



# REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

Versão impressa: ISSN 0102-3543

Volume XXXIX - 1º Trimestre de 2022

## ENGENHARIA MILITAR

**Mobilidade,  
Contramobilidade e  
Proteção**

Aplicação do método Monte Carlo Scanning à alocação de artilharia antiaérea – Pág 04

SARP Aplicado ao monitoramento de áreas com diferentes prioridades com emprego de uma estação de controle em solo para operação dinâmica por interface baseada na tarefa – Pág 9

Utilização de cinzas de caldeiras industriais como substituição parcial do cimento Portland em argamassas – Pág 21

Criação de trajetórias de navios autônomos, em ambiente de simulação virtual, baseada no histórico de dados AIS – Pág 30

Abordagem física para a força resistente na modelagem da balística interna pelo método dos parâmetros concentrados – Pág 50

Mapeamento de hotspot em ambientes outdoors – Pág 57

Comportamento à fratura cíclica de um aço inoxidável ASTM 316s – Pág 63

Análise termofluida temporal - Uma abordagem analítica – Pág 68

Sistema de aeronaves remotamente pilotadas para detecção autônoma de entidades terrestres móveis em áreas restritas – Pág 75





## REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

COMANDANTE DO EXÉRCITO:

Gen Ex Paulo Sérgio Nogueira de Oliveira

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA:

Gen Ex Guido Amin Naves

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO E CULTURA DO EXÉRCITO:

Gen Ex André Luis Novaes Miranda

DIRETOR DA BIBLIOTECA DO EXÉRCITO:

Cel Art Eduardo Biserra Rocha

COMANDANTE DO INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA:

Gen Bda Juraci Ferreira Galdino

DIREÇÃO, IMPRESSÃO E DISTRIBUIÇÃO:

• Diretor: Cel Art Eduardo Biserra Rocha – BIBLIEx • Editor executivo: Cel R1 Leocir Dal Pai – BIBLIEx

CORPO REDATORIAL:

• Editor geral: Marcelo de Miranda Reis – IME (SE/2) • Editor adjunto: Paulo Henrique Coelho Maranhão – IME (SE/4) • Engenharia Civil, Transportes e Ciências Ambientais: Filipe Almeida Corrêa do Nascimento – IME (SE/2) • Engenharia Nuclear: Sérgio de Oliveira Vellozo – IME (SE/7) • Engenharia Elétrica: Antônio Eduardo Carrilho da Cunha – IME (SE/3) • Engenharia Mecânica: André Luiz Tenório Rezende – IME (SE/4) • Ciência dos Materiais: André Ben-Hur da Silva Figueiredo – IME (SE/8) • Ciência da Computação: Paulo Cesar Salgado Vidal – IME (SE/9) • Engenharia de Defesa: Giuseppe Miceli Junior – IME (SE/10) • Engenharia Química e Química: Kátia Regina de Souza – IME (SE/5) • Engenharia Cartográfica: Matheus Pinheiro Ferreira – IME (SE/6) • Outras áreas: Aderson Campos Passos – IME (SE/9).

EDITORES ASSOCIADOS EXTERNOS:

• Dr. André Fenili – Universidade Federal do ABC, Santo André, SP • Dr. Artur Ziviani – Lab. Nacional de Computação Científica (LNCC), Petrópolis, RJ • Dr. Fernando Fachini Filho – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, SP • Dr. José Carlos Costa da Silva Pinto – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. José Carlos Maldonado – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP • Dr.ª Júlia Célia Mercedes Strauch – Escola Nacional de Ciências Estatísticas, RJ • Dr. Luiz Pereira Calôba – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Richard Magdalena Stephan – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Webe João Mansur – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Carlos Alberto Nunes Consenza – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ

ADMINISTRAÇÃO, REVISÃO, PROGRAMAÇÃO E DIAGRAMAÇÃO:

• Coordenador: Rubenildo Pithon de Barros • Administração e OJS: Vanessa Ferreira Belchior, Lucas Sebastião de Paula, José Welton Moreira • Revisores: Giana Elvira de Oliveira Marquês; Juniellen de Oliveira Seipel; Diego Ribeiro Ferreira Serpa • Diagramador: Luiz Tadeu Carqueija Mota

PROJETO GRÁFICO, IMPRESSÃO E DISTRIBUIÇÃO:

BIBLIEx



Desde 1949

"A Gráfica do Exército" - Compromisso com a Qualidade

Impresso na Gráfica do Exército

Al. Mal. Rondon - Setor de Garagens - QGEx - SMU - CEP: 70630-901 - Brasília - DF

Tel: 3415-4367 - Site: <http://www.graficadoexercito.eb.mil.br>

E-mail: [divmcl@graficadoexercito.eb.mil.br](mailto:divmcl@graficadoexercito.eb.mil.br)



## REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA - Volume XXXVII

3º Trimestre de 2021

BIBLIOTECA DO EXÉRCITO

EDITORA (BIBLIEx)

Palácio Duque de Caxias - Praça D. de Caxias, 25

3º andar - Ala Marcílio Dias

Centro - Rio de Janeiro-RJ

CEP 20.221-260

Tel.: (21) 2519-5707

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA - IME

Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha -

Rio de Janeiro-RJ - CEP 22.290-270 -

Tel.: (21) 2546-7115

Website: <http://rmct.ime.eb.br> - Email: [rmct@ime.eb.br](mailto:rmct@ime.eb.br)

ACESSE NOSSAS REVISTAS DIGITAIS



Nossa capa:

Homenagem ao Corpo de Engenheiros







**P**rezados leitores, o Departamento de Ciência e Tecnologia (DCT), Órgão de Direção Setorial (ODS) do Exército Brasileiro responsável por promover o desenvolvimento científico e tecnológico e elevar a prontidão tecnológica da Força Terrestre, tem a grata alegria de apresentar a primeira edição do ano de 2022 da Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT).

Sob a responsabilidade editorial do Instituto Militar de Engenharia (IME), uma das Organizações Militares subordinadas ao DCT, a RMCT, com esta edição, incorporou vários aperfeiçoamentos visando consolidá-la como um importante veículo de difusão do conhecimento científico e tecnológico em áreas de interesse do Exército. Cabe destacar que a RMCT é veiculada desde 1984, é distribuída gratuitamente e se constituiu em uma das quatro revistas oficiais do Exército Brasileiro.

Nesse diapasão, mister destacar que doravante a submissão, a revisão e a publicação de artigos contarão com um processo de gestão do fluxo editorial baseado na plataforma multiuniversitária de acesso aberto Open Journal System. Adicionalmente, os artigos passam a ser analisados por um sistema de verificação de plágio, codificados pelo sistema de identificação numérico para conteúdo digital Digital Object Identifier (DOI) e publicados em português e em inglês. Essas mudanças, indubitavelmente, têm a virtude de alçar a RMCT a patamar mais elevado, sobretudo no tocante à capacidade de difusão dos artigos e de atração de pesquisadores renomados, dessa forma almeja-se elevar cada vez mais seus indicadores de desempenho.

Certamente a produção bilingue amplia o rol de autores e de leitores, a indexação da revista em bases de dados conhecidas e restritas facilita a difusão, favorece a citação dos artigos e, por conseguinte, contribui com a melhoria do seu fator de impacto. Com a verificação de plágio por organismo independente, conjugam-se a difusão do conhecimento científico, a observância de valores e preceitos éticos e morais que notabilizam o Exército Brasileiro e a utilização de boas práticas adotadas pela comunidade científica nacional e internacional. Por último, a inclusão do DOI permite que as publicações sejam encontradas por meio da base de dados CrossRef Metadada Search, uma associação internacional de editores e instituições que publicam na Internet e que necessitam registrar seu conteúdo e metadados de forma única e persistente.

Nesta edição, oferecemos aos leitores dez artigos abrangendo vasto rol de temáticas das áreas de atuação do IME. A pesquisa na área de Engenharia Civil apresentou um estudo da utilização de cinzas de caldeiras industriais como substituição parcial do cimento Portland em argamassas. No campo da Robótica foram estudados sistemas de aeronaves remotamente pilotadas visando o monitoramento de áreas com diferentes prioridades e, também, a detecção autônoma de entidades terrestres móveis em áreas restritas. A área de Engenharia Mecânica brindou-nos com uma aplicação do método Monte Carlo Scanning à alocação de artilharia antiaérea; um estudo das forças de sustentação e arrasto em função da distribuição de pressão em corpos aerodinâmicos; uma análise do comportamento à fratura cíclica de um aço inoxidável ASTM 316; e com uma abordagem física para a força resistente na modelagem da balística interna pelo método dos parâmetros concentrados. A Engenharia de Computação, lastreada por ferramentas advindas da Inteligência Artificial, nos oferece os resultados de uma pesquisa sobre a criação de trajetórias de navios autônomos, em ambiente de simulação virtual e de outra abordando o mapeamento de hotspot em ambientes outdoors. A Engenharia Nuclear analisou dois transientes postulados do European Sodium Fast Reactor (ESFR)

por meio do artigo intitulado “análise termofluida temporal - uma abordagem analítica”.

Na atual conjuntura, ditada pela Era do Conhecimento e pela Quarta Revolução Industrial, destacam-se as proeminências da ciência, da tecnologia e da inovação na configuração do tabuleiro geopolítico internacional e os seus impactos em todas as Expressões do Poder Nacional, particularmente na Militar. Assim sendo, para se lograr êxito em sua hercúlea missão de promover a Defesa deste País continente, o Exército Brasileiro, por meio do DCT, busca dominar conhecimentos e tecnologias sensíveis e críticas às capacidades militares terrestres. Nesse intento, torna-se peremptório dispormos de um Sistema Setorial de Inovação do Exército e de um Sistema Nacional de Inovação dinâmicos, eficazes, eficientes, efetivos, integrados e sinérgicos. Nesse contexto, a divulgação de pesquisas científicas da RMCT, ao incentivar a mobilização da academia a labutar em temas de interesse nacional, possui o condão de promover maior colaboração entre as instituições de ensino e pesquisa civis e militares, aspecto indispensável não apenas para aperfeiçoar os supracitados sistemas de inovação, mas também para fortalecer a sinergia entre esses sistemas.

Boa leitura!

*Gen Ex Guido Amin Naves*

---

# SUMÁRIO

---

- 04** • Aplicação do método Monte Carlo Scanning à alocação de artilharia antiaérea  
Wilson J. Vieira, Alexandre D. Caldeira
- 09** • SARP aplicado ao monitoramento de áreas com diferentes prioridades com emprego de uma estação de controle em solo para operação dinâmica por interface baseada na tarefa  
Luis Claudio Batista da Silva, Ricardo Maroquio Bernardo, Erick Menezes Moreira, Paulo F. F. Rosa
- 21** • Utilização de cinzas de caldeiras industriais como substituição parcial do cimento Portland em argamassas  
Fernanda L. S. Brandão, Vinícius A. Coelho, Cleidson C. Guimarães
- 30** • Criação de trajetórias de navios autônomos, em ambiente de simulação virtual, baseada no histórico de dados AIS  
Antônio L. C. Doneda, Ricardo S. Bastos, Julio Cesar Duarte
- 39** • Um estudo das forças de sustentação e arrasto em função da distribuição de pressão em corpos aerodinâmicos  
Daniel M Carvalho, Victor Santoro Santiago
- 50** • Abordagem física para a força resistente na modelagem da balística interna pelo método dos parâmetros concentrados  
Mateus P Rodrigues, Rubenildo P. de Barros, Achille A Bassi
- 57** • Mapeamento de hotspot em ambientes outdoors  
Andressa da Silva Siqueira Almeida, Anderson F. Pereira dos Santos, Paulo Fernando Ferreira Rosa
- 63** • Comportamento à fratura cíclica de um aço inoxidável ASTM 316s  
Pedro G S Passalini, Ricardo P Weber, Paulo F S Filho
- 68** • Análise termofluida temporal - Uma abordagem analítica  
W E Sousa, S O Vellozo, R G Cabral
- 75** • Sistema de aeronaves remotamente pilotadas para detecção autônoma de entidades terrestres móveis em áreas restritas  
Ricardo Maroquio Bernardo\*, Luis Claudio Batista da Silva, Paulo Fernando Ferreira Rosa

# Aplicação do método Monte Carlo Scanning à alocação de artilharia antiaérea

Wilson J. Vieira<sup>a</sup>, Alexandre D. Caldeira<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Av. Nove de Julho 709, Ap. 601, Jardim Apolo, São José dos Campos, Brasil, 12243-000, [vieirawj@uol.com.br](mailto:vieirawj@uol.com.br)

<sup>b</sup>Divisão de Energia Nuclear, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, Brasil, [caldeiraadc@fab.mil.br](mailto:caldeiraadc@fab.mil.br)

**RESUMO:** O Método Monte Carlo Scanning foi desenvolvido na Subdivisão de Sistemas de Apoio à Decisão, do Instituto de Estudos Avançados, visando explorar a velocidade dos computadores atuais. A estratégia usada para abordar problemas de otimização tem como princípio a amostragem aleatória e exaustiva do domínio e a avaliação da função objetivo. O Método Monte Carlo Scanning é aplicado a um problema de alocação de artilharia antiaérea. Os resultados obtidos para o problema analisado são idênticos aos resultados da literatura, que utilizaram Programação Dinâmica. A simplicidade, a facilidade de implementação e a capacidade de encontrar rapidamente soluções maximizadas indicam que o Método Monte Carlo Scanning pode ser considerado como uma poderosa ferramenta de simulação computacional para sistemas de apoio à decisão militar.

**ABSTRACT:** The Monte Carlo Scanning Method was developed in the Decision Support Systems Subdivision of the Institute for Advanced Studies to explore the speed of modern computers. The strategy used to address optimization problems has as its principle the thorough random sampling of the domain and the evaluation of the objective function. The Monte Carlo Scanning Method is applied to an antiaircraft artillery allocation problem. The results obtained for the analyzed problem are identical to the results of the literature, which used Dynamic Programming. Simplicity, ease of implementation, and the ability to quickly find maximized solutions indicate that the Monte Carlo Scanning Method can be considered as a powerful computational simulation tool for military decision support systems.

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulação Monte Carlo. Alocação de artilharia antiaérea. Análise operacional.

**KEYWORDS:** Monte Carlo simulation. Allocation of antiaircraft artillery. Operational analysis.

## 1. Introdução

O desenvolvimento tecnológico na área militar tornou-se complexo de forma a requerer sistemas de apoio à decisão para a análise operacional. Esses sistemas devem auxiliar a resolver questões de projeto, de efetividade, de custo e de alocação de armas de defesa ou de ataque. Essas questões envolvem, em geral, a maximização ou minimização de certas quantidades como, por exemplo, recursos financeiros, materiais e humanos, quantidade de armas, apoio logístico etc.

O processo de otimização consiste em encontrar uma função de várias variáveis, que represente o problema, sujeita a restrições, para ser maximizada ou minimizada. Para atingir esse objetivo são utilizados métodos determinísticos, como programação linear, programação dinâmica, programação não linear, etc. Outra classe de métodos é chamada de métodos

heurísticos ou estocásticos, como Simulação Monte Carlo, *Simulated Annealing* (SA), algoritmos genéticos, redes neurais estocásticas, etc. Problemas reais, em geral, apresentam uma complexidade que preconiza a utilização de métodos estocásticos ou heurísticos [1].

Nicholas Metropolis, Stanisław Ulam, Enrico Fermi, John von Neumann e Edward Teller [2] são considerados os criadores dos Métodos Monte Carlo. Pesquisadores da *Rand Corporation*, com financiamento da Força Aérea dos EUA, tornaram possíveis inúmeros desenvolvimentos nos Métodos Monte Carlo, que começaram a ser aplicados em diversas áreas de C&T, incluindo a pesquisa operacional [3,4].

A Subdivisão de Sistemas de Apoio à Decisão, do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), tem incentivado a utilização de métodos heurísticos para a solução de problemas de otimização. Dentro desse propósito, diversos trabalhos foram realizados [5-7] utilizando o Método SA.

Considerando-se a baixa velocidade de processamento dos computadores no passado, as aplicações de Métodos Monte Carlo eram muito limitadas. Entretanto, com a evolução da velocidade dos processadores, como mostrado na **tabela 1** [8], a utilização desses métodos passou a ser praticamente obrigatória para algumas classes de problemas. Como pode ser notado, o computador mais rápido do Brasil, que se encontra no Laboratório Nacional de Computação Científica, é 7000 vezes mais rápido do que o PC utilizado nesse trabalho.

**Tab. 1** – Benchmarks Linpack selecionados

Nome	Descrição	TOP500	GFLOPS
SunwayTaihuLight	Jiangsu, China	1	93.014.600
Tianhe-2	Universidade Nacional de Defesa Tecnologia, China	2	33.862.700
Titan	DOE/SC/ORNL	3	17.590.000
10692 x Intel Xeon E5-2695v2	LNCC, Brasil	265	456.800
2 x Intel Xeon E5 2687W v4	2016	-	1,078
Intel Core I5 3330 CPU 3,00 GHz	PC utilizado nesse trabalho	-	64
Intel Core I7, 3,20 GHz, 4 núcleos	PC padrão em 2009 (64-bit)	-	33
Intel Pentium II, 450 MHz	PC padrão em 1999	-	0,4
Intel 386 DX, 33 MHz	PC padrão em 1989	-	0,008

Com o objetivo de mostrar que a velocidade dos computadores atuais permite encontrar soluções ótimas apenas varrendo o domínio e inspecionando a imagem da função objetivo, foi desenvolvido o Método *Monte Carlo Scanning* (MCS). O Método MCS utiliza o princípio básico de Monte Carlo, onde quantidades aleatórias distribuídas uniformemente entre  $[0,1]$  são utilizadas para a simulação de eventos que obedecem a praticamente qualquer lei de distribuição. Suas principais vantagens sobre outros métodos são a simplicidade, a robustez e a rapidez de implementação computacional.

Além do aumento exponencial da velocidade dos computadores com o tempo, o desenvolvimento do Método MCS foi motivado também pela dificuldade de sintonia dos parâmetros de convergência do

Método SA, considerada um grande obstáculo para aplicações em programas computacionais de uso de rotina. Nessa linha de pesquisa, foram realizados trabalhos de otimização de funções contínuas [9] e de uma função discreta, característica do problema de alocação de armas de defesa aérea [10-12] com o objetivo de comparar os resultados obtidos com os de outros métodos e verificar a metodologia.

Dentre os diversos problemas de alocação de armas que podem necessitar de sistemas de apoio à decisão militar, um deles é o de alocação de Artilharia Antiaérea (AAA) para a defesa de diversos tipos de instalações [1]. Esse problema foi resolvido [1] utilizando o Método de Programação Dinâmica (PD) [13]. Nesse trabalho, esse mesmo problema foi analisado utilizando o Método MCS.

Na Seção 2, é descrito o problema de alocação de AAA e, na Seção 3, são comentadas, sucintamente, as metodologias [1,9] utilizadas na abordagem do problema. Na Seção 4, são reproduzidos os resultados alcançados e, na Seção 5, são apresentados comentários finais e recomendações para trabalhos futuros.

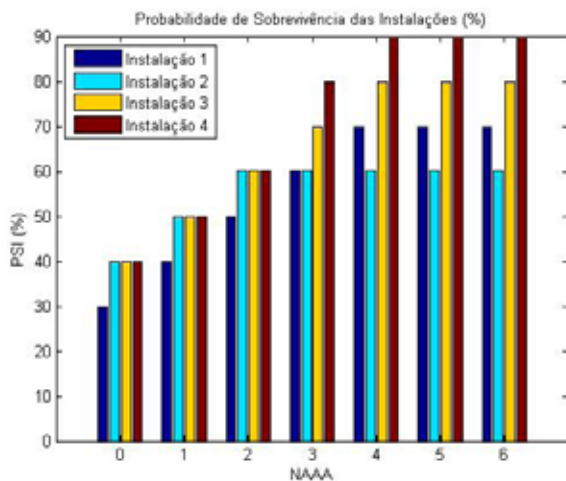
## 2. Alocação de artilharia antiaérea

O problema de alocação de AAA [1] considera que um planejador deva distribuir  $NAAA$  baterias antiaéreas para a proteção de  $NSites$  instalações. A sobrevivência de cada instalação é fornecida para cada nível de proteção, ou seja, quando desprotegida, protegida por uma bateria, por duas baterias e, assim, sucessivamente.

No caso analisado,  $NAAA$  é igual a seis,  $NSites$  é igual a quatro e as Probabilidades de Sobrevivência das Instalações (PSI) são fornecidas de acordo com a **tabela 2**. Os dados apresentados na **tabela 2** são expostos graficamente na **figura 1**. Como pode ser observado, as probabilidades de sobrevivência da Instalação 4 são maiores do que as da Instalação 3 que, por sua vez, são maiores do que as das Instalações 1 e 2. Inicialmente, para números pequenos de baterias antiaéreas alocadas, as probabilidades de sobrevivência da Instalação 1 são menores do que as da Instalação 2, porém, quando esse número aumenta, esse comportamento se inverte.

**Tab. 2** – Sobrevivência das instalações (%)

Baterias antiaéreas	Instalação			
	1	2	3	4
0	30	40	40	40
1	40	50	50	50
2	50	60	60	60
3	60	60	70	80
4	70	60	80	90
5	70	60	80	90
6	70	60	80	90

**Fig. 1**– Probabilidade de sobrevivência das instalações (%).

### 3. Metodologias

O Método de PD tem sido utilizado extensivamente em pesquisa operacional militar por causa de sua capacidade de tratar um grande número de problemas reais [1]. No entanto, esse método exige grande experiência na construção de algoritmos extensos e complexos, especialmente no caso de problemas com um grande número de variáveis que produzam matrizes de altas ordens.

A solução do problema de alocação de AAA utilizando o Método PD ilustra os principais mecanismos do método, que são a utilização de fórmulas recursivas e a manutenção de valores

máximos de soluções intermediárias para encontrar as soluções máximas finais [1].

O Método MCS utiliza o princípio básico de Monte Carlo e foi proposto com o objetivo de explorar a velocidade dos computadores atuais. A utilização eficiente do Método MCS requer a correta amostragem do domínio e o estabelecimento de uma função objetivo apropriada.

Na construção de amostras com  $NAAA$  baterias antiaéreas distribuídas em  $NSites$  instalações, foi utilizada uma função geradora para a amostragem de  $NSites$  números aleatórios inteiros  $X_d$ , no intervalo  $[0, NAAA]$ , cuja soma também seja  $NAAA$ . No entanto, esse procedimento introduz um viés que compromete a uniformidade da amostragem. Portanto, a amostragem deve ser randomizada com o objetivo de corrigir esse viés.

A efetividade da proteção total das instalações é obtida através da maximização do valor total da sobrevivência das  $NSites$  instalações, varrendo as várias combinações possíveis, expressa pela Função Objetivo ( $FO$ )

$$FO = \sum_{i=1}^{NSites} PSI(X_d(i) = 1, i), \quad (1)$$

sujeita à restrição

$$\sum_{i=1}^{NSites} X_d(i) = NAAA, \quad (2)$$

onde  $X_d(i)$  representa o número amostrado de baterias antiaéreas para cada Instalação  $i$ .

Em resumo, a aplicação do Método MCS consiste, basicamente, na obtenção de uma amostra válida e no cálculo da função objetivo que, nesse caso, é a soma das probabilidades (%) de sobrevivência correspondente a cada instalação. Após um grande número de amostras processadas, as amostras repetidas são eliminadas e aquelas com o maior valor da função objetivo constituem o grupo de soluções de efetividade máxima. Na **tabela 3**, é apresentado, passo a passo, um algoritmo do Método MCS para a alocação de AAA.



**Tab. 3** – Algoritmo do Método MCS para a otimização da alocação de AAA.

Passo	Ação a ser executada
1	Amostrar $NSites$ números inteiros $X_d \in [0, NAAA]$ , cuja soma seja igual a $NAAA$ .
2	Garantir que a distribuição de $X_d$ seja uniformemente distribuída através da randomização do vetor $X_d$ .
3	Calcular $FO$ .
4	Repetir os Passos 1 a 3 um número suficiente de vezes para garantir uma boa estatística. Na situação analisada foram utilizadas 1000 amostras.
5	Eliminar os valores de $X_d$ repetidos.
6	Ordenar os planos de alocação de AAA de acordo com valores decrescentes da $FO$ .
7	Escolher os planos que apresentaram os maiores valores da $FO$ .

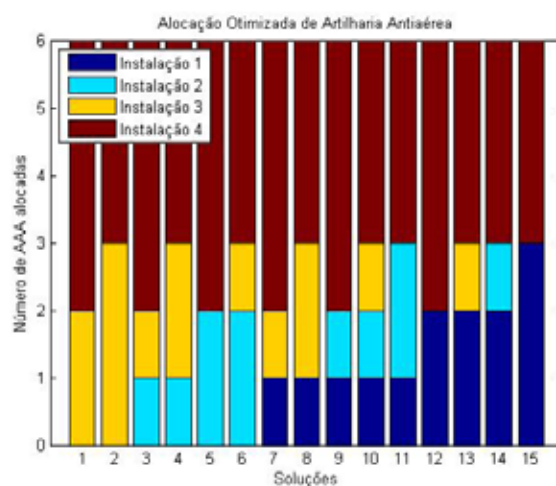
## 4. Resultados

Os resultados alcançados com o Método MCS, implementado no programa computacional MCS-AAA utilizando o ambiente Matlab [14], são idênticos aos resultados publicados na literatura [1]. As quinze soluções independentes, obtidas considerando 1000 amostras, são apresentadas na **tabela 4**.

