12
for i in range(34):
    pressao_12_total[i+1] = pressao_12[i]

z_12_total = np.zeros(35)
z_12_total[0] = z_2m_12
for i in range(34):
    z_12_total[i+1] = z_12[i]

# vetores adicionais

pressao_11_total_alt = np.zeros(35)
pressao_11_total_alt[0] = pressao_2m_11_alt
for i in range(34):
    pressao_11_total_alt[i+1] = pressao_11[i]

z_11_total_alt = np.zeros(35)
z_11_total_alt[0] = z_2m_11_alt
for i in range(34):
    z_11_total_alt[i+1] = z_11[i]

pressao_12_total_alt = np.zeros(35)
pressao_12_total_alt[0] = pressao_2m_12_alt
for i in range(34):
    pressao_12_total_alt[i+1] = pressao_12[i]

z_12_total_alt = np.zeros(35)
z_12_total_alt[0] = z_2m_12_alt
for i in range(34):
    z_12_total_alt[i+1] = z_12[i]
```

```
# IMPORTAÇÃO DA ROTINA DE LEITURA DE ARQUIVOS .XLS (MICROSOFT EXCEL)
```

```
import xlrd
```

```
# IMPORTAÇÃO DOS DADOS OBSERVADOS EM EXPERIMENTAÇÃO ATMOSFÉRICA (EM ARQUIVO .XLS)
```

```
arq_dados = xlrd.open_workbook('C:\\Users\\David\\Desktop\\dados_obs.xls')
```

```
planilhat13 = arq_dados.sheet_by_name ('planilha t13')
```

```
qnt_linhas_t13 = planilhat13.nrows
```

```
t13 = np.zeros(qnt_linhas_t13)
```

```
pt13 = np.zeros(qnt_linhas_t13)
```

```
for i in range(qnt_linhas_t13):
```

```
    t13[i] = planilhat13.cell(i,0).value
```

```
    pt13[i] = planilhat13.cell(i,1).value
```

```
planilhat23 = arq_dados.sheet_by_name ('planilha t23')
```

```
qnt_linhas_t23 = planilhat23.nrows
```

```
t23 = np.zeros(qnt_linhas_t23)
```

```
pt23 = np.zeros(qnt_linhas_t23)
```

```
for i in range(qnt_linhas_t23):
```

```
    t23[i] = planilhat23.cell(i,0).value
```

```
    pt23[i] = planilhat23.cell(i,1).value
```

```
planilhat33 = arq_dados.sheet_by_name ('planilha t33')
```

```
qnt_linhas_t33 = planilhat33.nrows
```

```
t33 = np.zeros(qnt_linhas_t33)
```

```
pt33 = np.zeros(qnt_linhas_t33)
```

```
for i in range(qnt_linhas_t33):
```

```
    t33[i] = planilhat33.cell(i,0).value
```

```
    pt33[i] = planilhat33.cell(i,1).value
```

```
planilhau13 = arq_dados.sheet_by_name ('planilha u13')
qnt_linhas_u13 = planilhau13.nrows
u13 = np.zeros(qnt_linhas_u13)
pu13 = np.zeros(qnt_linhas_u13)
for i in range(qnt_linhas_u13):
    u13[i] = planilhau13.cell(i,0).value
    pu13[i] = planilhau13.cell(i,1).value
```

```
planilhau23 = arq_dados.sheet_by_name ('planilha u23')
qnt_linhas_u23 = planilhau23.nrows
u23 = np.zeros(qnt_linhas_u23)
pu23 = np.zeros(qnt_linhas_u23)
for i in range(qnt_linhas_u23):
    u23[i] = planilhau23.cell(i,0).value
    pu23[i] = planilhau23.cell(i,1).value
```

```
planilhau33 = arq_dados.sheet_by_name ('planilha u33')
qnt_linhas_u33 = planilhau33.nrows
u33 = np.zeros(qnt_linhas_u33)
pu33 = np.zeros(qnt_linhas_u33)
for i in range(qnt_linhas_u33):
    u33[i] = planilhau33.cell(i,0).value
    pu33[i] = planilhau33.cell(i,1).value
```

```
planilhaa13 = arq_dados.sheet_by_name ('planilha a13')
qnt_linhas_a13 = planilhaa13.nrows
a13 = np.zeros(qnt_linhas_a13)
pa13 = np.zeros(qnt_linhas_a13)
for i in range(qnt_linhas_a13):
    a13[i] = planilhaa13.cell(i,1).value
    pa13[i] = planilhaa13.cell(i,0).value
```