**Tab. 4** – Planos de alocação otimizada das baterias de AAA

Plano	Alocação/instalação				Sobrevivência (%)				Função Objetivo
	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	0	0	2	4	30	40	60	90	220
2	0	0	3	3	30	40	70	80	220
3	0	1	1	4	30	50	50	90	220
4	0	1	2	3	30	50	60	80	220
5	0	2	0	4	30	60	40	90	220
6	0	2	1	3	30	60	50	80	220
7	1	0	1	4	40	40	50	90	220
8	1	0	2	3	40	40	60	80	220
9	1	1	0	4	40	50	40	90	220
10	1	1	1	3	40	50	50	80	220
11	1	2	0	3	40	60	40	80	220
12	2	0	0	4	50	40	40	90	220
13	2	0	1	3	50	40	50	80	220
14	2	1	0	3	50	50	40	80	220
15	3	0	0	3	60	40	40	80	220

A **figura 2** apresenta a distribuição relativa à **tabela 4**. Pode-se notar que a distribuição possui mais baterias de AAA alocadas na Instalação 4.

**Fig. 2** – Planos otimizados com o número de baterias de AAA alocadas em cada instalação.

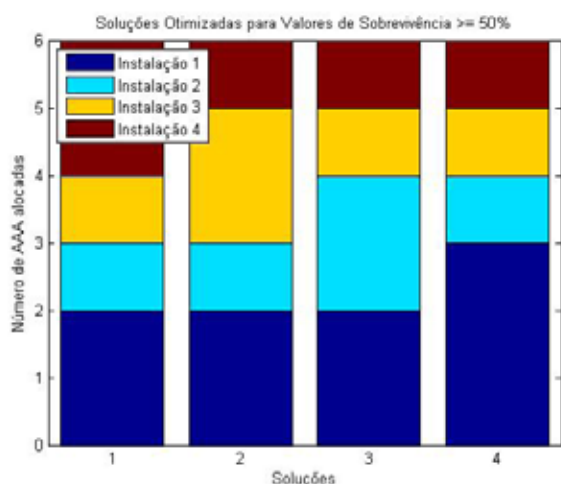
Outra situação analisada é o caso em que o planejamento requeira que todas as instalações tenham uma sobrevivência maior do que 50%. A **tabela 5** mostra as quatro soluções maximizadas para esse caso. Esses resultados também são idênticos aos publicados na literatura [1].

**Tab. 5** – Planos otimizados para valores de sobrevivência das instalações maiores ou iguais a 50%

Plano	Alocação/instalação				Sobrevivência (%)				Função Objetivo
	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	2	1	1	2	50	50	50	60	210
2	2	1	2	1	50	50	60	50	210
3	2	2	1	1	50	60	50	50	210
4	3	1	1	1	60	50	50	50	210

A **figura 3** apresenta a distribuição relativa à **tabela 4**, onde se pode observar que as soluções possuem pelo menos duas baterias de AAA alocadas na Instalação 1, como é esperado através da análise da **figura 1**.

Uma maneira de encontrar um número suficiente de amostras é observar o comportamento das soluções obtidas. Em se tratando de um método heurístico, se ao aumentar o número de amostras o número de soluções permanecer constante, então todas as soluções podem ter sido encontradas. Existem outras maneiras de garantir a qualidade dos resultados, mas, nesse trabalho, foi apenas observado o comportamento da solução.



**Fig. 3** – Planos otimizados com o número de baterias de AAA alocadas considerando valores de sobrevivência maiores ou iguais a 50%.

## 5. Comentários finais

Para o problema proposto de alocação AAA, o Método MCS, com apenas 1000 amostras, o que

representa um pequeno tempo de computação, apresentou soluções equivalentes às obtidas na literatura com o Método PD para o problema de alocação de baterias de AAA. Assim sendo, a simplicidade, que implica em uma grande facilidade de implementação, e a efetividade computacional do Método MCS o tornam muito atraente para ser utilizado em softwares, como a Plataforma AEROGRAF [15]. A próxima atividade, nessa linha de pesquisa, será a implementação do software MCS-AAA como um *plug-in* dessa plataforma. Por outro lado, caso haja interesse, o software pode ser disponibilizado mediante solicitação.

Pretende-se, no próximo trabalho, introduzir no Método MCS um procedimento de otimização com base em um refinamento das soluções encontradas. Finalmente, será desenvolvido um programa computacional para resolver o problema de alocação de armas de ataque aéreo utilizando o Método MCS.

## Referências

- [1] JAISWAL, N. K. **Military operations research**: quantitative decision making, International Series in Operations Research & Management Science. Springer Science+Business Media: New York, 1997.
- [2] BAGATIN, Marta; GERARDIN, Simone (orgs). **Ionizing Radiation Effects in Electronics**: From Memories to Imagers, CRC Press, 2015.
- [3] KAHN, H. **Applications of Monte Carlo**, Rand Corporation, RM-1237-AEC, 1954.
- [4] HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, C. Monte Carlo Methods. Fletcher & Son Ltd: Norwich, 1964.
- [5] VIEIRA, W. J.; CALDEIRA, A. D. **Uma Verificação do Método Computacional Simulated Annealing**, CTA/IEAv-EGI/NT-001/2016.
- [6] VIEIRA, W. J.; CALDEIRA, A. D. **Aplicação do Método Computacional Simulated Annealing em uma Função Objetivo Discreta**, Nota Técnica CTA/IEAv, submetida para publicação, 2016.
- [7] VIEIRA, W. J.; CALDEIRA, A. D. **Simulação Monte Carlo da Alocação de Armas de Defesa Aérea**, submetido à **Revista Spectrum**, 2017.
- [8] <https://www.top500.org/lists/2016/06/>. Último acesso em 26/06/2017.
- [9] VIEIRA, W. J.; CALDEIRA, A. D. **Método Monte Carlo de Varredura de Domínio**, Nota Técnica CTA/IEAv, submetida para publicação, 2017.
- [10] VIEIRA, W. J.; CALDEIRA, A. D. **Aplicação do Método Monte Carlo Scanning no Problema de Alocação de Armas de Defesa Aérea**, Nota Técnica CTA/IEAv, submetida para publicação, 2017.
- [11] VIEIRA, W. J.; CALDEIRA, A. D. **Uma Ferramenta Computacional de Apoio à Decisão Militar para Alocação de Armas de Defesa Aérea em Multicamadas**, submetido à **Revista Pesquisa Naval**, 2017.
- [12] Silva, J.C; VIEIRA, W. J.; CALDEIRA, A. D... **Uma Ferramenta Computacional de Apoio à Decisão Militar para o Problema de Alocação de Armas de Defesa Aérea**, submetido ao **XIX SIGE**, 2017.
- [13] BELLMAN, R. **Dynamic Programming**, Princeton University Press: New Jersey, 1957.
- [14] MATLAB version 7.11.0. **Natick**, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010.
- [15] PETERSEN, J. F.; AQUINO, M. R. C.; SALLES, R. N. **Plataforma AEROGRAF: um SIG voltado para a Força Aérea**, **SPECTRUM: Revista do Comando-Geral de Operações Aéreas**, v. 1, n. 11, pp. 26-28, 2008.

# SARP aplicado ao monitoramento de áreas com diferentes prioridades com emprego de uma estação de controle em solo para operação dinâmica por interface baseada na tarefa

Luis Claudio Batista da Silva<sup>a,b</sup>, Ricardo Maroquio Bernardo<sup>a,c</sup>, Erick Menezes Moreira<sup>a</sup>, Paulo F. F. Rosa<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>b</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)

Rua do Imperador, 971, 25620-003, Centro, Petrópolis, RJ, Brasil

<sup>c</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES)

Rodovia BR 482, s/n, 29311-970, Cachoeiro de Itapemirim, ES, Brasil

luis.silva@cefet-rj.br, ricardo.maroquio@ifes.edu.br, emenezes@ime.eb.br, rpaulo@ime.eb.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta um sistema para controle de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas de pequeno porte, aplicado a tarefas de monitoramento por cobertura de área com diferentes prioridades de interesse. O sistema tem por propósito prover um controle autônomo das aeronaves, enquanto fornece uma interface de usuário para supervisão centrada na tarefa, através da qual um único operador possa realizar o controle da missão. Para a manutenção da consciência situacional, as aeronaves devem formar uma rede, através da qual o envio dos dados sensorizados por aeronaves distantes e sem alcance da estação de controle possam ser retransmitidos por aeronaves mais próximas. Para a tarefa de cobertura, foi proposta uma abordagem de monitoramento por prioridades gradientes, através do particionamento da região em camadas concêntricas, cuja frequência de atualização varia gradualmente através das camadas. Para validação do sistema, foram realizados voos com uma frota de três quadricópteros conectados à estação de controle desenvolvida. Pela análise dos logs dos voos, foi possível validar os objetivos propostos para o sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistema de aeronaves remotamente pilotadas. Comando e controle. Rede ad hoc de veículos aéreos.

**ABSTRACT:** This work presents a system to control multiple small remotely piloted aircrafts. The purpose of the system is to provide autonomous control of aircraft while providing a high-level, task-based user interface that can make possible a dynamic mission control by a single operator. To maintain the situational awareness, aircrafts must form a network, through which the sending of the sensed data by distant aircraft and without reach of the control station can be retransmitted by closer aircraft. For the coverage task, a gradient priority monitoring approach was proposed, by partitioning the area in concentric layers, whose refresh rate varies gradually across the layers. For the validation of the proposed system, simulations and real flights were carried out with a fleet of quadcopters connected to the developed ground control station system. In actual flight experiments, it was possible for a single operator to control a fleet of three quadcopters. By analyzing the flight log data of each aircraft, it was possible to validate the fulfillment of the objectives proposed for the developed system.

**KEYWORDS:** Remotely piloted aircrafts system. Command and control. Flying ad hoc networks.

## 1. Introdução

Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (SARP) têm sido aplicados no monitoramento por cobertura de área, para fins tanto civis quanto militares. Cobertura por veículos aéreos é aplicada a diversas tarefas, tais como mapeamento, patrulhamento e vigilância, aquisição de alvos, busca e salvamento, dentre outros. Para os interesses desse trabalho, destacam-se as tarefas de monitoramento persistente aplicadas a missões de inteligência, vigilância e reconhecimento, comumente desempenhadas em operações de defesa. Neste tipo

de tarefa, faz-se necessário que os pontos de interesse sejam frequentemente revisitados, e que a região monitorada possua pontos com diferentes prioridades, que possam mudar com a evolução da missão. A atualização das informações sensorizadas tem por objetivo prover ao controle da missão conhecimento do ambiente em tempo hábil para a manutenção da consciência situacional, requisito fundamental em atividades de comando e controle.

O uso de SARP apresenta diversas vantagens, visto que o ambiente da tarefa pode ser inseguro para a presença de humanos, como também as tarefas em execução podem ser tediosas, levando à fadiga

e consequentemente à redução da concentração dos operadores da missão. Embora o uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARP) elimine o risco da presença do piloto no ambiente da tarefa, soluções que adotam veículos com cargas úteis críticas podem requerer um nível de supervisão alto. Por outro lado, ARPs de pequeno porte têm sido explorados para missões de monitoramento com recursos aplicados apenas para o sensoriamento do ambiente. Dentre as vantagens dessas aeronaves, destacam-se baixo custo e menor risco de operação. Entretanto, a restrição de recursos devido à baixa capacidade de carga paga, tais como energia e alcance da comunicação, podem limitar sua eficácia [1]. Para reduzir tais limitações, e visando aumentar a robustez, eficiência e confiabilidade deste tipo de solução, tem sido amplamente investigado o uso de múltiplas aeronaves em trabalho cooperativo aplicados a este tipo de tarefa [2]. Porém, tal solução eleva a complexidade e diversos desafios se apresentam, tais como controle e integração.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema para controle de múltiplas ARPs de pequeno porte, aplicável ao monitoramento de áreas com diferentes prioridades de interesse e alocação dinâmica de tarefas atribuídas por um único operador. A arquitetura da solução proposta é dividida em três partes: (a) estação de controle em solo, para planejamento e controle dinâmico da missão, através de interface de usuário baseada na tarefa; (b) frota de quadricópteros com capacidade de navegação autônoma por sensores inerciais e satélites; (c) *software* de controle embarcado nas aeronaves, responsável pelo gerenciamento da comunicação, alocação de trajetórias para a aeronave e controle dos sensores aplicados na missão.

## 2. Revisão da literatura

Nesta seção, são apresentados os fundamentos teóricos para sistemas de aeronaves remotamente pilotadas, bem como um comparativo com trabalhos relacionados ao tema.

### 2.1 Sistema de aeronaves remotamente pilotadas

De acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) [3], um sistema de aeronaves remotamente pilotadas (SARP) é um sistema composto não apenas pela aeronave remotamente pilotada (ARP), como também pela infraestrutura necessária para sua operação, tais como: estação de pilotagem remota, enlace de comando e controle, equipamentos para lançamento e recuperação, dentre outros.

A **figura 1** apresenta uma visão de alto nível da arquitetura de um SARP. Os principais componentes desta arquitetura, bem como suas funções, são apresentados a seguir:

- Estação de controle em solo (ECS): elaboração e envio dos planos de voo para as ARPs; interface gráfica para controle da missão e visualização dos dados sensorizados;
- Rádio controle manual: requisito de redundância para intervenção do operador em caso de falhas do sistema; o receptor embarcado decodifica os comandos de controle;
- Controladora de voo: executa um *software* de piloto automático para controle da atitude de voo da aeronave; recebe comandos do rádio controle ou mensagens através do rádio de dados (em um protocolo definido); realiza a leitura dos sensores inerciais (INS) e receptor de satélites (GPS) para gerar os sinais necessários para os atuadores, visando cumprir a atitude de voo requerida;

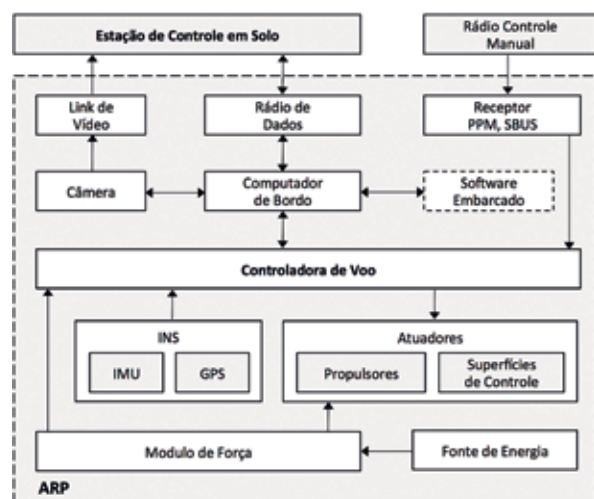


Fig. 1– Esquema de alto nível dos componentes de um SARP.



- Computador de bordo: além da controladora de voo, pode ser embarcado um microcomputador na ARP, que integrado ao piloto automático, permite o processamento das informações sensorizadas e a leitura dos sensores embarcados, podendo inclusive auxiliar na navegação;
- *Software* embarcado: *software* que roda no computador de bordo; atua integrado ao piloto automático, enviando comandos e recebendo as leituras de dados dos sensores;
- Módulo de força: fornece a energia necessária ao funcionamento dos componentes da aeronave.

## 2.2 Classificação das ARPs

As ARPs, de acordo com o DECEA [4], podem ser classificadas quanto ao nível de automação de voo, como:

- Remotamente pilotadas: a ação do piloto é direta durante todas as fases do voo;
- Automáticas: funcionam com piloto automático embarcado, de modo que possam cumprir trajetória de voos planejados sem intervenção humana; entretanto, permite que o piloto possa interferir a qualquer momento;
- Autônomas: realiza plano de voo previamente embarcado do início ao fim, desde a decolagem ao pouso, sem permitir a interferência de um piloto ou mudança dos parâmetros estabelecidos inicialmente para o voo.

Quanto à classificação pela dimensão, conforme regulamentação da ANAC [5], as ARPs podem ser classificadas de acordo com o peso máximo de decolagem (**tabela 1**).

**Tab. 1** - Classificação das ARPs conforme a ANAC.

Classe	Características
Classe 1	Peso máximo de decolagem maior que 150 kg
Classe 2	Peso máximo de maior que 25 kg e até 150 kg
Classe 3	Peso máximo de decolagem de até 25 kg

Há ainda a classificação das aeronaves quanto à sustentação. Nela, são consideradas as características estruturais e propriedades relacionadas ao modo de voo. As principais classificações por tipo e sustentação são: asa fixa (avião), asa rotativa (helicóptero e multirotores), mais leve que o ar (dirigível), dentre outras.

## 2.3 Quadricóptero

Os quadricópteros são ARPs do tipo asa rotativa, impulsionados por quatro rotores movidos por motores elétricos e controlados por um sistema de controle eletrônico para estabilização de voo. Possuem capacidade de decolagem e pouso vertical (VTOL), voo pairado e boa manobrabilidade. É um sistema não linear, fortemente acoplado com 6-DOF (graus de liberdade), sendo 3 movimentos lineares e 3 angulares. As forças e momentos são gerados pelas hélices ligadas aos rotores. Assim, o veículo é controlado pelas velocidades angulares dos motores, que produzem um impulso e um torque que, combinados, geram um impulso principal, e os torques de rolagem ( $\Phi$ ), arfagem ( $\theta$ ) e guinada ( $\psi$ ) [6]. A **figura 2** apresenta os movimentos angulares ( $\Phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ), em relação aos eixos (x,y,z) do sistema de referência fixado ao veículo. A força peso é dada por  $mg$ .



**Fig. 2** – Forças ( $F_i$ ) e momentos ( $M_i$ ) do quadricóptero.

## 2.4 Trabalhos relacionados

O objetivo do sistema proposto é o monitoramento de regiões com pontos com diferentes prioridades de interesse. Considerando a decomposição de uma região sob monitoramento em células, [7] apresenta o conceito de “idade” da célula como o intervalo de tempo desde sua última atualização, durante a detecção desta por alguma aeronave. Dessa forma, uma célula com prioridade mais alta deve ter sua idade máxima menor que a de prioridade mais baixa. Em [8][9][10], os autores apresentam soluções em que as ARPs trabalham de forma autônoma no monitoramento de regiões com diferentes prioridades de interesse. No entanto, diferentemente do sistema proposto neste trabalho,

que permite a atribuição dinâmica de prioridades durante a missão, nos trabalhos investigados as prioridades são definidas a priori, e não podem ser redefinidas no decorrer da missão.

Outro requisito do presente trabalho é a otimização dos recursos humanos empregados na missão. Em [11], os autores discutem a sobrecarga em um único piloto quando ele precisa controlar tarefas de várias aeronaves. Eles apresentam uma comparação entre o controle baseado em veículo, no qual o operador atribui tarefas individualmente a cada ARP, e o controle baseado em tarefas, no qual o operador atribui uma lista de tarefas para a frota de ARPs, que distribui autonomamente essas tarefas entre aeronaves. Os autores indicam vantagens significativas no controle baseado em tarefas, tanto no desempenho quanto na robustez da solução. No entanto, eles apontam que o controle baseado em tarefas pode levar a uma perda de controle em situações inesperadas. Em [12][13], os autores apresentam soluções de controle baseadas em tarefas, nas quais um único piloto comanda a missão por meio de uma interface de alto nível de atribuição de tarefas. No entanto, a comunicação da estação terrestre com os veículos é feita individualmente. No presente trabalho, a comunicação deve ocorrer por meio de uma rede formada pelas aeronaves e, portanto, aumentando a robustez e cobertura do sistema.

Restrições de comunicação também podem reduzir a eficácia de pequenas ARPs em tarefas de monitoramento. As pesquisas em [14][15] apresentam o uso colaborativo de múltiplas aeronaves em tarefas de vigilância, nas quais as restrições de comunicação são atendidas pela formação de uma rede entre as ARPs. Pesquisas recentes [16][17][18] abordam o problema de comunicação entre múltiplas ARPs como uma nova família de rede, chamada de rede *ad hoc* de aeronaves (FANET), vista como uma forma especial de redes *ad hoc* de dispositivos móveis (MANET) e redes *ad hoc* de veículos (VANET). Os autores indicam que as redes formadas por aeronaves necessitam de novas abordagens, devido aos desafios impostos tanto pela distância da cobertura quanto pela mobilidade

desses veículos, que exigem constantes mudanças na topologia da rede.

A contribuição do presente trabalho é a elaboração da arquitetura de um sistema robusto para o controle autônomo de uma frota de ARPs, conectadas a uma estação de controle em solo, provida de uma interface de supervisão de alto nível para suportar o controle dinâmico da missão baseada na tarefa, por controle de único operador.

### 3. Enunciado do problema

O sistema proposto é aplicável ao monitoramento por cobertura de área, no qual as informações sensoriadas devem ser entregues na estação de controle da missão em tempo hábil para a manutenção da consciência situacional, de modo que seja um recurso de comando e controle portátil e de pronto emprego. Para isso, o SARP deve ser composto por ARPs de pequeno porte e uma ECS compacta.

Para tal, propõe-se como tarefa a ser realizada pelo SARP a observação de um ponto de interesse com a manutenção de um perímetro de segurança. A prioridade decai proporcionalmente à distância radial do ponto central de maior interesse até as bordas da região sob monitoramento.

Para a cobertura, propõe-se o uso de múltiplas ARPs, de modo que a região de interesse possa ser particionada entre diversas aeronaves em trabalho cooperativo. As aeronaves devem formar uma rede de dados, para que os dados sensoriados por uma aeronave, cujos recursos de comunicação não alcancem a estação de controle, possam ser retransmitidos por outras aeronaves mais próximas.

Também, visando que as ARPs possam ser controladas dinamicamente por um único operador, a ECS deve fornecer uma interface de usuário de alto nível para controle baseado na tarefa, dotada de um sistema interativo de mapas para o planejamento, controle e acompanhamento da missão. As tarefas solicitadas pelo operador devem ser planejadas pelo sistema, e distribuídas entre as ARPs, para o cumprimento dos planos de voo de forma autônoma. A ECS também deve prover controles para que o

operador possa intervir sobre o funcionamento de qualquer ARP para o cumprimento de funções básicas de navegação.

### 3.1 Domínio da aplicação

Os principais elementos do domínio da aplicação para a tarefa proposta para o SARP são descritos a seguir:

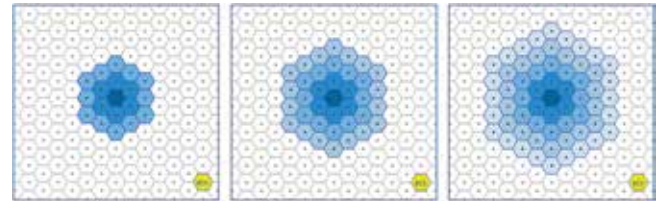
- O ambiente  $W$  é *outdoor* e dispõe de um conjunto de coordenadas  $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ . Cada  $C_i \in R^3$  é um ponto sobre a superfície terrestre [*latitude, longitude, altitude*];
- A área de interesse  $A$  sob monitoramento é um subconjunto de  $W$ , que forma um polígono fechado;
- $P$  é uma partição de  $A$  e cada elemento  $c_j \in P$  é denominado “*célula*”, cujo tamanho  $l$  é o alcance do sensor;
- A célula central  $c_0$  de  $A$  é o ponto de maior prioridade; as demais células de  $A$  formam um perímetro com  $K$  camadas concêntricas em torno de  $c_0$ ; a prioridade de cada camada decai proporcionalmente à distância de  $c_0$ ;
- A prioridade de interesse determina a frequência  $f_k$  de atualização da célula  $c_j$  na camada  $k$ , para  $k \leq K \in N$ ; células da mesma camada possuem mesma prioridade;
- A frota  $U$  é formada por  $n$  aeronaves autônomas  $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ; cada  $u_i$  no tempo  $t$  monitora a camada  $k$ .

Para os objetivos do presente trabalho, são consideradas as seguintes restrições: a região sob monitoramento é livre de obstáculos; as ARPs são similares quanto à capacidade de voo; e, os sensores embarcados para execução da missão são homogêneos quanto ao alcance de sensoriamento.

## 4. Solução proposta para o SARP

Para a tarefa de cobertura de área, foi adotado o uso de uma grade hexagonal, devido à propriedade de mesma distância de navegação para qualquer célula vizinha. Para abordar o monitoramento de áreas com diferentes prioridades de interesse, propomos uma abordagem chamada de “*gradiente de prioridades*”. A célula central ( $c_0$ ) do gradiente é a de maior prioridade. As demais células formam camadas concêntricas em

torno de  $c_0$ , cuja prioridade decai proporcionalmente em direção à borda do gradiente (vide **figura 3**). As células na mesma camada têm a mesma prioridade e devem ser revisitadas com mesma frequência.