```
planilhaa23 = arq_dados.sheet_by_name ('planilha a23')
```

```

qnt_linhas_a23 = planilhaa23.nrows
a23 = np.zeros(qnt_linhas_a23)
pa23 = np.zeros(qnt_linhas_a23)
for i in range(qnt_linhas_a23):
    a23[i] = planilhaa23.cell(i,1).value
    pa23[i] = planilhaa23.cell(i,0).value

planilhaa33 = arq_dados.sheet_by_name ('planilha a33')
qnt_linhas_a33 = planilhaa33.nrows
a33 = np.zeros(qnt_linhas_a33)
pa33 = np.zeros(qnt_linhas_a33)
for i in range(qnt_linhas_a33):
    a33[i] = planilhaa33.cell(i,1).value
    pa33[i] = planilhaa33.cell(i,0).value

# EXEMPLO DE PLOTAGEM TANTO COM DADOS OBSERVADOS EM
# EXPERIMENTAÇÃO ATMOSFÉRICA QUANTO GERADOS EM MODELAGEM
# NUMÉRICA PELO WRF
plt.plot(t13, pt13)
plt.plot(t23, pt23)
plt.plot(t33, pt33)
plt.plot(temp_11_total, pressao_11_total)
plt.plot(temp_12_total, pressao_12_total)
plt.xlabel("Temperatura (°C)\n\nTempo de amostragem de dados: 10 segundos")
plt.ylabel("Pressão atmosférica (hPa)")
plt.title("Comparativo entre perfis verticais de temperatura gerados por dados observados\n e
por modelagem numérica pelo WRF para Itaipu em 14/03/2023\n", fontsize=10)
plt.axis([20, 32, 1015, 995])
plt.grid(True)
plt.legend(['dados observados (08:03 - 08:14 AM)', 'dados observados (08:19 - 08:26 AM)',
'dados observados (08:46 - 08:54 AM)', 'dados WRF (08:00 AM)', 'dados WRF (09:00 AM)'],
loc=1, fontsize = 8)
plt.show()

```

EXEMPLO DE PLOTAGEM UNICAMENTE COM DADOS GERADOS EM
MODELAGEM NUMÉRICA PELO WRF

```
plt.plot(temp_11_total, pressao_11_total)
```

```
plt.xlabel("Temperatura (°C)")
```

```
plt.ylabel('Pressão atmosférica (hPa)')
```

```
plt.title("Perfil vertical de temperatura gerado por modelagem numérica\n pelo WRF para Itaipu  
às 08:00 AM de 14/03/2023", fontsize=10)
```

```
plt.axis([-80, 30, max(pressao_12 + 50), min(pressao_12 - 50)])
```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.show()
```

APÊNDICE K – Certidão de cadastro do drone DJI Mavic Air 2 junto à Agência Nacional de Aviação Civil

Figura 90: Certidão de cadastro do drone DJI Mavic Air 2 junto à Agência Nacional de Aviação Civil.

	<p>REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL</p> <p>AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL NATIONAL CIVIL AVIATION AGENCY</p>	
<p>CERTIDÃO DE CADASTRO DE AERONAVE NÃO TRIPULADA – USO NÃO RECREATIVO <i>UNMANNED AIRCRAFT INSCRIPTION CERTIFICATE - NON-RECREATIONAL</i></p>		
<p>Esta certidão de cadastro, emitida de acordo com o RBAC-E nº 94, é válida até 10/03/2025 salvo em caso de cancelamento, suspensão ou revogação pela Autoridade de Aviação Civil Brasileira.</p> <p><i>This Inscription Certificate, issued in accordance with RBAC-E nr. 94, shall remain valid until 03/10/2025 unless it is cancelled, suspended or revoked by the Brazilian Civil Aviation Authority.</i></p> <p>Operador (Operator): DAVID CHRISTIAN DE LIMA FERREIRA</p> <p>Documento (document): CPF: XXXXXXXXXX</p>	<p>Nº do cadastro (Register Number): PP-261102603</p> <p>Uso (Purpose): não recreativo (non-recreational) Ramo de atividade principal (Business): Transporte de carga ou mercadoria Fabricante (Maker): DJI Modelo (Model): Mavic Air 2 (MA2UE3W) Nº de série (Serial Number): 3N3BH6M00204U4 Peso máximo de decolagem (MTOW): 0,57 Informações adicionais (additional information): Também utilizado em atividades de cunho acadêmico e científico em geral</p>	
<p>O descumprimento da regulamentação aplicável pode ensejar consequências administrativas, civis e/ou criminais para o infrator.</p> <p><i>Not complying with the applicable regulations may result in administrative and/or legal penalties for the transgressor.</i></p>		
<p>O detentor desta certidão de cadastro (o operador), ou aquele com quem for compartilhada sua aeronave, é considerado apto pela ANAC a realizar voos <u>não recreativos</u> no Brasil, com a aeronave não tripulada acima identificada, em conformidade com os regulamentos aplicáveis da ANAC. É responsabilidade do operador tomar as providências necessárias para a operação segura da aeronave, assim como conhecer e cumprir os regulamentos do DECEA, da Anatel, e de outras autoridades competentes.</p> <p><i>The holder of this inscription certificate (the operator), or the person with whom this aircraft is shared, is considered apt by Brazilian Civil Aviation Authority to perform <u>non-recreational</u> flights in Brazil, using the above identified unmanned aircraft, in conformity with the applicable regulations of Brazilian Civil Aviation Authority. It's the operator's responsibility to take the necessary actions to ensure a safe operation, as well as know and comply with the regulations of air traffic control (ATC), telecommunications, and other competent authorities.</i></p>		
<p>A validade desta certidão pode ser verificada pelo link https://santosdumont.anac.gov.br/menu/f?p=133:14</p>		
<p>Local e data da emissão (Place and date of issue): Brasília, 09 de junho de 2022 <i>Brasília, June 09, 2022</i></p>		
<p>Esta certidão de cadastro não é válida para aeronaves não tripuladas acima de 25 kg de peso máximo de decolagem, ou em voos além da linha de visada visual (BVLOS) ou acima de 400 pés ou 120 metros acima do nível do solo (AGL).</p> <p><i>This inscription certificate is not valid for unmanned aircraft of more than 25 kg maximum takeoff weight, or flying beyond visual line of sight (BVLOS) or over 400 feet or 120 meters above ground level (AGL).</i></p>		

APÊNDICE L – Certidão de cadastro do drone DJI Phantom 3 Standard junto à Agência Nacional de Aviação Civil

Figura 91: Certidão de cadastro do drone DJI Phantom 3 Standard junto à Agência Nacional de Aviação Civil.

	<p>REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL</p> <p>AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL NATIONAL CIVIL AVIATION AGENCY</p>	
<p>CERTIDÃO DE CADASTRO DE AERONAVE NÃO TRIPULADA – USO NÃO RECREATIVO <i>UNMANNED AIRCRAFT INSCRIPTION CERTIFICATE - NON-RECREATIONAL</i></p>		
<p>Esta certidão de cadastro, emitida de acordo com o RBAC-E nº 94, é válida até 10/03/2025 salvo em caso de cancelamento, suspensão ou revogação pela Autoridade de Aviação Civil Brasileira.</p> <p><i>This Inscription Certificate, issued in accordance with RBAC-E nr. 94, shall remain valid until 03/10/2025 unless it is cancelled, suspended or revoked by the Brazilian Civil Aviation Authority.</i></p> <p>Operador (Operator): DAVID CHRISTIAN DE LIMA FERREIRA</p> <p>Documento (document): CPF: XXXXXXXXXX</p>	<p>Nº do cadastro (Register Number): PP-260302611</p> <p>Uso (Purpose): não recreativo (non-recreational) Ramo de atividade principal (Business): Transporte de carga ou mercadoria Fabricante (Maker): DJI Modelo (Model): Phantom 3 Standard (W321) Nº de série (Serial Number): P5BDEBQ00S0654 Peso máximo de decolagem (MTOW): 1,22 Informações adicionais (additional information): Também utilizado em atividades de cunho acadêmico e científico em geral</p>	
<p>O descumprimento da regulamentação aplicável pode ensejar consequências administrativas, civis e/ou criminais para o infrator.</p> <p><i>Not complying with the applicable regulations may result in administrative and/or legal penalties for the transgressor.</i></p>		
<p>O detentor desta certidão de cadastro (o operador), ou aquele com quem for compartilhada sua aeronave, é considerado apto pela ANAC a realizar voos não recreativos no Brasil, com a aeronave não tripulada acima identificada, em conformidade com os regulamentos aplicáveis da ANAC. É responsabilidade do operador tomar as providências necessárias para a operação segura da aeronave, assim como conhecer e cumprir os regulamentos do DECEA, da Anatel, e de outras autoridades competentes.</p> <p><i>The holder of this inscription certificate (the operator), or the person with whom this aircraft is shared, is considered apt by Brazilian Civil Aviation Authority to perform non-recreational flights in Brazil, using the above identified unmanned aircraft, in conformity with the applicable regulations of Brazilian Civil Aviation Authority. It's the operator's responsibility to take the necessary actions to ensure a safe operation, as well as know and comply with the regulations of air traffic control (ATC), telecommunications, and other competent authorities.</i></p>		
<p>A validade desta certidão pode ser verificada pelo link https://santosdumont.anac.gov.br/menu/f?p=133:14</p>		
<p>Local e data da emissão (Place and date of issue): Brasília, 09 de junho de 2022 <i>Brasília, June 09, 2022</i></p>		
<p>Esta certidão de cadastro não é válida para aeronaves não tripuladas acima de 25 kg de peso máximo de decolagem, ou em voos além da linha de visada visual (BVLOS) ou acima de 400 pés ou 120 metros acima do nível do solo (AGL).</p> <p><i>This inscription certificate is not valid for unmanned aircraft of more than 25 kg maximum takeoff weight, or flying beyond visual line of sight (BVLOS) or over 400 feet or 120 meters above ground level (AGL).</i></p>		