**Fig. 3** – Gradiente de Prioridades com 3, 4 e 5 camadas.

Considerando uma frota de aeronaves  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  com sensores homogêneos, a área de cobertura total  $A_{max}$  do gradiente de prioridades sobre a grade hexagonal, considerando o tamanho do lado  $l$  do hexágono baseado no alcance do sensor e o gradiente com  $K$  camadas, é dado por:

$$A_{max} = \frac{3\sqrt{3}}{2} l^2 \left( \left( \sum_{k=1}^n 6(k-1) \right) + 1 \right) \quad (1)$$

A frequência  $f_k$  de revisitas para cada célula na camada  $k$ , considerando a cobertura de cada camada por apenas uma aeronave, sendo  $v$  a velocidade da aeronave, é dada por:

$$f_k = \frac{1}{\frac{\sqrt{3}l}{6(k-1)}}, \forall k \geq 2 \quad (2)$$

### 4.1 Algoritmo de realocação proposto

Ao iniciar a missão, as aeronaves ocupam as camadas do gradiente por ordem de prioridade. Durante a missão, o operador pode solicitar a realocação da posição do gradiente. Neste momento, a frota de ARPs deve receber os novos planos para ocupar a nova posição de interesse.

Uma solução trivial seria deslocar as ARPs para a mesma camada em que estavam antes da realocação. Porém, esta solução não prioriza a ocupação da célula central (de maior prioridade), uma vez que pode haver ARPs em camadas externas mais próximas do centro do

novo gradiente, que ocupariam esta posição em menor tempo. Para isso, a abordagem proposta é a coordenação de agentes por posicionamento estratégico [19]. Nesta, a ARP que está mais próxima do centro da nova posição do gradiente ocupará esta posição. Esta estratégia aplica-se a todas as demais aeronaves, de modo que as outras camadas também serão ocupadas pela ARP mais próxima em ordem decrescente de prioridade, conforme apresentado em [20].

## 4.2 Arquitetura básica do SARP proposto

Neste trabalho, propõe-se uma arquitetura modular para um SARP, conforme apresentada na **figura 4**, na qual as aeronaves são controladas por um piloto automático com capacidade de navegação autônoma por sistema inercial e por satélites. O piloto automático recebe os planos de voo a partir de um sistema de controle embarcado, responsável pela alocação de tarefas, controle da carga útil e gerenciamento dos recursos de comunicação. Na estação de controle, os recursos para planejamento de missão e uma interface de usuário para o controle da missão estão disponíveis.

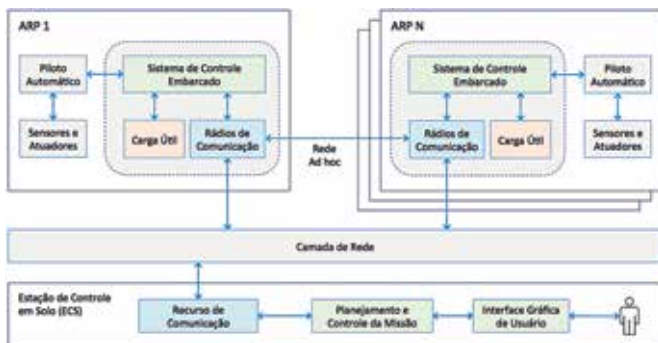


Fig. 4 – Visão geral da arquitetura do SARP proposto.

Para o sistema de controle embarcado, foi elaborada uma arquitetura em camadas com diferentes níveis de abstração, na qual cada camada atua como cliente da camada inferior e como servidora da camada superior (**figura 5**). Cada demanda da ECS deve ser tratada pelas camadas, diminuindo o nível de abstração à medida que se aproxima do sistema de piloto automático. No nível mais alto da arquitetura, a ECS envia comandos para o controle embarcado e recebe telemetria por um protocolo de comunicação

baseado na tarefa. Para a passagem de controle para o piloto automático, foi adotada a estratégia de implementação de um *middleware*, cujo objetivo é reduzir o nível de abstração da aplicação para o controle do veículo. O piloto automático adotado é o ArduCopter, que utiliza o protocolo de comunicação MAVLink (*Micro Air Vehicle Communication Protocol*). Para isso, foi utilizada a API Dronekit (*open-source*), que oferece um nível de abstração intermediário para a comunicação MAVLink, recebendo comandos por mensagens de objetos e realizando a conversão para o formato do protocolo.

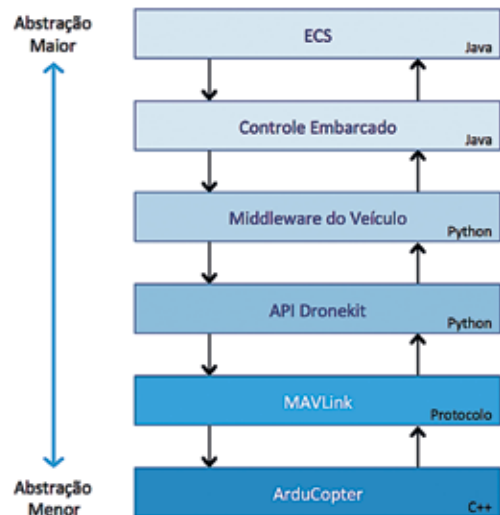


Fig. 5 – Diagrama básico de integração do SARP.

## 4.3 Estação de controle em solo

O SARP dispõe de uma ECS dotada de interface gráfica de usuário de nível supervisor baseada na tarefa, ou seja, uma interface na qual o operador possa realizar os objetivos da missão, sem necessidade de engajamento com as aeronaves. Nesta, o operador interage com o mapa da região onde ocorre a tarefa para comandar a missão. O sistema é responsável por distribuir as tarefas entre as aeronaves, que executam o voo em modo autônomo. A **figura 6** apresenta a interface gráfica da ECS desenvolvida.

O painel de controle possui duas abas, uma para o planejamento e outra para o controle dinâmico (execução) da missão. Na aba de controle, são exibidas informações da telemetria em tempo real de cada ARP conectada à ECS.



Na **figura 7**, é apresentado o painel de telemetria disponível para cada aeronave, conforme descrito a seguir:

- (A) Id ARP e camada do gradiente de alocação da ARP;
- (B) Tempo total de voo da aeronave aplicada na missão;
- (C) Contador de comandos enviados pela ECS e recebidos e executados pelo sistema de controle embarcado;
- (D) Nível Bateria e contador de telemetria enviada pelo sistema de controle embarcado e pelo piloto automático;
- (E) Configuração do *link* de comunicação da aeronave;
- (F) Status do piloto automático e modo de voo da ARP;
- (G) Índice do *waypoint*, latitude e longitude da posição;
- (H) Velocidade, distância da ECS e altitude da aeronave;
- (I) Condições de GPS: quantidade de satélites fixos (necessário mínimo de 3); satélites visíveis; índice de diluição da geometria horizontal dos satélites (ideal<1);
- (J) Comandos de navegação que podem ser enviados para a ARP executar fora da missão; pode ser usado pelo operador para assumir o controle imediato da ARP.



**Fig. 6** – Interface gráfica e usuário da ECS do SARP.

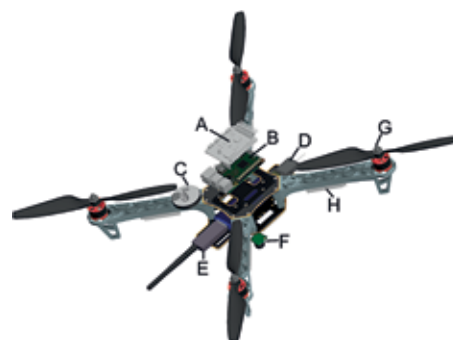
Os contadores de telemetria e de comando são utilizados para que o sistema possa realizar a validação das entregas das mensagens, sem a necessidade de um mecanismo de confirmação do protocolo de comunicação.



**Fig. 7** – Painel de telemetria em tempo real para cada ARP.

#### 4.4 Construção da plataforma de voo

Para a frota de aeronaves do SARP, foi adotado o uso de quadricópteros. Este tipo de aeronave atende ao requisito do sistema para uma solução portátil. Os quadricópteros possuem uma plataforma com mecanismos de controle simples, capacidade de pouso e decolagem vertical (VTOL) e capacidade de voo pairado, além da grande oferta de componentes disponíveis no mercado. A **figura 8** apresenta um esquema básico de integração dos componentes do quadricóptero. Na **tabela 2**, são apresentadas as especificações dos quadricópteros construídos para o SARP.



**Fig. 8** – Esquema de integração dos componentes do quadricóptero: (A) controladora de voo Navio2; (B) RaspberryPi 3B; (C) antena de GPS; (D) receptor do controle manual 2.4GHz; (E) rádio de dados XBee Pro 900MHz; (F) sonar MaxBotix I2CXL-EZ0; (G) motor 2312 brushless de 920kv e hélices de 9.45"; (H) controlador eletrônico de velocidade de 20A.

Os componentes podem ser agrupados por função, tais como: componentes de propulsão (motores; controladores eletrônicos de velocidade - ESC; hélices), de processamento (controladora de voo; microcomputador embarcado), de comunicação (receptor de rádio controle; rádio de dados; conexão WiFi), além do chassi (*frame*), que fornece uma estrutura rígida ao veículo e suporte para fixação dos demais componentes. O chassi utilizado é do tipo X, no qual a frente da aeronave é apontada por um par de motores que rotacionam em

sentido contrário, tendo como referencial o eixo X do sistema de coordenadas *North-East-Down*.

A controladora de voo adotada para o projeto foi a Navio2, da Emlid [21]. Diferentemente da maioria das controladoras, a Navio2 não processa o *software* de piloto automático diretamente, mas funciona como um componente integrado ao barramento GPIO do RaspberryPi 3B, sendo o ArduPilot [22] o principal *software* de piloto automático (*open-source*) suportado. No entanto, a Navio2 utiliza apenas parte da capacidade de processamento do RaspberryPi 3B, de modo que outras aplicações podem rodar no mesmo ambiente do piloto automático.

tab. 2 - Principais especificações do quadricóptero.

Tamanho do chassi	450 mm
Peso total de decolagem	1350 g
Capacidade de carga extra	Aproximadamente 800 g
Tempo de voo	8-17 min (depende da carga extra)
Controladora de voo	Navio2 (Emlid)
Piloto automático	ArduCopter 3.4 (ArduPilot)
Bateria	LiPo de 3 células; 5200mAh; 10C

## 5. Experimentos e resultados

Para validar o SARP proposto, foi utilizada a ECS desenvolvida para planejamento e controle do voo múltiplo autônomo, e o *software* de controle embarcado nas ARPs para alocação dos comandos e planos recebidos em tempo real da ECS. Para isso, foram utilizados três quadricópteros com *hardware* similar (figura 9), com os parâmetros do piloto automático configurados conforme a tabela 3.



Fig. 9 – Equipamentos utilizados no experimento de voo.

Tab. 3 - Configuração dos parâmetros dos quadricópteros.

Parâmetro	ARP (1)	ARP (2)	ARP (3)
Velocidade Horizontal	3,0 m/s	3,0 m/s	5,0 m/s
Velocidade Vertical Subida	2,5 m/s	2,5 m/s	2,5 m/s
Velocidade Vertical Descida	1,5 m/s	1,5 m/s	1,5 m/s

Foram realizados voos com uso de uma rede *ad hoc* com uso de rádios XBee. Devido ao uso da ECS desenvolvida, nenhum plano de voo foi carregado previamente na aeronave, apenas o *software* de controle foi embarcado. A distância entre os centroides das células do gradiente de prioridades foi parametrizada para 12,5 m.

A trajetória de voo realizada por cada aeronave para cobertura do gradiente de prioridades é apresentada na figura 10. No algoritmo de realocação proposto, a aeronave pode mudar de camada para otimizar o tempo de ocupação do gradiente. Como pode ser visto no mapa, a ARP 1 começa cobrindo a camada 2 (figura 10a), mas diante da realocação do gradiente de prioridades para outra área, foi alocada para a camada 1, ou seja, o centro do gradiente (figura. 10b).

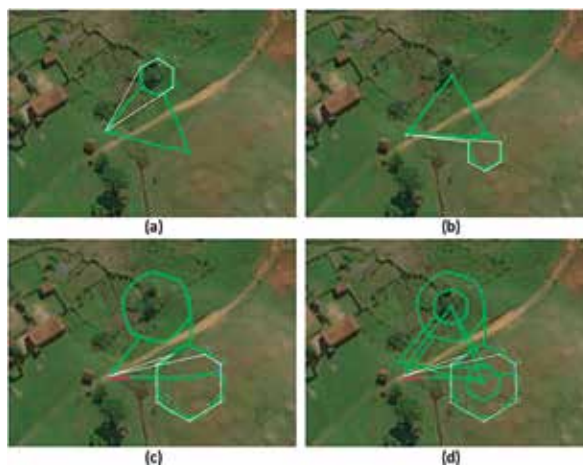
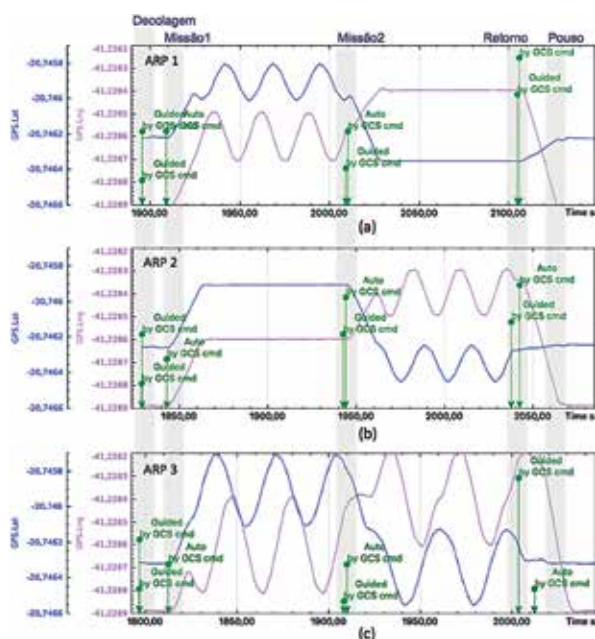


Fig. 10 – Mapa das trajetórias das aeronaves em Voo Múltiplo: (a) trajetória da ARP 1; (b) trajetória da ARP 2; (c) trajetória da ARP 3; (d) sobreposição das trajetórias das ARPs.

Na figura 11, são apresentados gráficos de posição das trajetórias executadas por cada ARP durante a execução da tarefa. São destacados,

no gráfico, os diferentes momentos do voo, desde a decolagem até o pouso. Também é possível observar o momento em que os comandos são enviados pela ECS (GCS cmd) para as ARPs. Por exemplo, no gráfico da **figura 10a**, é apresentada a trajetória da ARP 1, que inicia na camada 2 da primeira posição do gradiente de prioridades e, após realocação do gradiente para a segunda posição solicitada pelo operador, muda para a camada 1 para atendimento prioritário da célula central, devido ao fato de estar mais próxima deste ponto no momento da realocação do gradiente.



**Fig. 11**– Gráficos das trajetórias realizadas pelos quadricópteros para o experimento de voo real múltiplo: (a) latitudes e longitudes da ARP 1; (b) da ARP 2; e (c) da ARP 3.

Na **figura 12**, são apresentados quadros extraídos do vídeo gravado durante a realização do experimento de voo autônomo controlado por um único operador. Os quadros estão em ordem dos eventos comandados pelo operador, desde a decolagem até o pouso, com realocação da posição do gradiente de prioridades. Ao lado de cada quadro é apresentada uma captura de tela da interface da ECS durante o voo, com destaque para a exibição da posição e a telemetria de cada aeronave no tempo real da tarefa.

Na **tabela 4**, são apresentados os dados obtidos a partir da análise dos logs de voo gerados pelo piloto

automático embarcado em cada quadricóptero. Para as ARPs (1) e (2), o erro de posição da trajetória realizada, quando comparada com a trajetória executada pelas aeronaves, foi submétrico, considerado um resultado satisfatório para o emprego de navegação por sistema de satélites. É possível observar que a ARP (3), configurada para velocidade horizontal 2 m/s maior que as demais e que realizou a cobertura da camada 3 do gradiente de prioridades, apresentou maior erro de posição que as demais aeronaves. Os experimentos apontaram que, quanto maior a velocidade da ARP, maior o erro de posição em relação aos vértices da trajetória de voo.

**Tab. 4** - Resultado da análise dos logs do voo múltiplo.

Parâmetro Medido		ARP (1)	ARP (2)	ARP (3)
Camada 1	Velocidade média horizontal	1,36 m/s	1,41 m/s	---
	Erro médio de posição	0,28 m	0,19 m	---
	Desvio absoluto médio de posição	0,21 m	0,13 m	---
Camada 2	Velocidade média horizontal	2,45 m/s	2,28 m/s	---
	Erro médio de posição	0,64 m	0,65 m	---
	Desvio absoluto médio de posição	0,28 m	0,33 m	---
Camada 3	Velocidade média horizontal	---	---	3,47 m/s
	Erro médio de posição	---	---	1,31 m
	Desvio absoluto médio de posição	---	---	0,85 m

**Considerações sobre o experimento de voo:** através deste trabalho foi possível a validação do SARP no controle de múltiplas ARPs controladas por uma ECS, por sua vez, comandada por um único operador. Para tal, foram utilizados apenas os recursos desenvolvidos para solução, sem a necessidade de *software* de terceiros para o planejamento e execução das tarefas. Embora os rádios de controle estivessem presentes e configurados para assumir o controle de cada quadricóptero em caso de falhas do sistema, os mesmos não foram necessários durante os voos. Também foram testadas, separadamente, as funcionalidades do painel de controle básico de navegação de cada ARP, disponível para o operador enviar comandos de controle para qualquer aeronave a qualquer instante. Entretanto, durante a realização das missões, não houve qualquer incidente que demandasse o uso deste recurso.





**Fig. 12** – Quadros do vídeo do experimento em voo real e captura de tela da estação de controle em solo, com destaque para a posição das aeronaves no mapa e a telemetria em tempo real de cada ARP, para cada fase do voo. Decolagem: início da missão com decolagem automática. Missão 1: ocupação da primeira área de interesse. Missão 2: realocação da frota de aeronaves (após solicitação do operador) para ocupação da segunda área de interesse. Pouso: após solicitação do operador para o término da missão, as aeronaves retornam para o ponto de decolagem e pousam automaticamente.



## 6. Conclusão

Neste trabalho, foi proposto um sistema para coordenação de múltiplas ARPs de pequeno porte, destinado à cobertura de áreas com diferentes prioridades de interesse, aplicáveis a tarefas de monitoramento. Foram investigadas soluções, com ênfase no planejamento e execução autônomos das tarefas, bem como a disponibilidade de ECS dotada de uma interface de usuário de alto nível baseada na tarefa.

O projeto do SARP foi baseado no estilo em camadas, visando uma solução modular, de fácil integração, modificação e adaptação para novas funcionalidades. Para a cobertura de áreas com diferentes prioridades, foi proposta a abordagem de “gradiente de prioridades”. Nesta, a região é decomposta em células que formam camadas

concêntricas, de modo que a célula central deve ser coberta com maior prioridade, sendo a prioridade reduzida gradualmente através das camadas. Para o enlace entre as ARPs e a ECS, foi estabelecida uma rede *ad hoc* com uso de rádios XBee.

O SARP desenvolvido foi validado em experimentos de voo real com o emprego de quadricópteros construídos para a pesquisa. Foi possível que um único operador realizasse o controle de uma frota com três quadricópteros em voo autônomo, e ainda sem a necessidade de intervenção do operador para o controle individual de nenhum veículo durante a missão. Os logs dos voos foram capturados e analisados. As trajetórias planejadas pela ECS foram executadas pelas ARPs. Os resultados das análises dos dados propiciaram a validação dos requisitos propostos para o sistema.

## Referências

- [1] CHEN, Y.; ZHANG, H.; Xu, M. The coverage problem in UAV network: a survey. **Fifth International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)**, págs. 1–5, 2014.
- [2] NIGAM, N.; The Multiple unmanned air vehicle persistent surveillance problem: a review. **Machines**, 2(1):13–72, 2014.
- [3] ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. **Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas**, 2015; <http://www2.anac.gov.br/rpas>, acessada em maio de 2018.
- [4] DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Voos de RPAS**, 2015; <https://www.decea.gov.br>, acessada em maio de 2018.
- [5] ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. **Classes de drones**, 2017; <http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones/classes-de-drones>, acessada em maio 2018.
- [6] CARRILLO, L. R. G.; LÓPEZ, A. E. D.; LOZANO, R.; Pégard, C.; Quad rotorcraft control: vision-based hovering and navigation. **Springer Science & Business Media**, 2012.
- [7] NIGAM, N.; Kroo, I.; Persistent surveillance using multiple unmanned air vehicles. **Aerospace Conference 2008 IEEE**, pp. 1–14, 2008.
- [8] KHANDANI, H.; MORADI, H.; PANAHI, J. Y.; A real-time coverage and tracking algorithm for UAVs based on potential field. **Robotics and Mechatronics (ICRoM)**, 2014 **Second RSI/ISM International Conference**, pp. 700–705., 2014.
- [9] HOWDEN, D. J.; Fire tracking with collective intelligence using dynamic priority maps. **Evolutionary Computation (CEC)**, 2013 **IEEE Congress**, pp. 2610–2617., 2013.
- [10] MICHAEL, N.; STUMP, E.; MOHTA, K. Persistent Surveillance with a Team of MAVs. **Intelligent Robots and Systems (IROS)**, 2011 **IEEE/RSJ International Conference** pp. 2708–2714., 2011.
- [11] CUMMINGS, M. L.; BERTUCELLI, L. F.; MACBETH, J.; SURANA, A. Task versus vehicle-based control paradigms in multiple unmanned vehicle supervision by a single operator. **IEEE Transactions on Human-Machine Systems**, 44 (3):353–361, 2014.
- [12] ARAUJO, J.; SUJIT, P.; SOUSA, J. Multiple UAV area decomposition and coverage. **Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA)**, 2013 **IEEE Symposium**, pp. 30–37, 2013.
- [13] LICHTENSTERN, M.; ANGERMANN, M.; FRASSL, M.; IMU-and GNSS-assisted single-user control of a MAV-swarm for multiple perspective observation of outdoor activities. **ION ITM**, 2011.

- [14] ACEVEDO, J. J.; ARRUE, B. C.; MAZA, I.; OLLERO, A. Distributed approach for coverage and patrolling missions with a team of heterogeneous aerial robots under communication constraints. **Int Journal Adv Robotic Sy**, 10(28), 2013.
- [15] ACEVEDO, J. J.; ARRUE, B. C.; DIAZ-BANEZ, J. M.; VENTURA, I.; MAZA, I.; OLLERO, A.; One-to-one coordination algorithm for decentralized area partition in surveillance missions with a team of aerial robots. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, 74(1-2):269–285, 2014.
- [16] BEKMEZCI, I.; SAHINGOZ, O. K.; TEMEL, Ş.; Flying ad-hoc networks (FANETs): a survey. **Ad Hoc Networks**, 11(3):1254–1270, 2013.
- [17] SAHINGOZ, O. K.; Networking models in flying Ad-hoc networks (FANETs): concepts and challenges. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, 74(1-2):513– 527, 2014.
- [18] BEKMEZCI, I.; SEN, I.; ERKALKAN, E.; Flying ad hoc networks (FANET) test bed implementation. **Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2015 7th International Conference**, pp. 665–668, 2015.
- [19] REIS, L. P.; **Coordenação em sistemas multi-agente: aplicações na Gestão universitária e futebol robótico** Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade do Porto, Portugal, 2003.
- [20] SILVA, L. C. B.; BERNARDO, R. M.; OLIVEIRA, H. A.; ROSA, P. F. F. Multi-UAV agent-based coordination for persistent surveillance with dynamic priorities. **Military Technologies (ICMT), 2017 International Conference**, pp. 765-771, 2017.
- [21] EMLID; **Navio 2 autopilot hat for Raspberry Pi powered by ArduPilot and ROS**; 2017. <https://emlid.com/navio>, acessada em janeiro de 2017
- [22] ARDUPILLOT DEV TEAM; **ArduPilot autopilot suite**, 2017. <http://ardupilot.org>, acessada em janeiro de 2017.