APÊNDICE N – Avaliação de risco operacional

1. Introdução:

Este documento de avaliação de risco operacional tem o objetivo de cumprir o estabelecido nos parágrafos E94.103(f)(2) e E94.103(g)(2) do **RBAC-E nº 94**, tendo sido elaborado conforme critérios estabelecidos na Instrução Suplementar E-94-003, denominada “**Procedimentos para elaboração e utilização de avaliação de risco operacional para operadores de aeronaves não tripuladas**” da ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil.

2. Legislação Aplicável:

- Código Brasileiro de Aeronáutica (Lei nº 7.565/1986);
- RBAC-E nº 94/2017, da ANAC;
- IS nº E94-003/2017 – Revisão A, da ANAC;
- Resolução nº 25/2008, da ANAC;
- ICA 100-40, em vigor desde 02/07/2020, do DECEA;
- ICA 100-12, em vigor desde 05/12/2018, do DECEA;
- ICA 100-37, em vigor desde 01/12/2020, do DECEA;
- MCA 100-16, reeditada em 01/12/2020, do DECEA;
- Resolução nº 715, de 23/10/2019, da ANATEL.

3. Cenário Operacional:

Os objetivos dos voos com as aeronaves selecionadas é obter perfis atmosféricos verticais para proveito de pesquisa científica ligada à Universidade Federal Fluminense (UFF).

4. Localização da Operação:

Endereço: Lat 22,934682°S / Long 43,044473°W (raio de 50 metros e altura de 121 metros)

5. Responsável pela Operação, Operador em Comando e Observador:

- **Responsável:** David Christian de Lima Ferreira (Pós-graduando em grau de mestrado em Engenharia de Biosistemas pela Universidade Federal Fluminense).
- **CNPJ / CPF:** omitido nessa versão por motivos de segurança

- **Operador em Comando:** David Christian de Lima Ferreira
- **CPF:** omitido nessa versão por motivos de segurança
- **ID SARPAS:** IAUCUC
- **Contato:** omitido nessa versão por motivos de segurança

- **Observador:** N/A
- **ID SARPAS:** N/A
- **Contato:** N/A

6. Aeronave em Operação (RPA):

- **Fabricante e Modelo:** DJI, Mavic Air 2
- **Número de Série:** 3N3BH6M00204U4
- **Cadastro ANAC:** PP-261102603

- **Certificado Seguro RETA:** dispensado

7. Aeronave em Operação (RPA):

- **Fabricante e Modelo:** DJI, Phantom 3 Standard
- **Número de Série:** P5BDEBQ00S0654
- **Cadastro ANAC:** PP-260302611
- **Certificado Seguro RETA:** dispensado