# Utilização de cinzas de caldeiras industriais como substituição parcial do cimento Portland em argamassas

Fernanda L. S. Brandão<sup>a</sup>, Vinícius A. Coelho<sup>b</sup>, Cleidson C. Guimarães<sup>\*b</sup>

<sup>a</sup>Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, Bahia, Brasil

<sup>b</sup>Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, Bahia, Brasil

\*cleidsonguimaraes@ufrb.edu.br

**RESUMO:** A construção civil tem buscado alternativas para redução de custos com a inserção de novos produtos e técnicas que garantam melhor desempenho das edificações. Nesse contexto, o presente trabalho baseia-se na análise do comportamento de argamassas, produzidas com substituição parcial do Cimento Portland (CP) por cinzas provenientes da queima de lenha de eucalipto e grevilea nas caldeiras de uma indústria calçadista. Para realização dessa pesquisa, foram produzidas argamassas com traço 1:3 e 1:6, com substituições parciais do CP pelas cinzas residuais de caldeiras (CRC) nas proporções de 0, 5, 10 e 15%. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por imersão e por capilaridade. Observou-se que o uso das CRC resultou em melhorias nas propriedades analisadas nas argamassas com o aumento do teor de cinzas, levando a significativos incrementos na resistência à compressão e redução da absorção de água.

**ABSTRACT:** Civil construction has sought alternatives for cost reduction with the insertion of new products and techniques that guarantee better performance of buildings. In this context, the present work is based on the analysis of properties of mortars, produced with partial replacement of the Portland cement (CP) by ash from the burning of eucalyptus wood and grevilea in the boilers of a footwear industry. To perform this research, mortars with mix of 1:3 and 1:6 were produced, with partial substitutions of CP by the residual boiler ash (CRC) in the proportions of 0, 5, 10 and 15%. Tests of axial compressive strength, tensile strength by diametrical compression, absorption of water by immersion and by capillarity were performed. It was observed that the use of CRC resulted in improvements in the properties analyzed in mortars with increasing ash content, leading to significant increases in compressive strength and reduction of water absorption.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cinzas Industriais. Cimento Portland. Argamassa.

**KEYWORDS:** Industrial Ash. Portland Cement. Mortar.

## 1. Introdução

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) [1] o cimento Portland é uma comódite pouco substituível. Dados da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) [2] indicam que, em 2020, foram vendidas 60,8 milhões de toneladas de cimento Portland no Brasil. Já a produção mundial, no mesmo ano, foi estimada em 4,1 bilhões de toneladas [3]. Estando presente em todo tipo de construção, da mais simples moradia até a mais complexa obra de infraestrutura, é o principal ligante utilizado na produção do concreto. A indústria do cimento vem sendo considerada uma das maiores poluidoras do meio ambiente, tanto devido ao grande consumo das jazidas de calcário quanto às suas elevadas taxas de emissão de CO<sub>2</sub> [4, 5, 6 e 27].

Segundo o SNIC e a ABCP, citados pela CETESB [7], em escala mundial, aproximadamente 90% das

emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da fabricação do cimento ocorrem durante a produção do clínquer, seja na calcinação ou descarbonatação da matéria-prima, seja na queima de combustíveis no interior dos fornos. Decorre disso que, para cada tonelada de clínquer produzido, estima-se que a mesma quantidade de CO<sub>2</sub> seja liberada no ambiente [8].

Nesse cenário, uma alternativa buscada por muitos pesquisadores do ramo da construção civil é promover a utilização de diversos resíduos em substituição parcial ao cimento Portland, entre eles resíduos de biomassa, à exemplo das cinzas de algaroba [9]; bagaço de cana de açúcar [10, 11], cinzas da biomassa da agroindústria do cacau [12], cinza de casca de coco verde [13], subprodutos industriais [14, 15], e até resíduo da produção do silício metálico [16].

A viabilidade de utilização de resíduos industriais, principalmente os inorgânicos oriundos da combustão, é favorecida pela similaridade entre esses resíduos e as adições minerais já comumente empregadas. Segundo Mehta e Monteiro [17], as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, sendo materiais que apresentam atividade pozolânica ou propriedades cimentantes, que podem ser adicionados às argamassas ou aos concretos visando melhorar suas propriedades. Para a NBR 11172:1990 [18], as adições minerais podem ser classificadas quanto à sua ação físico-química em três tipos: inertes, cimentantes e pozolânicas.

O cimento Portland é um ligante hidráulico cujos compostos a base de silicatos (C2S e C3S) reagem com a água (H) produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH), ou seja,  $CxS + H \rightarrow C-S-H + CH$ . Dentre os compostos produzidos na hidratação do cimento Portland, apenas o C-S-H contribui expressivamente para a resistência mecânica das matrizes cimentícias, refina os poros reduzindo a permeabilidade e é insolúvel em água com pH acima de 7. O CH contribui com a alcalinidade da matriz, estabilizando a camada passivadora da armadura que dificulta o processo de corrosão. Nesse contexto, desde que o teor de CH não fique inferior a 9,0, o hidróxido de cálcio pode ser convertido em novas moléculas de C-S-H para melhorar as propriedades mecânicas e durabilidade das matrizes. Os materiais pozolânicos cumprem esse papel, ou seja, reagem com o CH, em meio aquoso, formando C-S-H secundário (Pozolana + CH + H  $\rightarrow$  C-S-H) [19].

As adições minerais do tipo inertes/fíler são materiais essencialmente finos e uniformes, cuja ação é puramente física, e não possuem nenhuma atividade química, no sentido da produção de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Essas adições promovem o efeito do empacotamento granulométrico e funcionam como ponto de nucleação para hidratação dos grãos de cimento. Quando presentes em pequena quantidade (normalmente menos que 15% da massa do cimento) proporcionam melhorias sobre as propriedades da argamassa como: trabalhabilidade, massa específica, porosidade, redução da exsudação e a tendência à fissuração [20, 21, 22, 23].

De acordo com diversos autores [24, 25, 26], comumente, as adições minerais inertes promovem três efeitos físicos, essencialmente sobre a hidratação do cimento Portland, que são: a diluição do cimento; a redistribuição granulométrica; e a nucleação heterogênea.

O efeito de diluição está relacionado à substituição parcial do cimento pela adição mineral, diminuindo a quantidade de cimento e consequentemente provocando um aumento da relação água/aglomerante. Quanto maior o teor de substituição, menor será a quantidade de cimento Portland na matriz, acarretando assim menor teor de hidratos gerados ao longo do tempo, caso a adição não apresente atividade cimentante ou pozolânica [24, 25].

O efeito de distribuição granulométrica depende da finura da adição e da quantidade de inerte utilizado, e esta promove alteração na porosidade da mistura [25]. Este efeito ocorre devido ao preenchimento dos microporos pelas partículas inertes, promovendo uma elevação na área de contato entre o cimento e a água, colaborando, então, com a velocidade de hidratação do cimento e com a formação de C-S-H [26].

O empacotamento está relacionado com a correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente, o que influencia no consumo de pasta e em diversas propriedades da argamassa, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Sendo assim, os finos ocupam os vazios entre os grãos de areia, tendendo ao aumento da compactidade do conjunto e, por consequência, podendo colaborar com o ganho de resistência e diminuição de porosidade da matriz [27].

A nucleação heterogênea ganha importância quanto maior for a finura do material inserido. Lawrence; Cyr e Ringot [25] definem a nucleação heterogênea como um processo físico que promove a ativação do cimento Portland. Trata-se, portanto, de um fenômeno catalítico no qual um material reduz a energia de ativação de uma reação química



sem que haja consumo da espécie química, funcionando apenas como uma superfície onde ocorre a hidratação.

Caso a adição auxilie na propriedade aglomerante que forma os materiais cimentícios, diz-se que este material tem atividade pozolânica. De acordo com a NBR 12653:2014 [28], materiais pozolânicos são definidos como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Para formar silicatos estáveis que têm propriedades cimentícias, é essencial que a pozolana esteja finamente subdividida, pois somente assim a sílica pode combinar com o hidróxido de cálcio na presença de água. Também é essencial que a sílica esteja em seu estado amorfo, isto é, vítreo, pois quando em estado cristalino sua reatividade é muito pequena [23].

Inúmeras são as vantagens da incorporação de adições minerais ao concreto, visto que podem melhorar a resistência à fissuração térmica devido à redução no calor de hidratação, sendo capaz de aumentar a estanqueidade da matriz por refinamento dos poros, e assim proporcionar uma maior durabilidade aos agentes químicos, como a expansão álcali-agregado e ataque por sulfato, como fruto da redução da alcalinidade (no caso de adições minerais pozolânicas), além de diminuir o custo e melhorar sua trabalhabilidade no estado fresco [17].

As cinzas são tipos de adições muito utilizadas para substituição parcial do clínquer. Sua composição é muito variada, pois depende desde as características genéticas do vegetal até as condições operacionais da caldeira na qual é realizada a queima. Entretanto, é possível verificar características pozolânicas, o que explica a utilização de resíduos sólidos minerais na construção civil [29].

O uso de cinzas como adição diminui o impacto ambiental e o custo da preparação de materiais cimentícios, pois substitui compostos de maior custo, evitando, ao mesmo tempo, a disposição das cinzas

no ambiente, e tornando o processo de fabricação de materiais cimentícios mais sustentável.

França, *et al.* [30] utilizaram cinza proveniente da queima de cavacos de eucalipto com teores de 10%, 20% e 30% de substituição ao cimento Portland para avaliar a viabilidade desse reaproveitamento por meio da análise das propriedades das argamassas no estado fresco. Os autores concluíram que a cinza de eucalipto possui características físicas adequadas para adição e contribuem para uma maior densidade de empacotamento do sistema que as contêm devido às suas partículas serem menores que as do cimento. Além disso, observou-se também que devido ao fato de as cinzas apresentarem área superficial específica maior que o cimento e, conseqüentemente, demandar maior quantidade de água para o molhamento, argamassas que a contenham apresentam menor trabalhabilidade inicial, fato observado por meio de ensaios na mesa de consistência (*flow table*).

Gluitz e Marafão [31] desenvolveram uma pesquisa para avaliar a cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa e foi avaliado o seu índice de pozolanidade e características físicas e químicas. Para tal, moldaram-se corpos de prova de argamassa com adições de 0, 5, 10, 15 e 20% de cinza de madeira de eucalipto (CME), onde a partir de ensaios realizados concluiu-se que as cinzas promoveram uma queda de resistência das argamassas à medida que se aumentou o teor de substituição do CP pelas CME. Essa queda foi esperada devido ao resultado do ensaio de atividade pozolânica, no qual a cinza não apresentou potencial pozolânico.

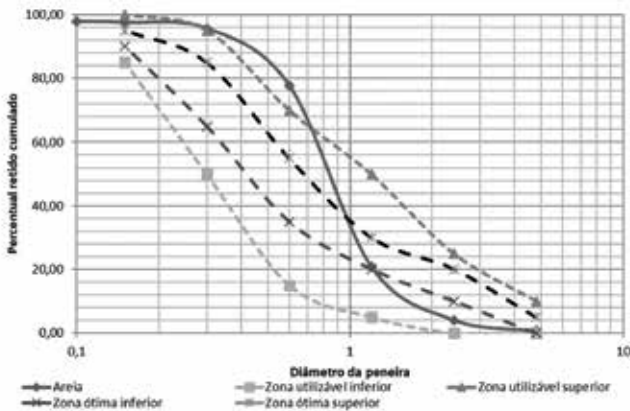
No presente trabalho, foi utilizada como adição mineral a cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto e grevília nas caldeiras da empresa Dass Calçados. Foram realizados ensaios de consistência, resistência mecânica e permeabilidade, a partir de amostras com diferentes percentuais das cinzas residuais de caldeiras (CRC) em substituição parcial do cimento Portland na produção das argamassas, que, além de reduzir o uso do cimento, dará uma nova destinação aos resíduos gerados por outro setor.

## 2. Metodologia

### 2.1 Materiais

Para realização dos ensaios, utilizou-se o CP V – ARI, com massa específica de 3,08 g/ml. Esse cimento foi escolhido por não possuir adições minerais pozolânicas, apresentando, ainda, máximo de 5% de materiais carbonáticos tal qual especifica a NBR 16697:2018 [32] – o menor teor dentre os demais cimentos disponíveis na região de Cruz das Almas. A água utilizada para produção e cura dos corpos de prova foi proveniente do sistema de abastecimento municipal.

Como agregado miúdo foi utilizado areia lavada média, módulo de finura de 2,92 e dimensão máxima característica de 2,4 mm, determinadas conforme procedimentos da NM 248:2003 [33]. A **figura 1** apresenta o gráfico da distribuição granulométrica. Neste gráfico, é possível observar a curva de distribuição dos grãos do agregado miúdo e os limites das zonas utilizável e ótima, estabelecidos pela NBR 7211:2009 [34].



**Fig. 1** – Distribuição granulométrica do agregado miúdo e as zonas delimitadas pela NBR 7211:2009 [34]. Fonte: Os autores.

A cinza foi fornecida pela empresa Dass Calçados, localizada na cidade de Vitória da Conquista, no estado da Bahia. A cinza foi obtida através da queima da lenha de eucalipto e grevilea nas caldeiras da indústria. Após obtenção, as cinzas foram resfriadas ao ar, armazenadas em recipiente vedado e impermeável e

levadas para o laboratório, onde foi seca em estufa a  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  por 24 horas e posteriormente peneirada, empregando peneira de abertura 0,075mm para a obtenção de uma granulometria próxima a do cimento.

O índice de desempenho pozolânico da CRC com cimento Portland aos 28 dias foi determinado em 77% com base nos procedimentos da NBR 5752:2014 [35]. Segundo a NBR 12653:14 [28], materiais com índice de atividade pozolânica (IAP) superior a 90% apresentam potencial pozolânico. Isso significa que o material não apresenta potencial de produzir C-S-H secundário por meio da interação entre os compostos da cinza e os hidróxidos da matriz cimentícia.

### 2.2 Métodos

Foram escolhidos dois traços para o estudo (relação aglomerante: agregado), observando o comportamento da cinza em mistura rica (traço 1:3) e pobre (traço 1:6) em cimento Portland com proporção água/aglomerante (a/agl) fixada em 0,54 e 1,05, respectivamente. A cinza foi utilizada como substituto parcial do cimento Portland nas porcentagens de 5%, 10% e 15%, sendo as formulações utilizadas apresentadas na **tabela 1**. Geralmente, substituições de cimento Portland por teores maiores do que 15% tendem a reduzir as propriedades das matrizes cimentícias, em função do efeito de diluição do cimento. Quando se observa, em pesquisa prévia, que houve crescimento das propriedades avaliadas até 15%, então é justificável avançar a diluição para teores maiores [36]. Entretanto, essa foi a primeira pesquisa com o resíduo. Por isso, optou-se por avaliar a substituição com cimento Portland por teores de até 15% de CRC.

**Tab. 1** – Proporção dos materiais nas argamassas.

Traço	a/agl	Teor de cinzas (%)	Cimento (g)	Cinza (g)	Areia (g)
1:3	0,54	0	624,0	0,0	1872,0
		5	592,8	31,2	1872,0
		10	561,6	62,4	1872,0
		15	530,4	93,6	1872,0
1:6	1,05	0	367,1	0,0	2202,4
		5	348,7	18,4	2202,4
		10	330,4	36,7	2202,4
		15	312,0	55,1	2202,4

Fonte: Os autores.

A moldagem dos corpos de prova seguiu os procedimentos da NBR 7215:2019 [37]. Eles foram mantidos nos moldes durante as primeiras 24 horas, sendo destinados à cura submersa em água saturada com cal por 28 dias. As argamassas produzidas foram analisadas no estado fresco através do ensaio de consistência, regido pela NBR 13276:2016 [38], e no estado endurecido, através dos ensaios de resistência à compressão axial, de acordo com a NBR 7215:2019 [37]; resistência à tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222:2011 [39] e os ensaios referentes à durabilidade da matriz, que foram: o ensaio de absorção de água por imersão e por capilaridade, conforme NBR 9778:2005 [40] e NBR 9779:2012 [41], respectivamente.

Os resultados, com exceção do índice de consistência, seguiram os procedimentos de amostragem da NBR 7215:2019 [37] com posterior análise estatística de variância (ANOVA) com o teor de substituição de cinza como fator de variação. Os valores médios obtidos foram comparados entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

A interpretação estatística se deu através da comparação entre os valores de F e F-crítico fornecidos pela análise de variância, tendo como hipótese a influência significativa da substituição do cimento pela CRC em pelo menos um dos grupos na propriedade analisada. A confirmação da hipótese se dá para valores de F superiores ao F-crítico. O resultado do teste de Tukey é identificado através de letras ao lado dos valores médios nas tabelas de resultados, sendo que grupos com letras iguais não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade.

### 3. Resultados e discussões

#### 3.1 Índice de Consistência

A consistência é uma das propriedades mais relevantes da argamassa no estado fresco. Essa propriedade está ligada à fluidez da mistura e representa a tendência de deformação da argamassa. Quanto maior for o espalhamento da argamassa sobre a mesa do ensaio, menor é a sua resistência

ao escoamento e, portanto, maior é a sua fluidez. Os resultados são apresentados na **tabela 2**.

Pôde-se observar que, com o aumento no teor de substituição do cimento Portland pela CRC, houve um decréscimo progressivo no índice de consistência das argamassas, efeito diretamente ligado ao acréscimo na demanda por água devido à inserção de partículas mais finas que a do cimento com maior superfície específica, formando argamassas menos trabalháveis.

**Tab. 2 – Índice de consistência das argamassas.**

Traço	Teor de cinzas (%)	Índice de consistência (mm)
1:3	0	320
	5	318
	10	295
	15	282
1:6	0	268
	5	262
	10	258
	15	254

Fonte: Os autores.

**Tab. 3 – Resistência à compressão axial.**

Traço	Teor de cinzas (%)	Resistência à compressão (MPa)	Desv. pad. (MPa)	Coef. variação (%)
1:3	0	28,8 <sup>A</sup>	0,6	2,0
	5	28,0 <sup>A</sup>	0,4	1,3
	10	30,6 <sup>AB</sup>	1,4	4,5
	15	33,8 <sup>B</sup>	1,8	5,2
	<b>F</b>	11,836	<b>F-crítico</b>	4,346
1:6	0	8,7 <sup>A</sup>	0,2	2,0
	5	8,2 <sup>AB</sup>	0,5	6,2
	10	8,1 <sup>AB</sup>	0,2	2,9
	15	7,5 <sup>B</sup>	0,4	5,8
	<b>F</b>	5,555	<b>F-crítico</b>	4,066

Fonte: Os autores.

#### 3.2 Resistência à compressão

A **tabela 3** apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão axial das argamassas aos 28 dias, juntamente com os valores de F e F-crítico provenientes da análise de variância. Para o traço 1:3, foi observado que a substituição do cimento Portland por CRC apresentou tendência ao acréscimo da resistência à compressão axial a partir do teor de 10%, sendo registrada uma resistência 17,3% superior que a referência quando empregado 15% de cinzas. Com base nos resultados do teste de Tukey, não houve variação na resistência para 5% de substituição. No traço 1:6, o uso da CRC apresentou tendência à redução da resistência, ainda que não afetasse

significativamente o parâmetro até o teor de 10% de substituição, sendo registrada média 13,8% menor que a referência no teor de 15%.

Observando o comportamento da resistência à compressão das argamassas em função do teor de cinzas, nota-se que, tanto maior o teor de substituição do cimento Portland por CRC em traços mais ricos (1:3), maior é a resistência à compressão. Pode-se explicar esse comportamento apropriando-se das ideias de Castro, Pandolfelli [24], Lawrence, Cyr e Ringot [25]. Segundo esses autores, o efeito de diluição do cimento Portland pode ser compensado no processo de refinamento de poros, que provoca maior densificação da matriz, reforçando o esqueleto granulométrico e aumentando a resistência à compressão. A absorção de água também colabora com essa interpretação. O efeito de diluição do cimento Portland tende a diminuir a quantidade de C-S-H produzido pela hidratação, consequentemente, maior a porosidade da matriz e maior a absorção de água. Todavia, os resultados indicaram que tanto maior o teor de substituição do cimento Portland, menor é o índice de absorção de água. Desta forma, pode-se inferir que o resíduo está colmatando os poros, ou seja, aumentando o preenchimento dos vazios aos quais foram preenchidos por água em matrizes com menores teores de CRC [42].

Gluitz e Marafão [31] observaram redução na resistência à compressão à medida que foi aumentado o teor de substituição do cimento Portland pelo resíduo. Já os resultados desta pesquisa apontaram para aumento da resistência à compressão com o aumento do teor de substituição. Apesar de os dois resíduos não apresentarem índice de atividade pozolânica, a diferença de comportamento provavelmente está associada as diferenças no formato, tamanho e distribuição das partículas entre a cinza da madeira e da CRC. Os efeitos do empacotamento de partículas resultando em aumento da resistência à compressão foram observados por Karadumpa e Pancharathi (2021) [42].

Para o traço 1:6, houve manutenção da resistência à compressão axial para teores de substituição de até 10%. Por ser uma argamassa com menor teor de cimento, a diluição do aglomerante pode não

estar sendo compensada quando ultrapassado este limite, visto que passam a existir mais vazios a serem preenchidos pelas partículas da cinza. Além disso, a menor quantidade de cimento resulta em uma menor produção de hidróxido de cálcio, fundamental para a ativação do potencial pozolânico da CRC.

**Tab. 4** – Resistência à tração por compressão diametral.

Traço	Teor de cinzas (%)	Resistência à tração (MPa)	Desv. pad. (MPa)	Coef. variação (%)
1:3	0	2,7 <sup>A</sup>	0,1	2,2
	5	2,7 <sup>A</sup>	0,2	5,7
	10	3,0 <sup>B</sup>	0,04	1,3
	15	3,3 <sup>B</sup>	0,2	5,3
	<b>F</b>	17,682	<b>F-crítico</b>	3,862
1:6	0	0,9 <sup>A</sup>	0,0	0,0
	5	0,9 <sup>A</sup>	0,1	6,7
	10	1,0 <sup>B</sup>	0,1	5,6
	15	1,0 <sup>B</sup>	0,1	6,0
	<b>F</b>	7,615	<b>F-crítico</b>	3,862

Fonte: Os autores.

### 3.3 Resistência à tração na compressão diametral

Os resultados expostos na **tabela 4** demonstram que, em ambos os traços, a substituição do cimento por CRC promoveu variações significativas na resistência à tração das argamassas, sendo que, em ambos os traços, o uso de CRC em até 5% não afetou o parâmetro, enquanto valores maiores levaram a acréscimos de resistência. A substituição do cimento Portland por 5% de CRC dilui o cimento reduzindo o teor de C-S-H produzido devido à hidratação do cimento Portland; entretanto, esse efeito de diluição está sendo compensado pela CRC por meio do aumento da densidade granular. Para o teor de 15% de substituição foi registrado acréscimo de 22,2% no traço 1:3 e 11,1% no traço 1:6. Vaske [43] concluiu que as cinzas de eucaliptos apresentaram elevada quantidade de picos no difratograma de raios-x, evidência típica de fases cristalinas, o que, segundo o autor, indicaria uma baixa reatividade do material. Deste modo, ressalta-se a provável influência pozolânica das cinzas da grevêlea. Na conclusão do estudo, Vaske [43] indicou a viabilidade das cinzas de Eucalipto como material filer.



**Tab. 5** – Coeficiente de absorção de água por imersão.

Traço	Teor de cinzas (%)	Coef. de absorção de água (%)	Desv. pad. (MPa)	Coef. variação (%)
1:3	0	9,12 <sup>A</sup>	0,22	2,38
	5	9,03 <sup>A</sup>	0,17	1,87
	10	8,18 <sup>B</sup>	0,12	1,47
	15	7,96 <sup>B</sup>	0,09	1,19
	<b>F</b>	70,367	<b>F-crítico</b>	3,238
1:6	0	11,18 <sup>A</sup>	2,1	1,44
	5	10,48 <sup>A</sup>	3,6	3,23
	10	9,64 <sup>B</sup>	2,2	1,62
	15	9,46 <sup>B</sup>	1,6	0,99
	<b>F</b>	72,727	<b>F-crítico</b>	3,238

Fonte: Os autores.

### 3.4 Absorção de água por imersão

A **tabela 5** apresenta os coeficientes de absorção de água por imersão obtidos. No traço 1:3, as argamassas apresentaram redução significativa nos coeficientes de absorção a partir do teor de 10%, sendo registrados valores 10,3% e 12,7% menores para os teores de 10% e 15% de substituição, respectivamente. Comportamento análogo foi observado no traço 1:6 onde a redução foi de 13,8% e 15,4% nos teores de 10% e 15%, respectivamente.

Tais resultados apontam para uma redução da porosidade aberta da matriz, provavelmente em função do melhor empacotamento dos grãos e refinamento dos poros. Fenômenos similares foram observados por Londero, Klein e Mazer [27, 42] ao estudar o efeito do empacotamento de partículas nas propriedades do concreto.

### 3.5 Absorção de água por capilaridade

Conforme exposto na **tabela 6**, a substituição do cimento por CRC resultou em variações significativas do coeficiente de absorção por capilaridade em todos os níveis de substituição observados em ambos os traços. Para o traço 1:3, houve redução de 42,8%, 44,7% e 56,5% para os teores de 5%, 10% e 15% de substituição. Para o traço 1:6 a redução observada foi de 39,4%, 46,3% e 58,1% para os teores de 5%, 10% e 15% de CRC, respectivamente. Com base no teste de Tukey, observa-se que não há variação significativa entre os teores de 5% e 10% de substituição, ainda que ambos sejam significativamente diferentes

da referência com redução maior que 40% do coeficiente de absorção.

Desta forma, observa-se que, ao aumentar o teor de cinza na matriz cimentícia, ocorreu uma redução na absorção de água por capilaridade. Provavelmente a redução dos capilares se deu pelo tamponamento de poros por meio da produção de novas substâncias aglomerantes e devido à influência dos grãos da cinza na distribuição granulométrica, densificando a matriz e reduzindo sua porosidade aberta.

**Tab. 6** – Coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Traço	Teor de cinzas (%)	Coef. de absorção por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )	Desv. pad. (MPa)	Coef. variação (%)
1:3	0	1,61 <sup>A</sup>	0,22	2,38
	5	0,92 <sup>B</sup>	0,17	1,87
	10	0,89 <sup>B</sup>	0,12	1,47
	15	0,70 <sup>C</sup>	0,09	1,19
	<b>F</b>	93,998	<b>F-crítico</b>	3,238
1:6	0	2,03 <sup>A</sup>	0,10	4,99
	5	1,23 <sup>B</sup>	0,09	7,63
	10	1,09 <sup>B</sup>	0,10	8,85
	15	0,85 <sup>C</sup>	0,02	2,86
	<b>F</b>	139,264	<b>F-crítico</b>	3,862

Fonte: Os autores.

## 4. Conclusões

Com base nos resultados observados, pode-se afirmar que a substituição de cimento Portland por CRC influenciou significativamente as propriedades analisadas e melhorou progressivamente as propriedades observadas das argamassas com o acréscimo dos teores de cinza empregados, sendo alguns comportamentos mais evidentes no traço 1:3, mais rico em aglomerante. Além disso, pode-se afirmar que:

- A CRC estudada não pode ser classificada como uma pozolana natural e, como tal, a influência nas propriedades resulta de sua influência física na densificação da matriz.
- A substituição do cimento Portland por até 15% de CRC aumentou a resistência à compressão axial em até 17,3% no traço 1:3.
- O emprego da CRC favoreceu a resistência à tração das argamassas, produzindo acréscimos de 22,2% no traço 1:3 e 11,1% no traço 1:6 quando empregado 15% de substituição.

- Em ambos os traços estudados, o uso da CRC tornou as argamassas progressivamente menos permeáveis, atingindo reduções de mais de 50% na absorção de

água por capilaridade ao teor de 15% de substituição, o que sinaliza um potencial do seu uso para melhoria da durabilidade das matrizes cimentícias.

## Referências

- [1] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Características da Indústria Cimenteira**. Press Kit Agosto 2013.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Vendas de cimento**. 2021. Disponível em: <https://abcp.org.br/vendas-de-cimento-crescem-11-em-2020/>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- [3] STATISTA. **Cement production worldwide from 1995 to 2020**. 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- [4] ABRÃO, P. C. R. A.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact. **Construction and Building Materials**, v. 247, 2020.
- [5] CARVALHO, S. Z. et al. Reducing environmental impacts: The use of basic oxygen furnace slag in portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 385–390, 2018.
- [6] IGE, O. E. et al. A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 324, n. September, p. 129213, 2021.
- [7] CETESB. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa associadas aos Processos Industriais: Produtos Minerais, Produção de Cimento do Estado de São Paulo, 1990 a 2008. **1º Relatório de Referência**. São Paulo, out. 2010.
- [8] MELO, F. C. A. C. **Análise de argamassas com substituição parcial do Cimento Portland por cinza residual de lenha de Algaroba** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- [9] PIRES, Dannúbia Ribeiro. **Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas de Algaroba Geradas do APL (Arranjo Produtivo Local) de Confeções Pernambucano**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal e Pernambuco, Caruaru, 2016.
- [10] FORMAGINI, Sidiclei et al. Propriedades físicas de concretos com substituição do cimento. **Revista de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 1, n. 46, p.31-37, maio 2013.
- [11] CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R., Cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar: material pozolânico de alto potencial para países tropicais. **RIEM-Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 1, 2009.
- [12] SILVA, R. B., Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 15, n. 4, p.321-334, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000400053>.
- [13] GUIMARÃES, C. C.; MATOS, S. R. C., Utilização da cinza da casca do coco verde como substituição parcial do cimento Portland em argamassas. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1.
- [14] CHOWDHURY, S. et al. Comparison of Mechanical Properties of Mortar Containing Industrial Byproduct. **Apctee Procedia**, [s.l.], v. 9, p.317-322, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apctee.2014.01.056>.
- [15] NAYAKA, R. R. et al. Microstructural investigation and durability performance of high volume industrial by-products-based masonry mortars. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 189, p.906-923, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.020>.
- [16] SOUZA, G. T.; GOUVEIA, F. P.; CUNHA, R. Estudo da aplicação do resíduo da produção de silício metálico como adição mineral na produção do cimento AÇAÍ. **Revista de Engenharia Civil**, Braga, v. 1, n. 55, p.29-35, jul. 2018.
- [17] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11172: Aglomerantes de Origem Mineral- Terminologia**. Rio de Janeiro, 1990.
- [19] CHU, D. C. et al. Determination of the degree of hydration of Portland cement using three different approaches: Scanning electron microscopy (SEM-BSE) and Thermogravimetric analysis (TGA). **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00754, 2021

- [20] FARINHA, C. B.; BRITO, J.; VEIGA, R. Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de resíduos de louça sanitária: efeito de filler e potencial efeito pozolânico. **Revista de Engenharia Civil**, [s. L.], v. 1, n. 53, p.57-69, dez. 2016.
- [21] DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. v.1. São Paulo, SP: IBRACON, 2005. Cap. 12, p. 345 – 379.
- [22] NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**, 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.
- [23] OLIVEIRA, Ivone R. de et al. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.
- [24] CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Carlos, n. 55, p.18-32, 2009.
- [25] LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement And Concrete Research**, France, n. 33, p.1939-1947, 2003.
- [26] BONAVETTI, V. L.; RAHHAL, V. F. Interacción de Adiciones Minerales en Pastas de Cemento. **Revista de La Construcción**, Olavarría, v. 5, n. 2, p.33-41, 2006.
- [27] LONDERO, C.; KLEIN, N. S.; MAZER, W. Study of low-cement concrete mix-design through particle packing techniques. **Journal of Building Engineering**, v. 42, n. April, p. 103071, 2021.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
- [29] FOELKEL, Celso. **Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto: Resíduos Minerais**. Eucalyptus Online Book. São Paulo, v. 25, n. 5, out. 2011.
- [30] FRANÇA, D. F. S. et al. Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p. 153-166.
- [31] GLUITZ, A. C.; MARAFÃO, D. **Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
- [33] \_\_\_\_\_. **NM 248: Agregados- Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- [34] \_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
- [35] \_\_\_\_\_. **NBR 5752: Materiais Pozolânicos- Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.
- [36] COELHO, V. A. et al. Evaluation of mortar properties obtained through partial substitution of Portland cement by ashes of oil palm empty fruit bunch. **Cerâmica**. 2019, v. 65, n. 375, pp. 359-365. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752575>.
- [37] \_\_\_\_\_. **NBR 7215: Cimento Portland Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 2019.
- [38] \_\_\_\_\_. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.
- [39] \_\_\_\_\_. **NBR 7222: Concreto e argamassa- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- [40] \_\_\_\_\_. **NBR 9778: Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Imersão – Índice de Vazios e Massa Específica**. Rio de Janeiro, 2005.
- [41] \_\_\_\_\_. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.
- [42] KARADUMPA, C. S.; PANCHARATHI, R. K. Influence of gradation of aggregates using particle packing methods on strength and microstructure of blended cement mortars. **Materials Today: Proceedings**, 2021.
- [43] VASKE, N.R. **Estudo preliminar da viabilidade de aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiclone pela combustão de lenha de Eucalipto em Caldeira fumotubular como adição ao concreto**. 321 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

# Criação de trajetórias de navios autônomos, em ambiente de simulação virtual, baseada no histórico de dados AIS

Antônio L. C. Doneda<sup>a</sup>, Ricardo S. Bastos<sup>a</sup>, Julio Cesar Duarte<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Centro de Análise de Sistemas Navais

Ed. 23 do AMRJ - R. da Ponte, s/n, 20.091-000, Centro,  
Rio de Janeiro - RJ – Brasil

<sup>b</sup>Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia da Computação – SE/9

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha,  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

**RESUMO:** Simulações virtuais têm crescido muito em importância para treinamento de recursos humanos, mas é importante que representem a realidade com um grau satisfatório de fidelidade. Neste trabalho, aplicamos o método de clusterização DBSCAN modificado, em conjunto com pré e pós-processamentos de dados, para obter derrotas representativas do comportamento comum de navios em uma zona portuária, a partir de mensagens AIS, para utilizá-las no controle de NPC em uma simulação de treinamento de navegação da Marinha do Brasil. O algoritmo mostrou-se efetivo, gerando 19 diferentes trajetórias representativas de 5 tipos de navios selecionados, a partir de 76.179 mensagens AIS coletadas durante 48 horas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulações Virtuais. Clusterização. DBSCAN. AIS. Trajetórias.

**ABSTRACT:** Virtual simulations have been growing in importance for manpower training, but it is important to portray reality with a satisfactory degree of fidelity. In this work, we applied a modified DBSCAN clusterization method, along with pre and post data processing, to obtain routes representative of ship's common behavior in a port zone from AIS messages, in order to use them to control non-playable characters in a Brazilian Navy's navigation training simulation. The algorithm was effective to generate 19 different routes depicting 5 selected types of ships, from 76.179 AIS messages collected for 48 hours.

**KEYWORDS:** Virtual Simulations. Clusterization. DBSCAN. AIS. Routes.

## 1. Introdução

O uso de simuladores para recriar experiências de ambientes reais auxilia o treinamento e reduz custos operacionais. Seu uso na Marinha do Brasil permite recriar as condições de navegação e manobra de um navio, bem como suas interações com o tráfego marítimo, promovendo uma redução de custos operacionais. Além disso, há uma preservação maior dos meios aliada a uma ampla gama de procedimentos que podem ser treinados, beneficiando o aprestamento da Força Naval, com grande redução de custos, de riscos e de desgaste dos equipamentos.

A Marinha do Brasil, no seu Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV), desenvolveu um Simulador de Passadiço para atender às demandas de

treinamento de navegação do seu pessoal [1]. Neste simulador, o tráfego marítimo que interage com o usuário é controlado pelo instrutor, que deve definir trajetórias a serem seguidas pelos navios autônomos (NPC - “non-playable character” - personagem não-jogável). Cada NPC pode ser associado a uma trajetória predeterminada. Esta solução é interessante apenas para uma simulação específica. Para simular um navio entrando e saindo de um porto, o ideal é que o tráfego marítimo do ambiente simulado seja o mais parecido possível com a realidade.

Dessa forma, verifica-se certos padrões nas trajetórias de determinados navios (cargueiros, rebocadores, *offshores*, passageiros etc.). A criação manual das trajetórias para os exercícios exige do instrutor conhecimento acerca das vias navegáveis comuns de uma zona portuária (ZP) e de qual categoria



de navios as utilizam. Caso o instrutor não detenha este conhecimento, pode ser que crie exercícios que não condizem com a realidade neste aspecto.

Uma ferramenta que possa auxiliar na geração de trajetórias de determinados tipos de navios permite ao instrutor, por meio de comandos básicos, povoar o ambiente de simulação com NPCs que retratem as trajetórias encontradas no dia a dia o mais fidedignamente possível. Sendo assim, o instrutor pode focar nos procedimentos realizados pelo usuário, sem se preocupar em construir uma trajetória para cada NPC.

Este artigo tem como objetivo propor a utilização de uma técnica de Aprendizado de Máquina Não Supervisionada, o DBSCANSD (Clusterização Espacial Baseada em Densidade de Aplicações com Ruído considerando Velocidade e Direção) [2], para gerar trajetórias representativas da movimentação comum dos navios baseadas em um histórico de navegação de um determinado porto. Essas trajetórias seriam armazenadas no sistema de simulação e o instrutor apenas determinaria o tipo de navio, deixando por conta do sistema a determinação de uma trajetória.

Assim, seria possível simular o tráfego marítimo em qualquer porto do Brasil ou do exterior, bastando apenas realizar a coleta dos dados históricos de navegação, ampliando, portanto, o nível de adestramento dos usuários do simulador. Além disso, é de suma importância que as trajetórias geradas tenham as características das trajetórias observadas, a fim de gerar um maior realismo.

A seção 2 deste artigo descreve trabalhos relacionados de predição de trajetórias. Já a seção 3 apresenta como foram obtidos e tratados os dados históricos de movimentações de navios na Baía de Guanabara. Na seção 4, é descrita a utilização do método DBSCANSD para predição de trajetórias. A seção 5 fornece os resultados obtidos pela proposta apresentada, e por fim, na seção 6 foram expostas as considerações finais e conclusões.

## 2. Trabalhos relacionados

Há exemplos de trabalhos para predição de trajetórias de navios com diversas finalidades.

Todos têm como premissa a busca por predizer possíveis posições futuras com base em trajetórias passadas obtidas por equipamentos AIS (*Automatic Identification System* - Sistema de Identificação Automático). Tais equipamentos fornecem, dentre outras informações, as posições em latitude e longitude de uma embarcação. Os dados históricos podem ser divididos em grupos (*clusters*), de forma a extrair e classificar as trajetórias em um modelo que possa representá-las.

Perera *et al.* [3] implementaram um algoritmo que utiliza Redes Neurais Artificiais (ANN) e Filtro de Kalman estendido para a predição de trajetórias, focando principalmente na detecção e acompanhamento de navios.

Vries e Someren [4] definiram um método de Aprendizado de Máquina baseado em kernel para agrupar e classificar tráfego marítimo e detectar anomalias de comportamento. Inicialmente, os dados AIS são comprimidos em trajetórias lineares utilizando operações geométricas. Em seguida, comparam-se as similaridades das trajetórias agrupando-as com *kernel k-means* e classificando-as com *Support Vector Machines* (SVMs).

Duca *et al.* [5] utilizaram um algoritmo baseado em um classificador *K-Nearest Neighbor* (K-NN) para predizer a posição de um navio após 30, 45 e 60 minutos. Esse algoritmo recebe os dados correntes do navio como entrada e retorna uma matriz de probabilidades para uma posição futura em uma grade pré-estabelecida. Este trabalho atingiu uma precisão de 79.4%, abrangência de 78.5% e acurácia de 93.1%.

Pallotta *et al.* [6] utilizaram o algoritmo *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN), primeiramente proposto por Ester *et al.* [7], para agrupar pontos de posição baseados nos atributos dos dados AIS. Dado o estado corrente do navio, uma região circular é inserida em torno de sua posição. Todas as rotas que passam por esse círculo são consideradas compatíveis com o navio. Uma vez que as posições são agrupadas, predições de trajetórias podem ser feitas baseadas nesse histórico.

O trabalho de Liu *et al.* [2] é fruto de uma abordagem da técnica DBSCAN em conjunto com

a utilização dos atributos não espaciais como a Velocidade e Direção dos navios, a fim de promover uma comparação das trajetórias mais utilizadas com as previstas nas regras e regulamentos de cada porto.

Fica evidente a preocupação desses trabalhos em prever onde o navio estará com a finalidade de acompanhamento dos meios navais, de detecção de anomalias e de busca e salvamento.

Diferentemente de [2], o presente trabalho utiliza pré e pós-processamento dos dados, a partir das características da ZP e dos tipos de navios que compõem seu tráfego marítimo, com a finalidade de obter trajetórias realistas para serem inseridas em um ambiente de simulação e treinamento.

### 3. Base de dados utilizada

Os dados utilizados pelo algoritmo são as informações dinâmicas e estáticas emitidas pelos navios por meio do equipamento AIS. Este equipamento é um transponder que transmite, em frequência VHF, uma série de informações, tais como: latitude, longitude, velocidade, direção, registro, nome e data-hora de coleta destas informações.

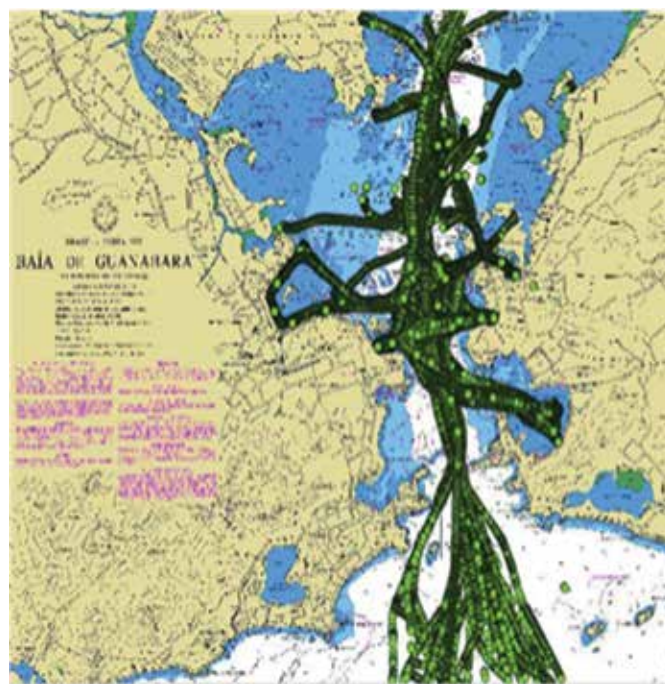
O trabalho aborda a região da Baía de Guanabara, no Estado do Rio de Janeiro, que abriga o porto do Rio de Janeiro, terminais de óleo e gás, e estações de barcas de passageiros que perfazem o trajeto Rio de Janeiro x Niterói. Delimitou-se uma área de interesse para a aquisição das informações limitada pelos pontos  $22^{\circ}45.0'S$  e  $043^{\circ}14.0'W$ ,  $22^{\circ}45.0'S$  e  $043^{\circ}05.0'W$ ,  $23^{\circ}0.0'S$  e  $043^{\circ}14.0'W$ ,  $23^{\circ}0.0'S$  e  $043^{\circ}05.0'W$ , equivalente à carta náutica 1501, produzida pelo Centro de Hidrografia da Marinha.

Em seguida, foram obtidos os dados AIS de todos os navios naquela área, referentes ao período de 14 a 16 de agosto de 2019, totalizando 111.015 mensagens AIS. Posições em que o navio estava com uma velocidade abaixo de 0,5 nós foram retiradas, a fim de se utilizar apenas os navios em real movimento, permanecendo, após a remoção, um total de 76.179 mensagens.

Esses dados foram processados a partir das mensagens originais em formato NMEA-183, extraindo-se as seguintes informações de interesse:

identificação do navio (MMSI), latitude, longitude, velocidade, direção (rumo) e data-hora.

A **figura 1** apresenta os dados obtidos na região da Baía de Guanabara, plotados na carta náutica 1501.



**Fig. 1** – Posições de todos os navios.

### 4. Utilizando o DBSCANSD para a predição de trajetórias

DBSCAN é a abreviação do termo ‘*Density Based Spatial Clustering of Application with Noise*’ (Clusterização Espacial Baseada em Densidade de Aplicações com Ruído) e consiste em um método de clusterização não paramétrico baseado em densidade [7]. Este método é efetivo para identificar *clusters* de formato arbitrário e de diferentes tamanhos, identificar e separar os ruídos dos dados e detectar *clusters* “naturais” e seus arranjos dentro do espaço de dados, sem qualquer informação preliminar sobre os grupos.

A noção de *clusters* e o algoritmo DBSCAN se aplicam para espaços Euclidianos de duas e três dimensões, como para qualquer espaço característico de alta dimensão [7]. A ideia do método DBSCAN é que, para cada ponto de um *cluster*, a vizinhança

para um dado raio contém, no mínimo, certo número de pontos.

## 4.1 Definições

$\epsilon$ -vizinhança de um ponto  $p$  ( $N_\epsilon(p)$ ): A vizinhança de um objeto  $p$  com raio  $\epsilon$  é dada por  $N_\epsilon(p) = \{q \text{ em } \mathbf{D} \mid \text{dist}(p, q) < \epsilon\}$ . Na **figura 2**, os círculos representam, respectivamente, a  $\epsilon$ -vizinhança do ponto  $q$  e  $\epsilon$ -vizinhança do ponto  $p$  [8].

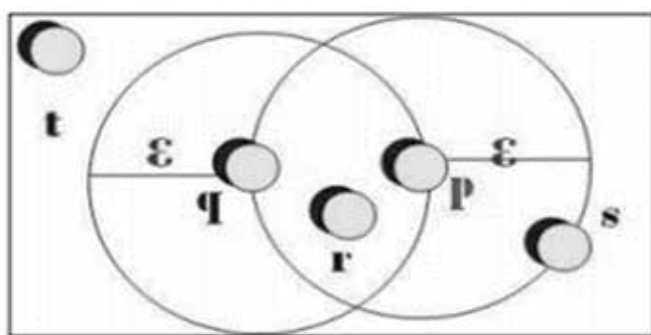
**Ponto Central:** Se a  $\epsilon$ -vizinhança de um objeto  $p$  contém ao menos um número mínimo ( $MinPts$ ) de objetos, então o objeto  $p$  é chamado de ponto central.

**Pontos de borda:** Se a  $\epsilon$ -vizinhança de um objeto  $p$  contém menos que  $MinPts$ , mas contém algum ponto central, então o objeto  $p$  é chamado de ponto de borda.

**Alcance Direto por Densidade:** Um objeto  $p$  é alcançável por densidade diretamente do objeto  $q$ , com respeito aos valores  $\epsilon$  e  $MinPts$ , se  $p$  está na  $\epsilon$ -vizinhança de  $q$  e  $q$  é um ponto central.

**Conexão por densidade:** Um objeto  $p$  é conectado por densidade ao objeto  $q$  com respeito à  $\epsilon$  e  $MinPts$  em um conjunto de objetos  $\mathbf{D}$ , se existe um objeto  $o$  em  $\mathbf{D}$ , tal que ambos,  $p$  e  $q$ , são alcançáveis por densidade do objeto  $o$  com respeito à  $\epsilon$  e  $MinPts$ .

**Cluster DBSCAN:** É o conjunto de pontos conectados por densidade.



**Fig. 2** –  $\epsilon$ -vizinhança de um ponto  $p$ . **Fonte:** [8].

## 4.2 Método

Ainda segundo Cassiano [8], o método DBSCAN encontra *clusters* verificando a vizinhança de cada ponto na base de dados, começando por um objeto arbitrário  $p$ . Se  $p$  é um ponto central, um novo cluster

com  $p$  como um centro é criado. Se  $p$  é um ponto de fronteira, nenhum ponto é alcançável por densidade a partir de  $p$  e o algoritmo visita o próximo ponto na base. O método DBSCAN, então, iterativamente coleta objetos alcançáveis por densidade diretamente de pontos centrais, que podem envolver a união de alguns *clusters* alcançáveis por densidade. O processo termina quando nenhum novo ponto pode ser adicionado a qualquer *cluster*.

Para o algoritmo DBSCAN, quaisquer dois pontos centrais com distância menor ou igual a  $\epsilon$  são colocados no mesmo *cluster*. Qualquer ponto de borda que está perto de um ponto central é colocado no mesmo *cluster* do ponto central. Pontos que não são diretamente atingíveis por algum ponto central são classificados como ruído.

Liu *et al.* [2], além da ideia básica do DBSCAN, adotaram dois fatores, a variação máxima de velocidade (*MaxSpd*) e a variação máxima de direção (*MaxDir*). O intuito foi abranger não só os vizinhos por proximidade, mas também por similaridade de direção (*Course Over Ground*, COG) e de velocidade (*Speed Over Ground*, SOG), criando, portanto, o DBSCAND.

Com isso, modificaram a definição de  $\epsilon$ -vizinhança para: A vizinhança de um objeto  $p$  com raio  $\epsilon$  é dada por  $N_\epsilon(p) = \{q \in \mathbf{D} \mid \text{dist}(p, q) < \epsilon, |p.\text{SOG} - q.\text{SOG}| < \text{MaxSpd} \text{ e } |p.\text{COG} - q.\text{COG}| < \text{MaxDir}\}$ . Considera-se  $\text{dist}(p, q)$  como a distância geográfica entre  $p$  e  $q$ , considerando estarem em um círculo máximo de raio aproximado ao do planeta Terra.

Após a aplicação do DBSCAND aos dados coletados, posições geográficas próximas com velocidade e rumo similares são agrupadas em um *cluster*. Então, formatos arbitrários de *clusters* podem ser formados, bem como os *clusters* podem ser subdivididos em função das velocidades e rumos.

Aplicou-se também um Vetor de Gravidade (*Gravity Vector*, GV), particionando um *cluster* em múltiplas partes. Com isso, cada *cluster* pode ter múltiplos GVs. O GV é um vetor formado por: COG médio, SOG médio, latitude média, longitude média e distância média [2].