8. Aspectos Gerais:

- O operador é obrigado a se manter em áreas distantes de terceiros? SIM
- O operador e observador devem passar por algum treinamento inicial ou periódico específico provido pela empresa? SIM
 - Todo operador/observador deve estar familiarizado com a aeronave.
- Em caso de acidentes com lesões em pessoas, acionar:
 - SAMU: 192
 - Corpo de Bombeiros: 193
- Em caso de perda de contato com a aeronave, acionar imediatamente:
 - Polícia: 190

9. Avaliação de Riscos:

Situação 1	Perda do enlace com aeronave (link)
Probabilidade de Ocorrência	3 (remoto). Existem notícias de perda do enlace com o modelo em operação.
Severidade da Ocorrência	C (significativo). Em caso de perda de link, a aeronave deverá retornar ao home point (ponto de decolagem)
Risco	3C
Tolerabilidade	Risco Moderado
Nível Hierárquico de Autorização da Operação	Operador em Comando
Medidas de Mitigação do Risco	(1) Análise do local de operação, evitando posicionar a aeronave em situação de sombra e com obstáculos entre ela e o operador; (2) Garantir que o <i>Home Point</i> foi registrado pela aeronave; (3) Configurar altura adequada de retorno ao <i>Home Point</i> ;

Situação 2	Existência de Tráfego Aéreo no Local
Probabilidade de Ocorrência	1 (muito improvável). As operações ocorrem a baixa altura, longe de rotas de aeronaves e em locais protegidos por edificações.
Severidade da Ocorrência	A (catastrófico). Se ocorrer um encontro com aeronave tripulada pode ocorrer a queda da aeronave e morte de pessoas.
Risco	1A
Tolerabilidade	Risco Moderado
Nível Hierárquico de Autorização da Operação	Responsável pela Operação
Medidas de Mitigação do Risco	(1) Observador deve ficar atento ao tráfego aéreo no local.

Situação 3	Presença de Pessoas Não Anuentes
Probabilidade de Ocorrência	1 (muito improvável). É bastante rara a ocorrência de pessoas não anuentes a menos de 30 metros do local da operação.
Severidade da Ocorrência	B (crítico). Se ocorrer um encontro em caso de falha catastrófica do equipamento, a severidade provável são lesões sérias à pessoa atingida ou morte.
Risco	1B
Tolerabilidade	Risco Baixo
Nível Hierárquico de Autorização da Operação	Operador em Comando
Medidas de Mitigação do Risco	(1) Verificação da eventual presença de pessoas no local: caso estas pessoas estejam a menos de 30 metros do local da operação, a operação não pode ser iniciada antes que essas pessoas sejam removidas; (2) Caso uma pessoa acesse acidentalmente a área dentro do limite dos 30 metros durante a operação, a operação deverá ser suspensa tão rápido quanto seja praticável e seguro.

Situação 4	Incidências de ventos fortes e rajadas de vento
Probabilidade de Ocorrência	4 (ocasional). Na época do ano em que ocorre a operação os ventos mais fortes ocorrem no período vespertino.
Severidade da Ocorrência	A (catastrófico). Condições de ventos fortes ou rajadas podem desestabilizar a aeronave e provocar sua queda.
Risco	4A
Tolerabilidade	Risco Extremo
Nível Hierárquico de Autorização da Operação	Operador em comando
Medidas de Mitigação do Risco	(1) Verificar previamente as condições climáticas e no momento da operação; (2) Caso a situação climática mude significativamente durante a operação, esta deverá ser suspensa tão rápido quanto seja praticável e seguro.

Situação 5	Mudança climática e incidência de chuvas
Probabilidade de Ocorrência	3 (remoto). Na época do ano em que ocorre a operação não são frequentes mudanças climáticas rápidas com ocorrência de chuvas.
Severidade da Ocorrência	B (crítico). Operar a aeronave sob chuva não acarreta na sua instabilidade e queda imediata, mas deve ser evitada.
Risco	3B
Tolerabilidade	Risco Moderado
Nível Hierárquico de Autorização da Operação	Operador em comando
Medidas de Mitigação do Risco	(1) Verificar previamente as condições climáticas e no momento da operação; (2) Caso a situação climática mude significativamente durante a operação, esta deverá ser suspensa tão rápido quanto seja praticável e seguro.