A escolha, portanto, deste método levou em consideração sua robustez, a apresentação de melhores

resultados e processamento mais rápido que alguns outros algoritmos de clusterização, tal como o método *k-means*.

No entanto, a aplicação isolada do método não se mostrou suficiente para obter as trajetórias representativas de uma zona portuária, produzindo também trajetórias incomuns ou impraticáveis. Foi essencial o desenvolvimento e emprego de pós-processamentos, a fim de otimizar o resultado final, eliminando trajetórias infactíveis e otimizando as trajetórias obtidas.

## 5. Aplicação e resultados obtidos

O algoritmo requer 5 parâmetros como entrada: *DatasetM* (número de pontos de uma trajetória), *Épsilon* ( $\epsilon$ -vizinhança), *MinPts*, *MaxDir* (máxima variação de direção) e *MaxSpd* (máxima variação de velocidade). A complexidade desse algoritmo é  $O(n^2)$ , onde  $n$  é o tamanho de *DatasetM* [2].

Os valores dos parâmetros dependerão das características das vias navegáveis encontradas em cada ZP [2]. De fato, foi observado que a ZP do Rio de Janeiro tem algumas particularidades capazes de influenciar o resultado, como, por exemplo, a existência de um canal principal orientado no sentido norte – sul, em que praticamente todos os tipos de navio trafegam em algum momento de sua demanda, ao mesmo tempo em que há várias vias transversais utilizadas em maior ou menor escala por navios de diferentes tipos e finalidades.

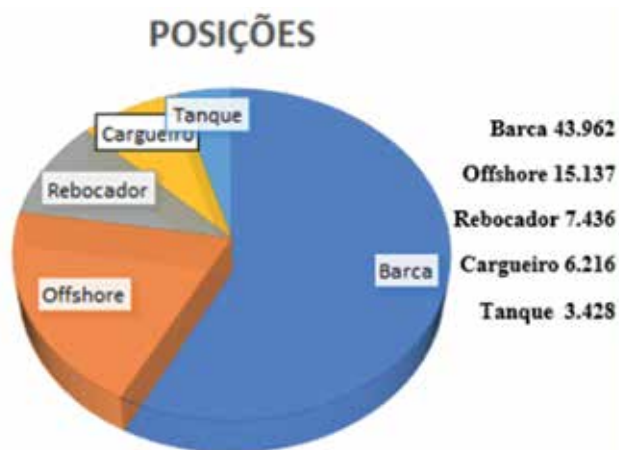
Em virtude do baixo tempo médio de processamento do algoritmo, foi possível efetuar diversas tentativas, a fim de determinar a melhor combinação desses parâmetros. A partir da experimentação, foi observado que, além das características inerentes à conformação das vias navegáveis da ZP, a melhor combinação dos valores desses parâmetros é também dependente do comportamento típico dos navios-alvo, quanto à sua variabilidade de rumos assumidos, vias mais comuns de navegação, velocidades assumidas e dispersão na área geográfica abrangida.

À vista dos resultados obtidos, atentou-se para a possibilidade de se aprimorar a discriminação das

trajetórias comuns a partir da aplicação de filtro prévio nos dados de entrada quanto ao tipo de navio para aplicação isolada do algoritmo a cada um desses tipos. Esta escolha justifica-se pelo fato de que navios de uma mesma categoria tendem a ter origens, destinos e vias de circulação similares, enquadrando-se em uma faixa similar de rumos assumidos, além de geralmente observarem uma mesma faixa de velocidades.

Resolveu-se, portanto, gerar modelos para cada uma das cinco categorias de navios definidas, possibilitando ao algoritmo explorá-las separadamente: Barca (passageiros), Cargueiro (contêiner e graneleiro), *Offshore* (navio de apoio a plataformas), Navio-Tanque (óleo e gás), e Rebocador.

A **figura 3** mostra a quantidade de mensagens AIS por tipo de navio. Observa-se uma grande quantidade de mensagens de barcas, que realizam o transporte de passageiros, pois as barcas possuem intervalos regulares e constantes entre as viagens. Em seguida, há um número considerável de mensagens de navios *Offshore*, por conta da proximidade do porto do Rio de Janeiro com a Bacia Petrolífera de Campos.



**Fig. 3** – Divisão dos dados de entrada nas cinco categorias de navios.

A **tabela 1** demonstra a combinação de parâmetros adotada para cada categoria processada. A seleção dos parâmetros iniciou-se pelo arbitramento de um valor de *Épsilon*, baseado no valor aproximado da



largura das vias navegáveis consideradas. Reparou-se que, no caso específico das Barcas, foi necessário reduzir este raio, posto que o cruzamento de diversas trajetórias favorecia a massificação de trajetórias diferentes em um mesmo *cluster*. Nesta Zona Portuária escolhida, há grandes variações de rumo nas trajetórias típicas dos navios que entram ou saem dos diversos terminais portuários. A escolha de valores baixos de *MaxDir* ocasionaria a partição de uma mesma trajetória em diversos *clusters*, razão pela qual optou-se por um valor alto deste parâmetro, que foi repetido em todos os tipos de navios. Os valores possíveis de *MaxSpd* foram limitados a uma faixa de valores factíveis para cada tipo de navio escolhido e definidos experimentalmente em combinação com valores de *MinPts*, chegando-se às combinações de parâmetros apresentadas na **tabela 1**.

**Tab. 1** - Seleção de Parâmetros.

Categoria	DatasetM (mensagens)	Épsilon (Milhas Náuticas)	MinPts (posições)	MaxDir (graus)	MaxSpd (nós)
Barca	43.962	0.001	2	20.0°	15.0
Cargueiro	6.216	0.003	6	20.0°	15.0
Offshore	15.137	0.003	6	20.0°	8.0
Rebocador	7.436	0.003	4	20.0°	10.0
Navio-Tanque	3.428	0.003	6	20.0°	15.0

## 5.1 Pós-processamento dos resultados

A abordagem de processamento por categorias melhorou a discriminação das trajetórias mais comuns, havendo, no entanto, algumas discrepâncias que poderiam ainda ser resolvidas, a fim de otimizar os resultados.

Observou-se, inicialmente, a geração de *clusters* com poucas posições. As trajetórias com apenas uma posição foram automaticamente excluídas. Naquelas compostas por duas a quatro posições, foi estabelecido o critério da distância percorrida pela trajetória, eliminando automaticamente as que percorriam menos de 100 jardas por posição. A **tabela 2** especifica as trajetórias processadas.

**Tab. 2** - Trajetórias geradas, eliminadas e mantidas.

Categoria	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Barca	76	36	28	1	4
Cargueiro	23	2	4	0	3
Offshore	56	21	8	4	4
Rebocador	29	8	10	2	5
Navio-Tanque	30	3	7	0	3

**Nota:** (A) – Total de trajetórias geradas; (B) – trajetórias com apenas uma posição; (C) – trajetórias com menos de quatro posições; (D) – trajetórias sobre terra; (E) – Trajetórias mantidas.

Outro problema observado foi a ocorrência de trajetórias passando sobre pontos de terra ou áreas não-navegáveis. A fim de detectar automaticamente estas ocorrências, e eliminá-las previamente, foi criada uma imagem da carta náutica, conforme mostra a **figura 4**, em que as áreas de terra e não-navegáveis foram coloridas em vermelho no padrão **RGB** = {255, 0, 0}. As latitudes e longitudes dos pontos das trajetórias foram, então, mapeados para corresponder às posições dos *pixels* da imagem gerada. Para cada ponto de uma trajetória checa-se o *pixel* equivalente e, caso o valor de **R** seja igual a 255, aquela trajetória inteira é desprezada.

Para aplicação no Simulador de Passadiço desenvolvido pelo CASNAV, não é interessante que se tenham pontos muito próximos representando uma trajetória, uma vez que os NPC são programados para sempre buscar o próximo ponto da trajetória, e ao alcançar este, corrigir o rumo e a velocidade para buscar o que se segue. Trajetórias com pontos muito próximos causariam comportamentos erráticos nos NPC, diminuindo a fidelidade do seu comportamento à realidade.

A fim de solucionar este problema, otimizando a trajetória pela diminuição de pontos colineares ou com pouco afastamento do trajeto, foi aplicado o algoritmo de Douglas-Peucker [9].

Este algoritmo percorre os pontos componentes de uma trajetória, avaliando-os três a três, e eliminando os pontos intermediários que estão dentro de um valor pré-determinado de afastamento do segmento de reta formado pelos pontos extremos.

Ao aplicar este algoritmo, pode-se criar segmentos de trajetórias que passam sobre pontos de terra ou não navegáveis. O valor máximo de afastamento para que um ponto seja eliminado deve ser ajustado para evitar que isso aconteça. Nos experimentos relatados, foram adotados valores menores que a metade da largura do canal principal da Baía de Guanabara, ou seja, aproximadamente 100 jardas.



**Fig. 4** - Imagem gerada para detectar pontos de trajetória sobre terra ou áreas não-navegáveis, representadas em vermelho, e áreas navegáveis, em verde.

Após todo esse pós-processamento automático, como há de se notar pela análise da **tabela 2**, restam ainda muitas trajetórias. A determinação de critérios objetivos para avaliação dos resultados obtidos não é simples. A melhor análise parece ser a avaliação subjetiva das trajetórias obtidas por especialistas que conheçam as características do tráfego marítimo na região em pauta, que foi o último critério utilizado para se chegar à quantidade final de trajetórias constante da **tabela 2**.

Valores mais altos de  $\epsilon$  e mais baixos de  $MinPts$  diminuem a discriminação entre trajetórias, causando a união de trajetórias diferentes. No entanto, ao se evitar esta junção de trajetórias

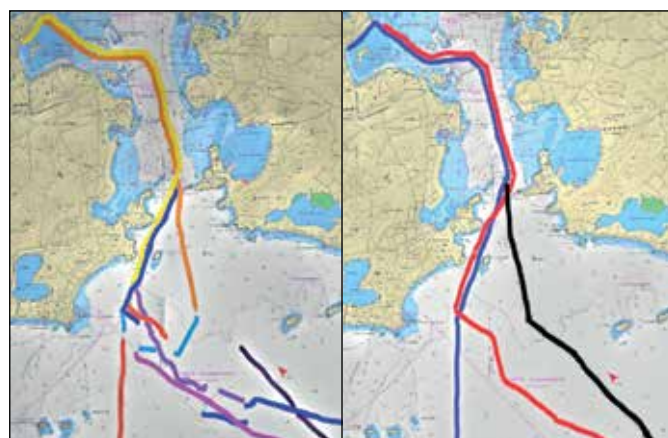
diferentes pelo ajuste dos parâmetros, surge a tendência de separar trechos de uma mesma trajetória em diferentes clusters.

Ainda com o intuito de obter critérios objetivos, foi calculado para cada trajetória o desvio padrão e o coeficiente de variação dos rumos e das velocidades, buscando obter tendências que ajudassem a escolher as trajetórias de maior qualidade. Nota-se que, para alguns casos, as melhores trajetórias eram aquelas com menores variâncias, enquanto, para outras categorias, eram aquelas com os valores mais altos, denotando não ser um bom critério de escolha.

As **figuras 5 a 9** mostram as trajetórias obtidas antes e após o pós-processamento.



**Fig. 5** - Trajetórias geradas para Barcas. À esquerda antes do pós processamento e à direita após o pós-processamento.

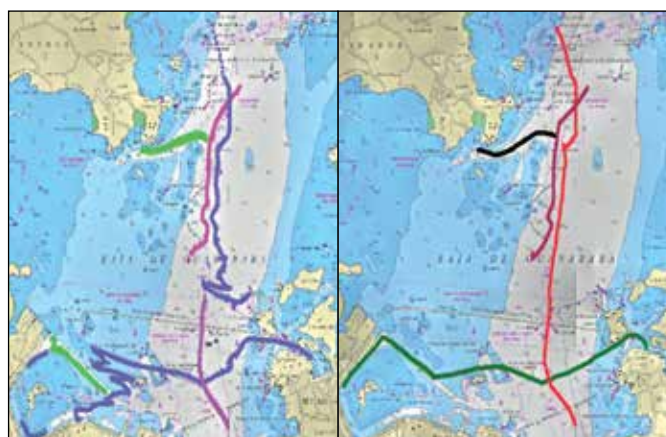


**Fig. 6** - Trajetórias geradas para Cargueiros. À esquerda antes do pós processamento e à direita após o pós-processamento.

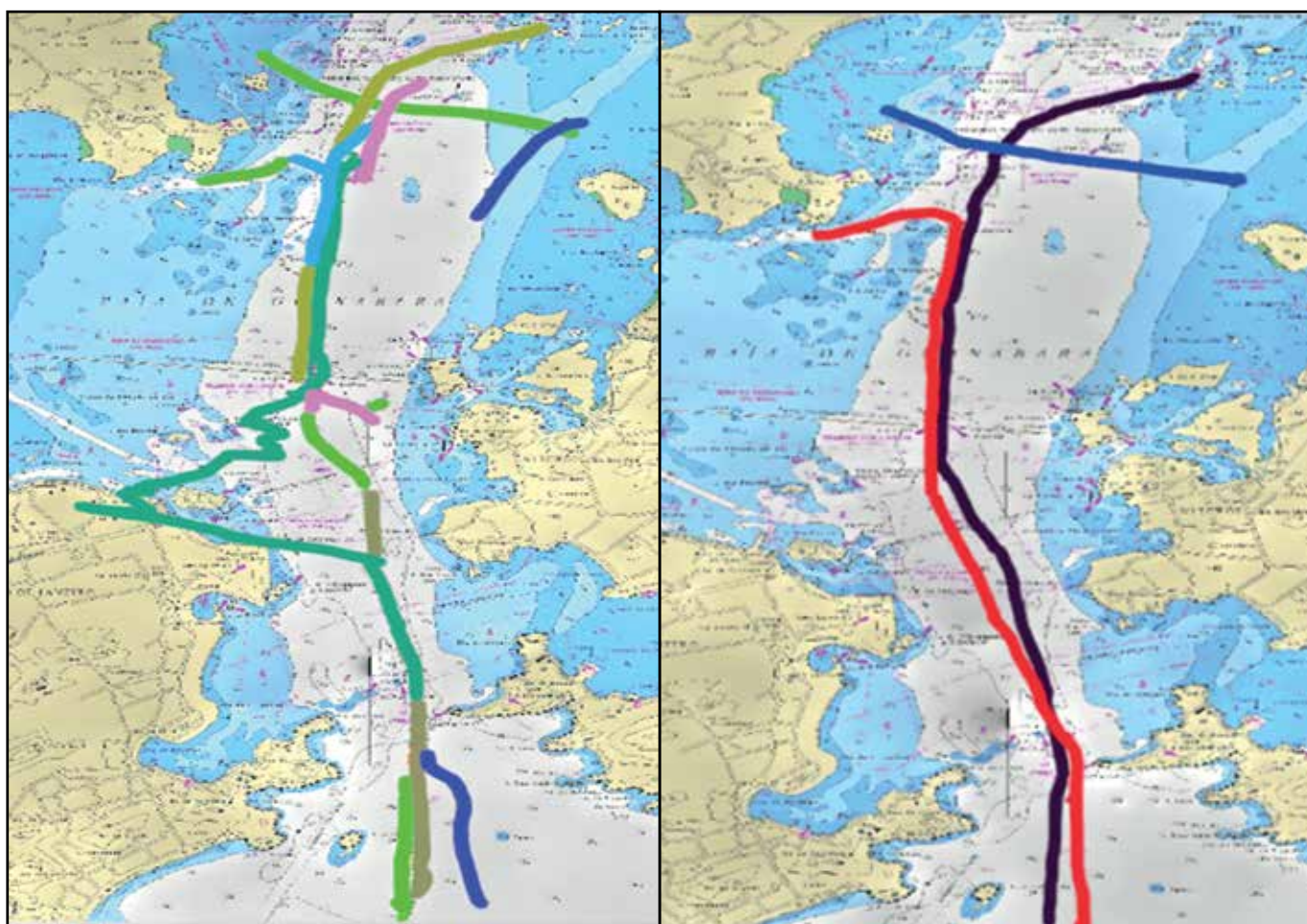




**Fig. 7** - Trajetórias geradas para navios Offshore. À esquerda antes do pós processamento e à direita após o pós-processamento.



**Fig. 8** - Trajetórias geradas para Rebocadores. À esquerda antes do pós processamento e à direita após o pós-processamento.



**Fig. 9** - Trajetórias geradas para Navios-Tanque. À esquerda antes do pós processamento e à direita após o pós-processamento.

## 6. Considerações Finais

O objetivo deste trabalho foi o de obter, a partir de uma grande massa de dados de mensagens AIS, trajetórias representativas da movimentação comum dos navios que frequentam uma ZP, e utilizar as trajetórias obtidas para controlar navios NPC no Simulador de Passadiço desenvolvido pelo CASNAV.

Utilizando o algoritmo proposto no trabalho de Liu *et al.* [2], em conjunto com pré-processamentos e pós-processamentos dos dados, foi possível obter 19 trajetórias representativas de 5 categorias de navios

selecionados, sendo os resultados obtidos considerados muito satisfatórios e aplicáveis aos exercícios de simulação conduzidos no âmbito da Marinha do Brasil.

Em trabalhos futuros, pode-se explorar a conjugação deste método com o TraClus [10] e se avaliar os resultados. Há grande espaço para os aprimoramentos dos métodos de pré e pós-processamento dos dados, a fim de otimizar os resultados obtidos. Seria interessante estudar futuramente formas de união automática de trechos de uma mesma trajetória separados em diferentes *clusters* pela discriminação do algoritmo.

## Referências

- [1] LAGE, M., CLUA, E., BARBOZA, D., et al. Simulador de Passadiço. **XI Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital – SBGames**, 5, 2012.
- [2] LIU, Bo; DE SOUZA, ERICO N.; MATWIN, Stan, et al. Knowledge-based clustering of ship trajectories using density-based approach. **Proceedings - IEEE International Conference on Big Data**, 603, 2014.
- [3] PERERA, L. P., OLIVEIRA, P.; GUEDES SOARES, C. Maritime Traffic Monitoring Based on Vessel Detection, Tracking, State Estimation, and Trajectory Prediction. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 13, 1188, 2012.
- [4] VRIES, G. K. D. De and Someren, M.; Machine learning for vessel trajectories using compression, alignments and domain knowledge. **Expert Systems with Applications**. 2012, 13.426, 2012.
- [5] DUCA, A. Lo, BACCIU, C. and MARCHETTI, A.; A K-nearest neighbor classifier for ship route prediction. **OCEANS – Aberdeen**, October, 1, 2017.
- [6] PALLOTTA, G., VESPE, M.; BRYAN, K.; Vessel Pattern Knowledge Discovery from AIS Data: A Framework for Anomaly Detection and Route Prediction. **Entropy**, 15, 2218, 2013.
- [7] ESTER, M., KRIEGEL, H.-P., SANDER, J.; XU, X. Density-based spatial clustering of applications with noise. **Int. Conf. Knowledge Discovery and Data Mining**, 240, 6, 1996.
- [8] MARA CASSIANO, K.; **Análise De Séries Temporais Usando Análise Espectral Singular (SSA) E Clusterização De Suas Componentes Baseada Em Densidade**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [9] PEUCKER, T.; DOUGLAS, D. H. Reflection Essay: Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature Classics in Cartography: **Reflections on Influential Articles from Cartographica**, 29, 2011.
- [10] LEE, J., HAN, J. and WHANG, K.-Y. Trajectory Clustering: A Partition-and-Group Framework. **Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data – ACM**, 593, 2007.



# Um estudo das forças de sustentação e arrasto em função da distribuição de pressão em corpos aerodinâmicos

Daniel M Carvalho<sup>\*a</sup>, Victor Santoro Santiago<sup>\*b</sup>

<sup>a,b</sup>Instituto Militar de Engenharia. Seção de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, Praça General Tibúrcio, 80 – Urca, CEP: 22290-270 Rio de Janeiro, Brasil

\*daniel.carvalho@ime.eb.br, \*santoro@ime.eb.br

**RESUMO:** O presente artigo buscou analisar os efeitos da geometria de uma superfície de sustentação no cálculo de seu arrasto induzido. Para tal, foi simulado o escoamento ao redor de um aerofólio 3D, o qual impõe uma distribuição de pressão em forma de sino. Os resultados dos esforços e do momento de guinada resultantes para diversos ângulos de ataque foram então comparados aos tradicionalmente obtidos por uma distribuição de pressão elíptica, comprovando o surgimento da guinada proversa com consequente diminuição do arrasto induzido.

**PALAVRAS-CHAVE:** Distribuição de pressão, superfícies de sustentação, arrasto induzido.

**ABSTRACT:** The present article aimed to analyze the effects of the lift surface geometry in the calculation of its induced drag. For this purpose, the flow around a 3D airfoil was simulated, at the influence of pressure distribution on the bell-shaped. The results of the efforts and yaw moments from different attack angles was compared with ones from traditional elliptical pressure distribution, proving the appearance of the proverse yaw with a consequent decrease of induced drag.

**KEYWORDS:** Pressure distribution, lift surfaces, induced drag.

## 1. Introdução

Superfícies de sustentação e controle são utilizadas em diversos ramos da engenharia, como em aeronaves, máquinas de fluxo, mísseis e foguetes. Entretanto, as forças que dão origem à sustentação também causam uma força contrária ao movimento, conhecida como arrasto ou, mais precisamente, arrasto induzido. Essa força é responsável por aproximadamente 40% do arrasto total no corpo e, em baixa velocidade, esse número se torna ainda maior, podendo alcançar 90% [1].

Desta forma, este artigo analisa a influência da geometria de uma asa na geração do arrasto induzido. Para tal, será explorada a distribuição de pressão em formato de sino, proposta pelo Prandtl. Esse formato é baseado no modelo utilizado em Bower [2], o qual será desenvolvido no *SOLIDWORKS*<sup>TM</sup> e simulado no *ANSYS Fluent*<sup>TM</sup>, uma vez que, ambos os softwares, atendem às complexidades exigidas pelo projeto.

Além dessa análise, será avaliado também o momento de guinada, verificando a existência da

guinada reversa (*proverse yaw*) para o modelo de distribuição de pressão em forma de sino.

## 2. Fundamentação teórica

A seguir são apresentados alguns princípios físicos envolvidos e as teorias que sustentam.

### 2.1 Forças aerodinâmicas

Para Araújo [3], o movimento relativo de um fluido ocasiona alterações de distribuição de pressão ao redor do corpo por onde esta passa, além de causar tensões cisalhantes na superfície. Se somados, esses efeitos dão origem às forças aerodinâmicas conhecidas como sustentação e arrasto.

#### 2.1.1 Sustentação

A sustentação, como mencionado, é uma das forças geradas pelo movimento relativo entre o fluido e o corpo. Sua magnitude é diretamente proporcional à densidade do ar ( $\rho$ ), à área de superfície da asa ( $A$ ),

e ao quadrado da velocidade relativa do escoamento ( $V$ ), como mostra a **equação 1** abaixo (Abbot [4]).

$$FO = \sum_{i=1}^{N_{S\text{ões}}} PSI(Xd(i) = 1, i), \quad (1)$$

onde  $C_L$  é chamado de coeficiente de sustentação, sendo obtido em função do modelo do perfil aerodinâmico, do número de Reynolds e do ângulo de ataque. Ele representa a eficiência do perfil em gerar a força de sustentação (Ribeiro [5]).

## 2.1.2 Arrasto

O arrasto, como mencionado, é a força na direção e sentido do escoamento. Sua origem provém das forças de atrito na superfície (origem viscosa), das forças de pressão, e da força de sustentação (arrasto induzido).

Além dessas três forças de arrasto, existe mais uma quando se trata de velocidade supersônica, onde as ondas de choque interferem no movimento. Entretanto, como este artigo se restringe apenas às velocidades subsônicas, este efeito não será explorado.

### 2.1.2.1 Arrasto de atrito

O arrasto de atrito é proveniente da existência de uma camada limite, a qual é a região adjacente a uma superfície sólida, onde tensões viscosas estão presentes em contraposição à corrente livre, em que estas tensões viscosas são desprezíveis [6].

Segundo [6], a força de arrasto relativa ao atrito de superfície pode ser calculada por:

$$\sum_{i=1}^{N_{S\text{ões}}} Xd(i) = NAAA, \quad (2)$$

onde  $A$  é a área total da superfície em contato com o fluido  $\tau_w$  e é a tensão cisalhante devido a camada limite.