10. Matriz de Risco:

Probabilidade da ocorrência, ou a frequência com que um evento, como consequência de um perigo existente, possa ocorrer. Está dividida em 05 níveis:

- **Nível 5 (frequente):** é provável que ocorra muitas vezes, ou historicamente tem ocorrido frequentemente;
- **Nível 4 (ocasional):** é provável que ocorra algumas vezes, ou historicamente tem ocorrido com pouca frequência;
- **Nível 3 (remoto):** é improvável, mas é possível que venha a ocorrer, ou ocorre raramente;
- **Nível 2 (improvável):** é bastante improvável que ocorra e não se tem notícia de que tenha alguma vez ocorrido; e
- **Nível 1 (muito improvável):** é quase impossível que o evento ocorra.

Severidade da ocorrência, ou grau da consequência de um evento, como consequência de um perigo existente ou de uma situação insegura, tomando como referência a pior condição possível. Está dividida em 05 níveis:

- **Nível A (catastrófico):** morte de múltiplas pessoas;
- **Nível B (crítico):** morte de pessoa, lesões gravíssimas, capazes de deixar sequelas significativas e/ou incapacitantes, tais como cegueira, paralisia, amputações, etc.;
- **Nível C (significativo):** lesões sérias a pessoas, mas não incapacitantes nem com sequelas significativas;
- **Nível D (pequeno):** incidentes menores, danos a objetos, animais ou vegetação no solo, lesões leves;
- **Nível E (insignificante):** somente danos ao equipamento.

Tolerabilidade, ou grau de aceitabilidade em razão do resultado da avaliação de risco, determinada pela tabela seguinte e descritos a seguir:

			Severidade				
			Catastrófico	Critico	Significativo	Pequeno	Insignificante
			A	B	C	D	E
Probabilidade	Frequente	5	5A	5B	5C	5D	5E
	Ocasional	4	4A	4B	4C	4D	4E
	Remoto	3	3A	3B	3C	3D	3E
	Improvável	2	2A	2B	2C	2D	2E
	Muito improvável	1	1A	1B	1C	1D	1E

- **Risco extremo** (classificações 4A, 5A e 5B): a operação não deve ocorrer e, caso esteja ocorrendo, deve cessar imediatamente, enquanto persistir a condição ou até que medidas mitigadoras suficientes reduzam o risco para um nível aceitável pelo operador. Caso ainda se decida prosseguir com a operação, controles preventivos para mitigação do risco devem ser estabelecidos, devem estar em vigor e a aprovação da hierarquia mais alta da empresa (presidente) deve ser requerida.
- **Alto risco** (classificações 3A, 4B e 5C): a operação não deveria ocorrer e, caso esteja ocorrendo, deveria cessar imediatamente, enquanto persistir a condição ou até que medidas mitigadoras suficientes reduzam o risco para um nível aceitável pelo operador. Caso ainda se decida prosseguir com a operação, controles preventivos para mitigação do risco devem ser estabelecidos, devem estar em vigor e a aprovação da hierarquia de gestão da empresa (gerente ou diretor) deve ser requerida.
- **Risco moderado** (classificações 1A, 2A, 2B, 3B, 3C, 4C, 4D, 5D, 5E): a operação pode ocorrer com controles preventivos para mitigação do risco estabelecidos e que devem estar em vigor, conforme necessários. Operações neste nível de risco deveriam ser aprovadas por nível hierárquico imediatamente superior (chefia imediata).
- **Baixo risco** (classificações 1B, 1C, 2C, 2D, 3D, 3E, 4E): a operação pode ocorrer e controles preventivos para mitigação de risco e aprovação por nível hierárquico imediatamente superior (chefia imediata) são opcionais.
- **Risco muito baixo** (classificações 1D, 1E e 2E): a operação é aceitável como concebida, e nenhum controle preventivo para mitigação de risco e aprovação é requerida para que ela ocorra.

11. Disposições Finais:

Declaro para os devidos fins que todos os Operadores em Comando conhecem e cumprem a legislação e regulamentação aplicáveis, em especial as acima listadas, assim como conhecem as consequências do descumprimento.

Esta Avaliação de Risco Operacional é válida até 14 de março de 2024.

Niterói, RJ, em 14 de março de 2023.

Assinatura omitida nessa versão por motivos de segurança

David Christian de Lima Ferreira

CPF: omitido nessa versão por motivos de segurança