### 2.1.2.2 Arrasto de forma ou de pressão

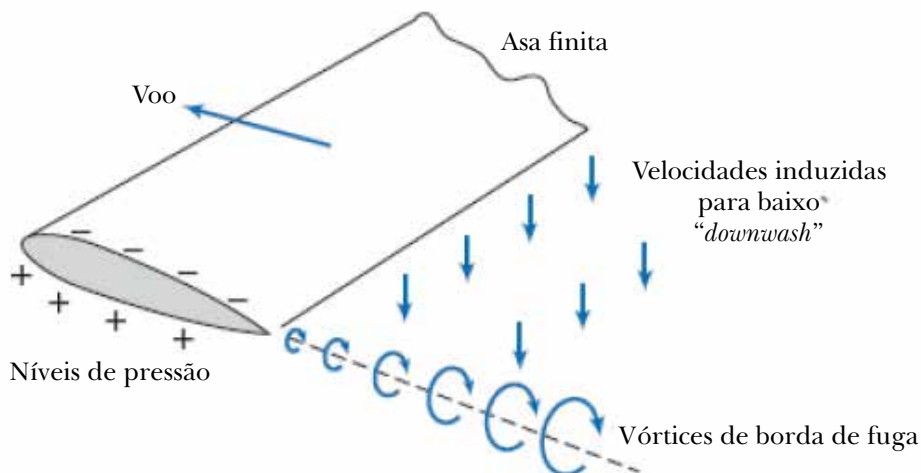
O arrasto de forma ou de pressão está relacionado à geometria do corpo, a qual pode gerar uma diferença de pressão no bordo de ataque para o bordo de fuga que, em última análise, é responsável pela formação da esteira viscosa [6]. Sua magnitude é expressa por:

$$F_p = \int p dA \quad (3)$$

onde  $p$  é a pressão na superfície.

### 2.1.2.3 Arrasto induzido

Em corpos que geram sustentação surge o arrasto induzido, o qual está relacionado à diferença de pressão entre a parte superior e inferior da asa. O ar que está no intradorso tende a fluir para o extradorso, induzindo um turbilhonamento na ponta da asa, gerando os denominados vórtices de ponta de asa, como ilustrado na **figura 1**. Este fenômeno é uma das principais causas da formação da esteira viscosa que provoca resistência ao avanço do corpo [6].



**Fig. 1** – Vórtices na ponta da asa. **Fonte:** [6].

Para Prandtl, o coeficiente de arrasto induzido ( $C_{Di}$ ) está relacionado ao coeficiente de sustentação e à razão de aspecto de forma [7], o que revela a dependência que esse arrasto possui com a sustentação.

$$C_{D,i} = \frac{C_L^2}{\Pi e AR} \quad (4)$$

onde  $C_L$  é o coeficiente de sustentação, é a razão de aspecto de forma, é o fator de eficiência.

$$F_D = C_D \frac{\rho V^2}{2} A \quad (5)$$

$$C_D = C_{D,i} + C_{D0} \quad (6)$$

onde  $C_{D0}$  é o coeficiente de arrasto parasita, resultante da soma do arrasto de forma com arrasto de atrito, obtido experimentalmente.

## 2.2 Momentos aerodinâmicos

Essas forças podem ser consideradas aplicadas em um único ponto chamado de centro aerodinâmico e, dependendo do ângulo de ataque, aparecerá um momento em torno deste ponto que é dado por

$$M = C_M \frac{\rho V^2}{2} LA \quad (7)$$

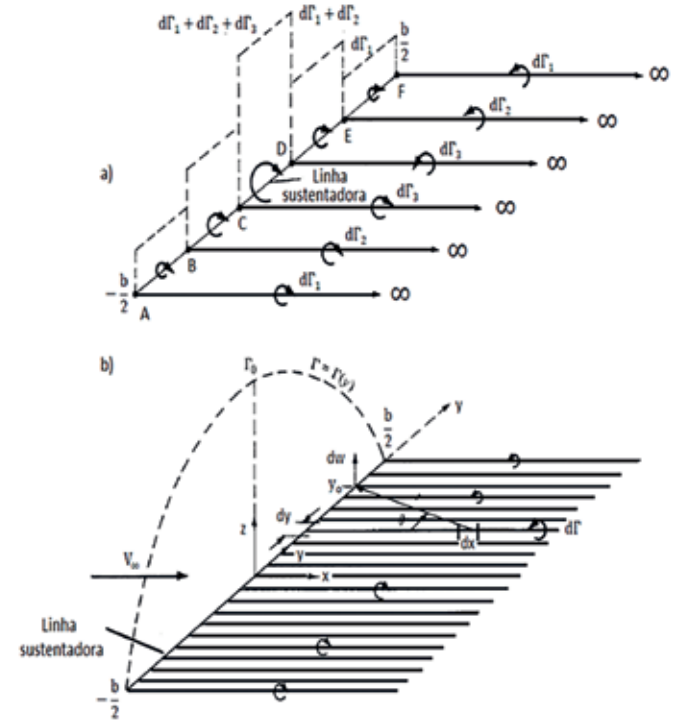
onde  $L$  é um comprimento de referência e  $C_M$  é o coeficiente de momento aerodinâmico, que também é obtido experimentalmente.

Esse momento, quando decomposto nos 3 eixos principais, gerará os 3 movimentos de rotação característicos da aeronave, que são a rolagem, a guinada e a arfagem.

## 2.3 Teoria clássica de Prandtl

Prandtl desenvolveu a sua teoria entre 1911-1918, recorrendo ao conhecimento existente relativo aos filamentos de vórtices, que, por sua vez, representam um papel importante na síntese de escoamentos complexos. Sua premissa era que a intensidade de circulação não deveria variar ao longo da asa. Porém, observações relatavam que tal fato não era realista para uma asa finita. Assim, Prandtl sugeriu mudar o

formato da asa, sobrepondo determinados filamentos de vórtices com intensidade de circulação diferentes. Como mostra a **figura 2** [7].



**Fig. 2** – Sobreposição de números, finitos (a) e infinitos (b), de filamentos de vórtices ao longo da linha sustentadora. **Fonte:** adaptado de [7].

Os vórtices livres são responsáveis pelo surgimento da velocidade induzida  $w$  ao longo do eixo da asa perpendicular à linha sustentadora. Essa velocidade, num dado ponto  $y_0$ , é obtida através da contribuição de todos os vórtices livres, conforme mostra a **equação 8**:

$$w(y_0) = \frac{-1}{4\pi} \int_{-b/2}^{b/2} \left( \frac{d\Gamma}{dy} \right) \frac{dy}{y_0 - y} \quad (8)$$

onde  $b$  é a envergadura e é um ponto ao longo da linha sustentadora.

Uma vez que a velocidade do escoamento não perturbado,  $V_\infty$ , é, por norma, muito superior à componente descendente,  $w$ , o ângulo induzido  $\alpha_i$  toma um valor relativamente pequeno. Deste modo, o cálculo do ângulo induzido pode ser simplificado pela seguinte forma:

$$\alpha_i(y_0) = -\frac{w(y_0)}{V_\infty} \quad (9)$$

A teoria de *Kutta-Jukovski* prevê que a distribuição da sustentação ( $L'$ ) está relacionada com a circulação, segundo a **equação 10**:

$$L' = \rho V_\infty \Gamma(y_0) \quad (10)$$

Assim, considerando essa teoria, a definição de coeficiente de sustentação e o conceito de ângulo de ataque efetivo, que é o ângulo entre a corda e o escoamento relativo, chega-se à equação fundamental da teoria da linha de sustentação de Prandtl, representada por:

$$\alpha(y_0) = \frac{2\Gamma(y_0)}{\alpha_0 V_\infty c(y_0)} + \alpha_{L=0} + \frac{1}{4\pi V_\infty} \int_{-b/2}^{b/2} \left( \frac{d\Gamma}{dy} \right) \frac{dy}{y_0 - y} \quad (11)$$

onde  $\Gamma(y)$  é a intensidade da circulação,  $\alpha_0$  é o declive da curva de sustentação,  $c(y_0)$  é a corda em  $y = y_0$  e  $\alpha_{L=0}$  é o ângulo de ataque para sustentação zero.

### 2.3.1 Distribuição de pressão elíptica

A distribuição elíptica possui a seguinte intensidade de circulação:

$$\Gamma(y) = \Gamma(y_0) \sqrt{1 - \left( \frac{2y}{b} \right)^2} \quad (12)$$

Portanto pelas **equações 8 e 9**, resultam no seguinte ângulo induzido:

$$\alpha_i = \frac{AC_L}{\pi b^2} \quad (13)$$

Para o coeficiente de arrasto induzido [7]:

$$C_{D,i} = \frac{2}{V_\infty A} \int_{-b/2}^{b/2} \Gamma(y) \alpha_i(y) dy \quad (14)$$

Resolvendo:

$$C_{D,i} = \frac{AC_L^2}{\pi b^2} \quad (15)$$

Portanto, para a força de arrasto:

$$F_{Di} = \frac{AC_L^2}{\pi b^2} \left( \frac{\rho V^2}{2} A \right) \quad (16)$$

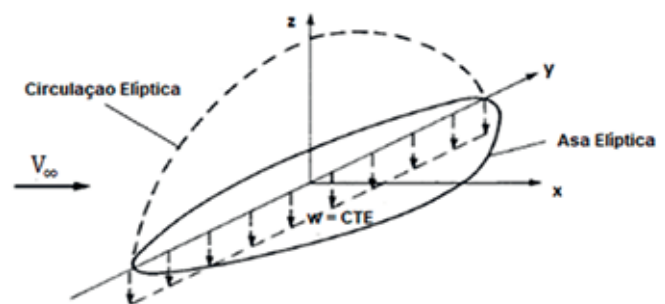
Como resultado, pode-se observar que uma geometria de sustentação elíptica não pode desenvolver unicamente sustentação livremente, há sempre um preço a se pagar, que será o arrasto induzido.

É interessante observar a relação entre a circulação com a distribuição pressão, e a relação entre a circulação com a geometria do corpo. Segundo a **equação 10**, a distribuição de pressão está diretamente relacionada à circulação. Deste modo, como a circulação é elíptica, a distribuição de pressão também será.

Considerando que não haja torção na geometria e nem torção dinâmica ao longo da extensão da asa, ter-se-á que tanto  $\alpha$  como  $\alpha_{L=0}$  serão constantes. Pelo conceito do ângulo efetivo e pela teoria de *Kutta-Jukovski*, obtém-se a seguinte equação para a relação entre a circulação e a geometria do corpo:

$$c(y) = \frac{L(y)}{c_L \frac{\rho V_\infty^2}{2}} \quad (17)$$

Como  $c(y)$  é diretamente proporcional à distribuição de pressão que possui um formato elíptico, então a corda varia elipticamente ao longo de sua extensão, como ilustra a **figura 3**.



**Fig. 3** – Asa elíptica. **Fonte:** [7].

### 2.3.2 Distribuição de pressão em forma de sino

Prandtl, em 1933, e Horten, em 1935, desenvolveram trabalhos separadamente a respeito da geometria



que possui o arrasto induzido mínimo. O primeiro, corrigindo a sua teoria de 1922, calculou a força de arrasto induzida total para uma asa cuja distribuição de pressão possui formato de sino, concluindo que esta nova distribuição é mais eficiente que a distribuição de pressão elíptica, no sentido de reduzir ainda mais o arrasto induzido. Entretanto, ele não examinou a distribuição dessa força em torno da extensão da asa e falhou na sua implicação. Coube, assim, à Horten 1935, calcular a distribuição dessa força, concluindo, em 1950, que possivelmente existe uma singularidade nessa distribuição. O que o Prandtl falhou e Horten acreditava existir, se trata da guinada reversa [2].

A solução para a distribuição de circulação em forma de sino, desenvolvida por Prandtl em 1933, foi:

$$\Gamma(\theta) = (1 - \theta^2)^{\frac{3}{2}} \quad (18)$$

Chegando ao *downwash* de:

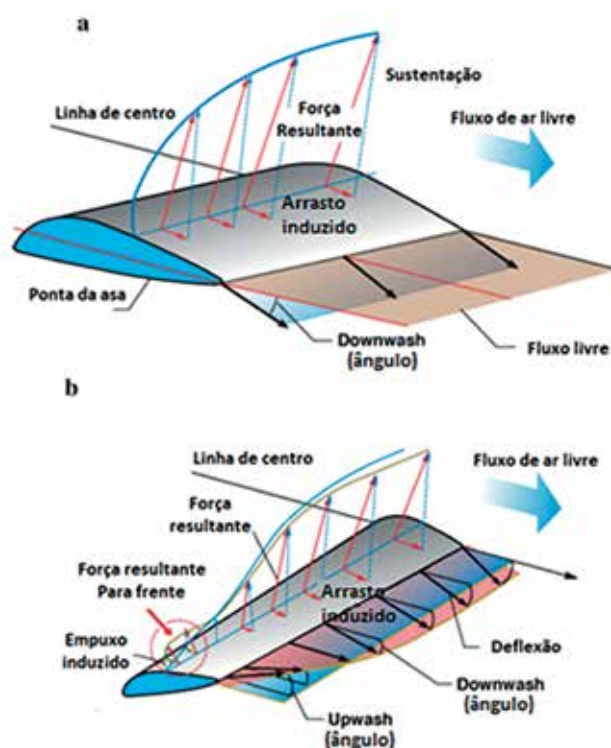
$$w(y) = \frac{3}{2} \left( y^2 - \frac{1}{2} \right) \quad (19)$$

A **figura 4** ilustra as duas distribuições de Prandtl, 1922 e 1933.

Pode-se perceber que a distribuição de pressão elíptica mostrada na **figura 4(a)** produz uma resultante de arrasto induzido constante na direção e sentido do escoamento, em função do *downwash* constante ao longo de toda a extensão da asa. Por outro lado, na **figura 4(b)**, pode-se ver a transição do *downwash* para o *upwash* ao longo da asa. A força de sustentação resultante nessa região de *upwash* é inclinada para a frente, e sua componente horizontal representa um empuxo induzido na ponta da asa, o qual explica o surgimento da guinada reversa [2].

Como consequência, ao ser acrescentada uma superfície de controle (*aileron* ou *elevon*) para gerar momento de rolagem numa asa elíptica, também será produzido um momento de guinada para o exterior, que se opõe à guinada pretendida, e por este motivo é denominada guinada adversa. Por sua vez, uma asa com distribuição de pressão em forma de sino produziria um momento que auxilia o controle, uma vez que contribui com a guinada pretendida e, por este

motivo, é denominada guinada reversa ou proversa. Assim, as aeronaves que possuem distribuição de pressão elíptica precisam de dispositivos que auxiliam a guinada, como o leme/estabilizador horizontal, aparato que poderia ser reduzido ou até mesmo dispensado no modelo de distribuição de pressão em forma de sino. Cabe ressaltar que a supressão do leme também representaria uma redução de peso e de arrasto na aeronave como um todo.



**Fig. 4** – Explicação de Prandtl. **Fonte:** [2].

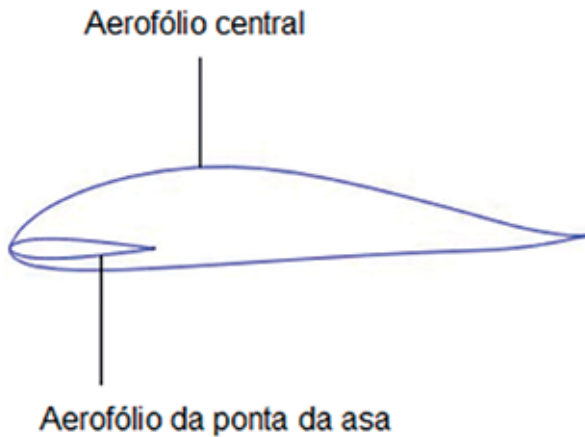
### 3. modelagem computacional

O capítulo disserta a modelagem da asa com perfil de pressão em forma de sino proposta por Bower [2] e a sua superfície de controle, o *elevon*, que será adicionado a ela.

#### 3.1 Asa de Bower

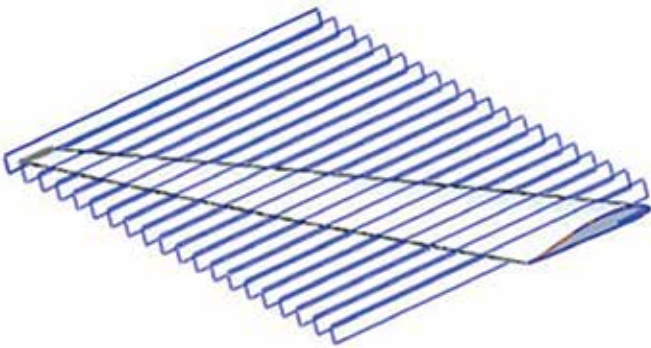
A modelagem dessa asa foi feita utilizando os dados de Bower [2] que disponibilizou os aerofólios em coordenadas. Estas coordenadas foram inseridas

no *SOLIDWORKS*<sup>TM</sup>, resultando nas superfícies do aerofólio central e do aerofólio da ponta da asa, como mostra a **figura 5**. Estas superfícies possuem uma distância de 1874,52 *mm* uma da outra.



**Fig. 5** – Visão lateral. Fonte: autoria própria (2020).

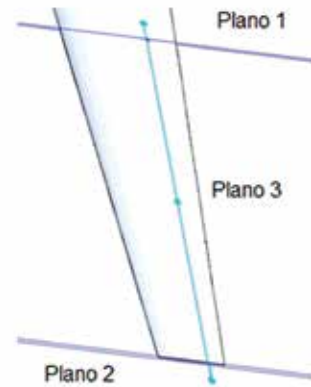
Foram feitas 20 divisões igualmente espaçadas de 93,73 *mm* da raiz da asa até a sua ponta. Em cada subdivisão foram colocados planos contendo o aerofólio com os ângulos de torção descritos em [2]. Em cada plano, os aerofólios foram posicionados de tal forma que a asa obtivesse um ângulo de enflechamento de 24° e 1,25° de diedro positivo. A **figura 6** mostra o resultado desta operação, sendo indicados os planos intermediários.



**Fig. 6** – Planos de divisão da asa. Fonte: autoria própria (2020).

Para ser possível a adição da superfície de controle, foram realizados os seguintes processos na asa:

- 3 planos bases para o recorte, como mostra a **figura 7**; e interseção desses planos e a asa para recortar o *elevon*.



**Fig. 7** – Planos para recorte. Fonte: autoria própria (2020).

### 3.2 Modelagem da superfície de controle

Para a construção dessa superfície de controle, **figura 8**, foram realizados os seguintes procedimentos:

- Planos bases idênticos aos planos de recorte;
- Interseção dos planos e asa;
- Combinação das interseções;
- Detalhamento da estrutura do *elevon*.



**Fig. 8** – Elevon. Fonte: autoria própria (2020).

## 4. Resultado e discussões

As simulações admitiram 3 configurações possíveis para o *elevon*, -5°, 0° e 5°, todas feitas no *ANSYS Fluent* utilizando o modelo SST para descrever o fenômeno de turbulência. Esse modelo é amplamente utilizado pela comunidade acadêmica devido à sua característica de combinar vantagens de outros dois modelos *K- $\omega$*  e *K- $\epsilon$* .

## 4.1 Forças e momentos aerodinâmicos

Como resultado dessas simulações foram obtidos os valores dos parâmetros aerodinâmicos presentes na **Tabela 1** para a configuração de Bower [2], com distribuição de pressão no formato de sino.

**Tab. 1** - Resultados para o modelo de Bower [2]

Parâmetro	Valor		
Ângulo de ataque -	-5°	0°	5°
Coef. de arrasto -	0,0096	0,0095	0,0108
Coef. de sustentação -	0,1567	0,1266	0,1123
Coef. de momento -	0,0105	0,0090	0,0107
Força de arrasto (N) -	59,17	58,26	66,33
Força de sustentação (N) -	960,61	775,98	688,21
Momento de guinada (N.m) -	64,76	55,14	65,70

Comparando os valores de coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) e força de arrasto ( $F_a$ ) entre as configurações (-5°, 0° e 5°), observa-se que, com o ângulo de ataque de 0°, a força de arrasto é menor do que para os demais ângulos, que é condizente com a teoria, pois ao inserir um ângulo no *elevon*, aumenta-se a área de contato com ar e, conseqüentemente, a força de arrasto se torna maior. Observa-se também que o arrasto é maior para o ângulo de 5°, uma vez que a torção na asa de Bower [2] faz com que na ponta os 5° sejam maiores em relação ao escoamento, o que explica o arrasto maior. Por sua vez, com o ângulo de -5°, o escoamento deverá ser menor nas seções próximas das pontas da asa.

Os valores de coeficiente de sustentação ( $C_L$ ) e força de sustentação ( $F_L$ ) também estão coerentes com a teoria, pois quanto menor é o ângulo do *elevon* maior é a força vertical.

Em relação ao momento de guinada, pode-se observar que tanto na configuração de -5° como na de 5° possuem momentos maiores que no 0° para ambos os modelos, o que pode ser explicado pela presença da superfície de controle próximo a ponta, gerando, desta forma, um arrasto maior e, conseqüentemente, um momento de guinada maior. Pode-se observar, também, que o momento de guinada resultante, ao se considerar a asa de Bower [2] completa, sendo 5° em uma extremidade e -5° em outra, será de -0,9413 N.m, o que revela o aparecimento do momento de guinada reversa, favorecendo a aeronave nas curvas. Como previsto, este fenômeno não ocorre com a tradicional distribuição

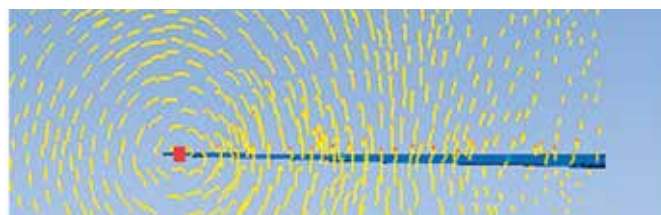
de pressão elíptica, em que percebe-se um momento de guinada adversa de 14,2647 N.m, valor encontrado na simulação de uma asa com modelo de distribuição elíptica nas mesmas condições.

## 4.2 Asa de Bower

Além das forças e coeficientes calculados, analisou-se também a distribuição da pressão em 6 planos localizados em 0%, 40%, 60%, 80%, 90% e 100% da raiz da asa.

Os resultados para a configuração com ângulo de ataque de -5° de Bower [2] são apresentados nas **figura 9** e **11**. Observa-se que avariação da componente de sustentação ocorreu de forma gradual ao longo da envergadura, evidenciando a mudança de *downwash* na região próxima à raiz da asa para *upwash* na região próxima à ponta da asa, como comprovado na **figura 9**, a qual mostra o escoamento na visão do plano de entrada, onde o quadrado vermelho indica a linha central do vórtice.

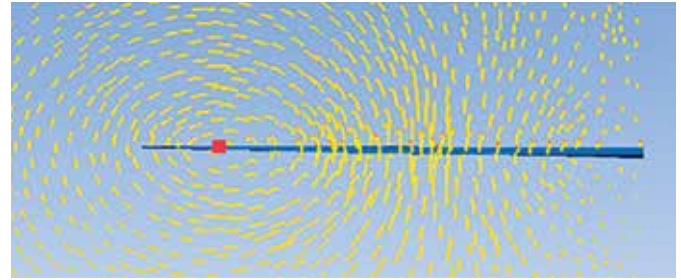
A partir das imagens da **figura 11**, observa-se uma distribuição de pressão cuja resultante gera uma força para cima e uma força de arrasto no sentido oposto ao escoamento. Pode-se destacar as **figura 11(d)**, **11(e)** e **11(f)**, nas quais há o surgimento de uma pressão considerável no intradorso da asa gerado pelo *elevon*, caracterizando maior sustentação. Outro resultado é a variação da componente vertical ao longo da envergadura. Da **figura 11(a)** até a **figura 11(e)**, observa-se a componente da sustentação na mesma direção e sentido do escoamento indicado pela seta nas figuras, revelando o surgimento do arrasto induzido. Entretanto, na **figura 11(f)**, é possível perceber que a componente da sustentação, representada pela resultante da pressão, se direciona progressivamente para o sentido contrário ao escoamento, à medida que se aproxima da ponta da asa, o que caracteriza o empuxo que gera o fenômeno da guinada reversa.



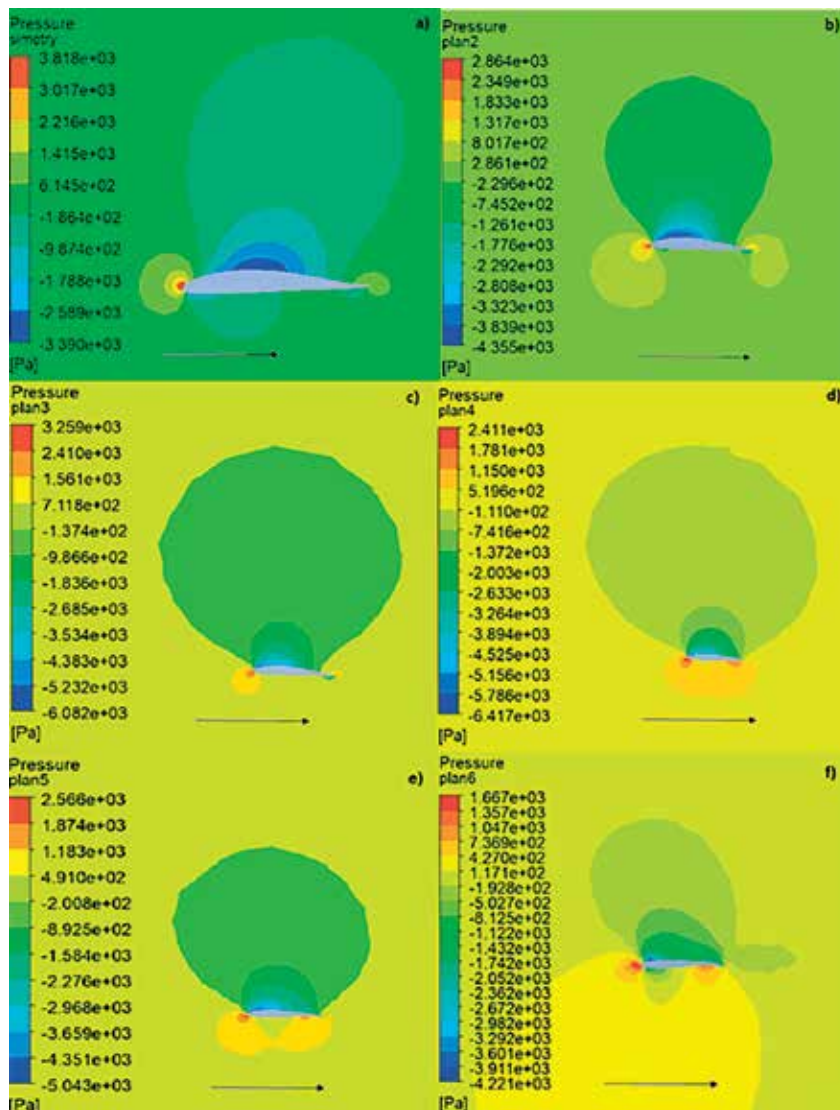
**Fig. 9** – Fluxo de ar na visão frontal para a configuração -5° no modelo de Bower. **Fonte:** autoria própria (2020).

Os resultados para a configuração com ângulo de ataque de  $0^\circ$  no modelo de Bower [2] são apresentados nas **figura 10** e **12**, nas quais pode-se observar a mudança de *downwash* para *upwash* nas **figura 12(d)** e **figura 12(e)**, além da formação do vórtice na região compreendida entre a ponta e a raiz da asa na **figura 10**. Estão, portanto, de acordo com o previsto na literatura. É importante destacar que o ponto onde ocorre o vórtice está localizado mais próximo à raiz da asa em relação à simulação com  $-5^\circ$  de ângulo de ataque. Isso se deve ao fato que o *elevon* nesta configuração desfavorece o empuxo induzido, pois a normal na sua

superfície está projetada para trás, contribuindo para aumentar o arrasto na ponta da asa.

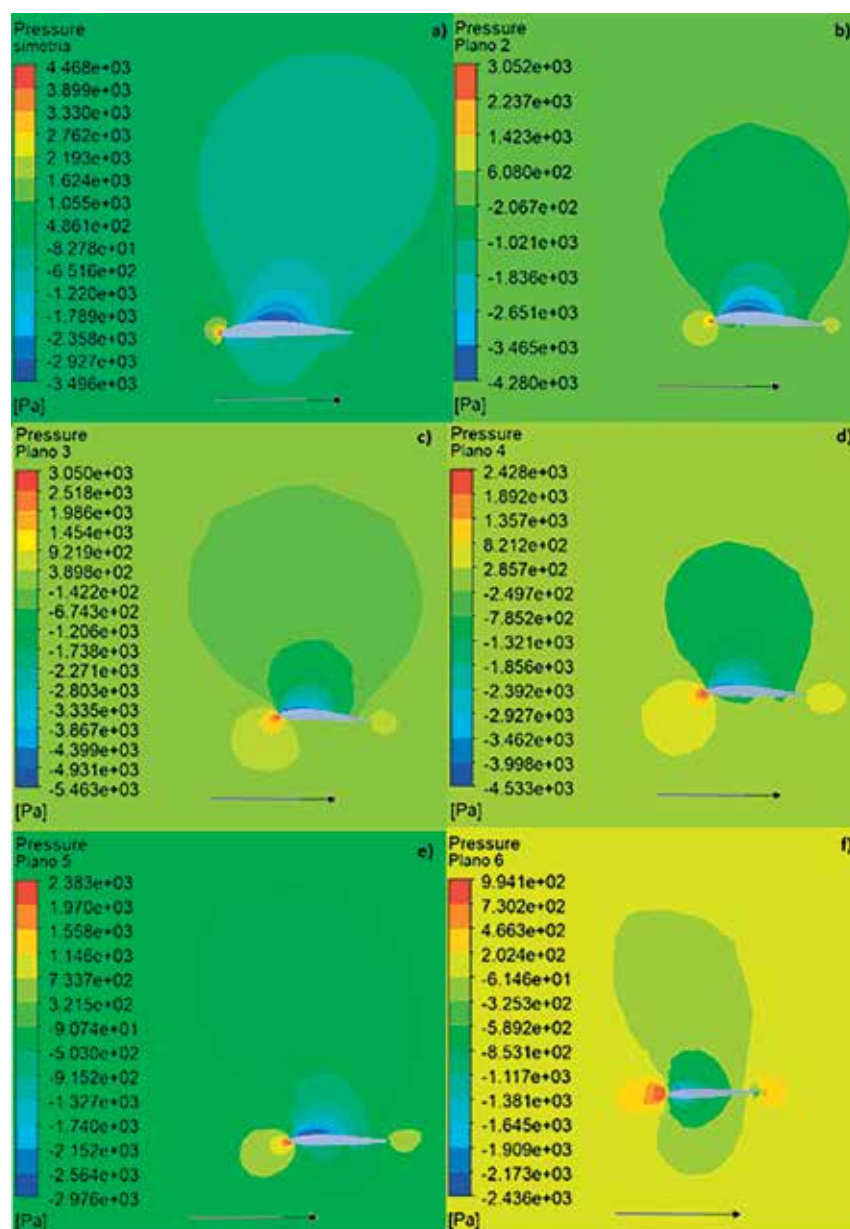


**Fig. 10** – Fluxo de ar na visão frontal para a configuração  $0^\circ$  no modelo de Bower. **Fonte:** autoria própria (2020).



**Fig. 11** – Distribuição de pressão para a configuração  $-5^\circ$  no modelo de Bower nos planos: a) Raiz da asa; b) 40% da envergadura para a asa; c) 60% da envergadura para a asa; d) 80% da envergadura para a asa; e) 90% da envergadura para a asa; e f) ponta da asa. **Fonte:** autoria própria (2020).

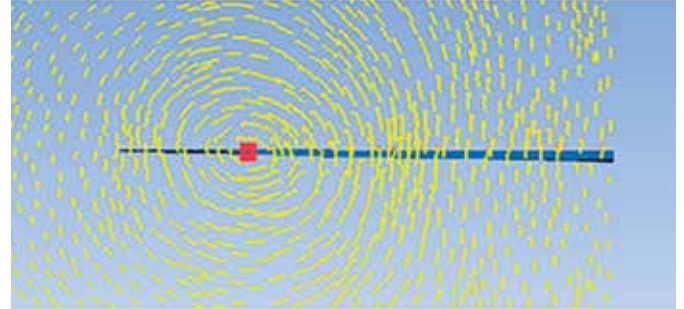




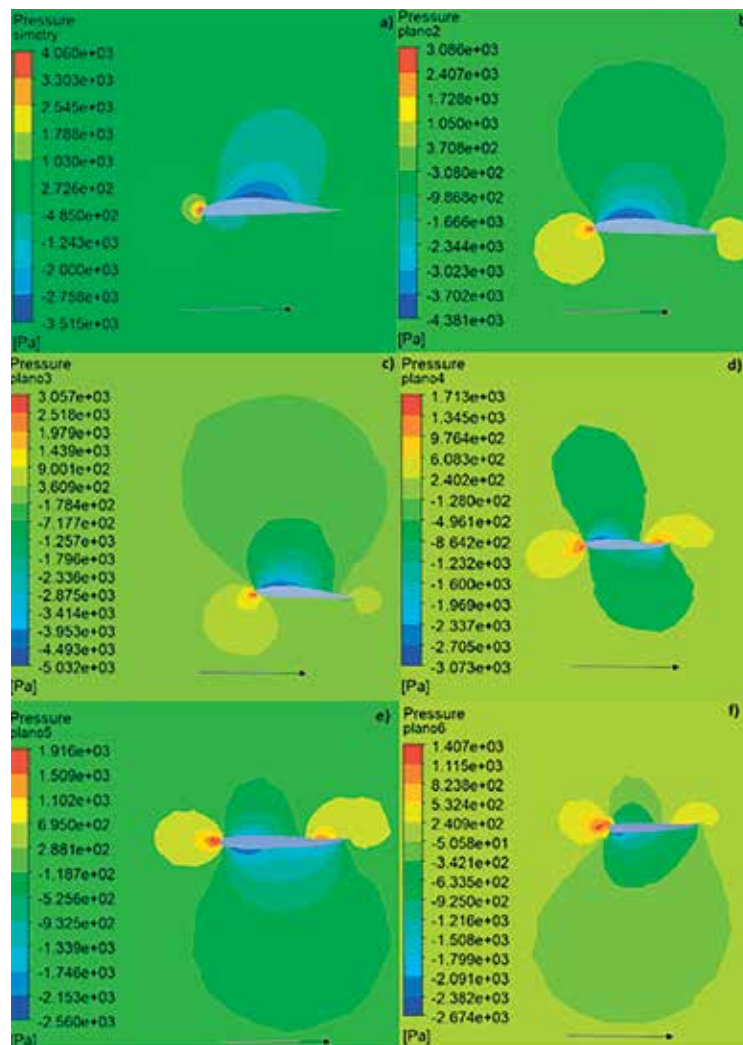
**Fig. 12** – Distribuição de pressão para a configuração  $0^\circ$  no modelo de Bower nos planos: a) Raiz da asa; b) 40% da envergadura para a asa; c) 60% da envergadura para a asa; d) 80% da envergadura para a asa; e) 90% da envergadura para a asa; e f) ponta da asa. **Fonte:** autoria própria (2020).

Para a configuração  $+5^\circ$  do ângulo de ataque no modelo de [2], nas **figura 13** e **14**, observam-se resultados semelhantes aos anteriores, como a distribuição de pressão ao longo da envergadura e a mudança de *downwash* para *upwash* nas **figura 14(c)** e **figura 14(d)**, além da formação do vórtice na região compreendida entre a ponta e a raiz da asa na **figura 13**, estando, portanto, de acordo com o previsto na literatura. É importante destacar que o ponto onde ocorre o vórtice está localizado ainda mais internamente em relação às simulações anteriores. Isso se deve ao fato que o *elevon* nesta configuração favorece o empuxo induzido, pois a normal na sua superfície está projetada para frente. Pode-se destacar também, a **figura 14(d)**,

**14(e)** e **14(f)**, onde há o surgimento de uma pressão considerável no extradorso da asa gerado pelo *elevon*, caracterizando menor sustentação.



**Fig. 13** – Fluxo de ar na visão frontal para a configuração  $5^\circ$  no modelo de Bower. **Fonte:** autoria própria (2020).



**Fig. 14** – Distribuição de pressão para a configuração  $5^\circ$  no modelo de Bower nos planos: a) Raiz da asa; b) 40% da envergadura para a asa; c) 60% da envergadura para a asa; d) 80% da envergadura para a asa; e) 90% da envergadura para a asa; e f) ponta da asa. **Fonte:** autoria própria (2020).

## 5. Conclusão

As simulações realizadas no software *ANSYS Fluent* revelaram uma coerência com a teoria de Prandtl, e com os estudos de Bower [2]. Elas constatarem que o modelo com distribuição de pressão no formato de sino gera um momento de guinada que ajuda no controle da aeronave, o que permitiria, em tese, a diminuição ou até supressão dos lemes como superfície de controle. Adicionalmente, foram realizadas simulações de uma asa com distribuição de pressão no formato elíptico, obtendo resultados que permitiram concluir que este modelo gera um momento de guinada adversa alto, indicando que os lemes são indispensáveis nestes casos.

Em termos de sustentação da aeronave, o modelo com distribuição de pressão em forma de sino teve melhores resultados, mesmo com menos material que o modelo elíptico simulado. Esse fato, somado à retirada do leme, poderia diminuir o custo total da fabricação, todavia, é importante dizer que o formato complexo de sua asa, com ângulos de torções diferentes ao longo de sua envergadura, dificulta sua construção e requer uma engenharia avançada.

Pode-se destacar, também, que o modelo elíptico utilizado para comparação não é único. Sua construção atendeu alguns requisitos que o tornam semelhantes ao de Bower [2], porém é coerente esperar que algumas especificações não sejam atendidas simultaneamente devido à diferença destas geometrias.

## Referências

- [1] GIUBERTI, Rômulo Costalonga. **Avaliação de winglets para aerodesign** - Análise da redução do arrasto induzido utilizando DFC. 2013. 67 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.
- [2] S BOWER, A.H, AND MURILLHO, O.J. **On wings of the Minimum induced Drag**: Spanload Implications for Aircraft and Birds, NASA/TP-2016-219072, 2016
- [3] ARAÚJO, M.R.V. **Simulação e controle de veículo aéreo não tripulado Tail-Sitter**. 126 f. Dissertação (Mestrado em Sistema Mecatrônicos), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.
- [4] ABBOTT, Ira H.; VON DOENHOFF, Albert E. **Theory of wing sections**. New York: Dover Publications, 1958. 705 p.
- [5] RIBEIRO, Fernanda Alves. **Análise aerodinâmica de perfis de asa para aeronaves Experimentais tipo JN-1**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- [6] FOX, Robert W, MCDONALD, Alan T. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 8 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e científicos, 2001, 522 p.
- [7] JHON D; ANDERSON JR. **Fundamentals of Aerodynamics**. 5. ed. New York: Mcgraw-hill, 2007. 1131 p.

# Abordagem física para a força resistente na modelagem da balística interna pelo método dos parâmetros concentrados

Mateus P Rodrigues\*, Rubenildo P. de Barros\*, Achille A Bassi\*

Seção de Engenharia de Mecânica (SE/4), Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, Brasil,

\*arantesbassi@ime.cb.br

**RESUMO:** O presente trabalho trata sobre a proposição de uma formulação baseada em parâmetros físicos para representar a força resistente em uma modelagem da balística interna por uma abordagem via parâmetros concentrados. Os parâmetros do modelo foram ajustados pela solução de um problema inverso realizado com vistas à aproximação de um comportamento de referência para a pressão na câmara em função da posição do projétil. Os resultados foram considerados adequados e, tendo em vista o comportamento de referência para o cartucho M80 em um cano de 24 polegadas, constatou-se que a formulação proposta é mais exata que a que lhe dera origem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Balística interna, Modelagem, Parâmetros Concentrados, Força de Resistência.

**ABSTRACT:** This work deals on the proposal of a physical based formulation to represent the resisting force in a modeling of internal ballistics using a lumped parameter approach. The model's parameters were adjusted through the solution of an inverse problem carried out in order to meet a reference behavior to the chamber pressure as function of the projectile's position. The results were considered adequate, and regarding the reference behavior to the M80 cartridge in a 24 inch barrel, the proposed formulation is more accurate than the one which was its origin.

**KEYWORDS:** Internal Ballistic, Modeling, Lumped Parameters, Resistance Force.

## 1. Introdução

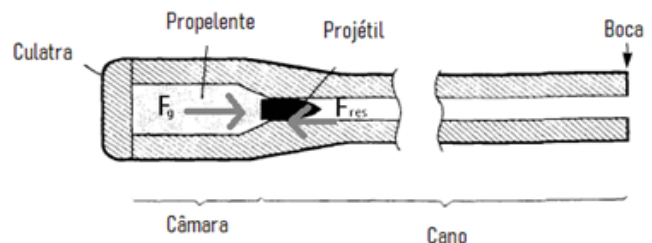
Ballística interna relaciona as características do carregamento, e.g., composição da pólvora e geometria dos grãos com as características do projétil e da arma com vistas à consecução de determinada velocidade de boca.

A **figura 1** apresenta o aspecto básico de uma arma e seu funcionamento. O propelente contido no estojo gera gases, representado pela força  $F_g$ , que, por sua vez, impulsiona o projétil para frente, acelerando-o até a boca da arma. Por outro lado, o cano da arma fornece uma resistência à translação do projétil, representado pela força  $F_{res}$ .

Há diversas formas de trabalhar o problema da balística interna. A mais simples é a utilização de parâmetros concentrados, na qual o espaço e as grandezas vetoriais são representados por variáveis escalares. Este tipo de abordagem tem a vantagem da simplicidade da solução conferida pela pequena

quantidade de graus de liberdade em comparação com os que se teriam no caso da solução de um problema de interação fluido-estrutura com um escoamento bifásico por algum método numérico [1][2].

Entretanto, a modelagem para a balística interna ainda oferece desafios, uma vez que há parâmetros com comportamentos pouco estudados. Pode-se citar, por exemplo, a energia perdida e a força resistente.



**Fig. 1** – Uma arma com seus componentes e as forças aplicadas ao projétil. **Fonte:** adaptado de [3].



## 1.1 Revisão bibliográfica

Um dos principais trabalhos na área da balística interna é o de Hunt [2]. Seu livro foi um dos pioneiros na área e ainda serve de base para alguns trabalhos. Apresenta um modelo semiempírico para a energia perdida, além de sugerir que a força resistente seja representada como uma perda a mais no balanço de energia. Ele sugere que essa perda seja uma porcentagem da energia cinética, da ordem de 4% a 5%.

Outro trabalho importante na área, e que serve de base para um dos principais softwares na área de balística, o PRODAS, foi o de Baer-Frankle [2]. Eles usa da abordagem do Hunt, entretanto, sugere a introdução dos coeficientes  $K_x$  e  $K_v$  na equação de queima, implicando que a posição e a velocidade do projétil são fatores relevantes para o comportamento da queima do propelente. Os autores também introduziram a força resistente, obtida experimentalmente, como sendo um dado de entrada.

Já Cronemberger [3] usa o perfil de força resistente disponível na base de dados do PRODAS para implementar o modelo proposto por Hunt [2] ao cartucho 7,62x51mm (M80). [4], por meio da solução de problema inverso, ajusta os parâmetros de queima do modelo de Cronemberger [3] para reproduzir as curvas presentes na base de dados do PRODAS para o cartucho M80.

## 1.2 Objetivos

Dentro desse contexto, este trabalho surge com o intuito de continuar outro trabalho [4], modelando a resistência ao avanço do projétil com base em parâmetros fisicamente representativos, melhorando o tratamento da energia perdida, assim como o entendimento acerca do comportamento balístico das munições em função de alterações no seu carregamento, e das condições ambientais de operação ou do cano da arma que as dispara.

A justificativa deste trabalho se refere à sua utilização potencial das áreas de balística interna, dinâmica dos componentes móveis de armamento automático ou semiautomático, bem como na dinâmica de sistemas de amortecimento do recuo de armamento pesado.

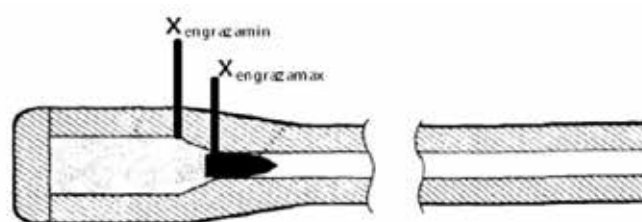
## 2. Definições

Chama-se de alma a superfície interna do tubo ou cano do armamento por onde o projétil se desloca. As armas podem ter alma lisa ou alma raiada. As de alma lisa têm a superfície de sua alma uniforme, cujo diâmetro se chama calibre; enquanto as de alma raiada têm estrias, ou seja, há um diâmetro relativo aos cheios das estrias, o calibre, e outro relativo aos vazios, o fundo de raia.

Embora a modelagem tratada neste trabalho se aplique tanto a armamento leve, calibre menor que 0,6 polegada, ela também é aplicada a armamento pesado. Diz-se que o armamento leve tem cano, enquanto o armamento pesado tem tubo. Como o caso numérico aqui estudado trata-se de uma munição de armamento leve, para manter a uniformidade no texto do artigo, será sempre usado o termo cano, embora se saiba que a formulação também se aplica aos tubos.

As munições de armamento leve, salvo raras exceções, são encartuchadas e engastadas. Isso significa que elas são compostas de projétil, propelente, estojo e cápsula de deflagração, e que o conjunto é fornecido já montado, pronto para o disparo. A força de desengastamento é a força necessária para separar o projétil de seu alojamento no gargalo do estojo.

O engrazamento se refere à impressão das raia ao projétil, que tem diâmetro maior que o do fundo da raia. Assim, no cone de forçamento, **figura 2**, ao mesmo tempo que os cheios causam deformação plástica, raiando o projétil, o mesmo é comprimido pelo fundo das raia, causando a obturação, que impede que os gases propelentes avancem além do projétil.



**Fig. 2** – Cone de forçamento delimitado por  $x_{engrazamin}$  e  $x_{engrazamax}$   
Fonte: adaptado de Cronemberger [3].

O PRODAS é um software de balística que possui uma extensa base de dados acerca de comportamentos balísticos de munições. Assim, dele podem ser obtidas as curvas da balística interna do projétil utilizado no trabalho, de forma a servir de referência ao ajuste de parâmetros e validação de modelos.

### 3. Modelagem

Esta seção aborda o equacionamento necessário para descrever o fenômeno do deslocamento do projétil ao longo do cano à medida que o propelente queima. O equacionamento foi dividido em equações da lei de queima, energia perdida, força de resistência e dinâmica do projétil.

#### 3.1 Lei de queima

Para a balística interna, considera-se, a priori, a lei de Piobert. Isto é, considera-se que todas as superfícies dos grãos propelentes são iniciadas ao mesmo tempo e que toda a superfície é consumida por uma mesma taxa a cada instante e em forma de camadas paralelas [5]. As equações são apresentadas a seguir. A **equação 1** é a expressão de queima do propelente, neste caso,  $P$  é a pressão dos gases no interior da câmara,  $x$  é a posição do projétil no cano,  $V_{el}$  é a velocidade do projétil. A **equação 2** encontra a fração volumétrica de propelente queimado, denominado  $z$ , a partir de  $f$ , que é a fração restante de comprimento balístico do propelente. A Equação 3 é a expressão da pressão da expansão de um gás politrópico, sendo que  $\omega$  é a velocidade angular do projétil,  $A$  é a área transversal do interior do cano [5].

$$\frac{df}{dt} = \frac{B}{D} P^a + K_x x + K_v V_{el} \quad (1)$$

$$z = (1 - f)(1 + kf) \quad (2)$$

$$P = \frac{CzF - (y - 1)(0.5MV_{el}^2 + 0.5M\omega^2 + E_{perdida})}{V_o + Ax + Cz\left(\frac{1}{d_{ensi}} - c_{ovol}\right)} \quad (3)$$

#### 3.2 Energia perdida

Para a energia perdida,  $E_{perdida}$ , Hunt [2] apresenta uma modelagem semiempírica que relaciona a energia perdida em termos de parâmetros da arma. Na equação,  $V_{elboca}$  é a velocidade de boca do armamento. Nessa equação, para o calibre, deve-se utilizar polegadas, e libras para a massa inicial do propelente. Observe que velocidade de boca do armamento deverá ser conhecida.

$$E_{perdida} = \frac{[0,38Ca^{1,5}L(T_o - T_s)]}{1 + 0,6Ca^{2,175} / C^{0,8375}} \frac{V_{el}^2}{V_{elboca}^2} \quad (4)$$

#### 3.3 Força de resistência

Foram considerados quatro componentes na formulação da força resistente:

- a força de engastamento, apresentada na **equação 5**, é a componente devida ao engastamento do projétil no estojo, e ela é atuante enquanto o projétil não sai da sua posição inicial;

$$F_{engastamento}(x) = \begin{cases} F_{engas}, & x = 0 \\ 0, & x > 0 \end{cases} \quad (5)$$

- a força de atrito devido à obturação [6], **equação 6**, é a componente devida ao deslizamento entre a superfície do projétil em contato com o fundo da raia da alma. Ela atua apenas enquanto o projétil se desloca na alma do tubo.

$$F_{obturaçao} = \begin{cases} 0, & x < x_{engrazamin} \\ F_{obtu}, & x \geq x_{engrazamin} \end{cases} \quad (6)$$

- a força de engrazamento, que está sendo mostrada na **equação 7**, é a componente que atua no projétil quando ele passa pelo cone de forçamento que existe na arma. Tal cone fica delimitado pelos parâmetros  $x_{engrazamin}$  e  $x_{engrazamax}$ , apresentados na **figura 2**.

$$F_{engrazamento} = \begin{cases} F_{engraza}, & x_{engrazamin} < x < x_{engrazamax} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

- a força devida ao raiamento, componente axial das forças que as raia faz sobre o projétil, conforme desenvolvimento apresentado por Moss [6], é calculada conforme a **equação 8**. Nela,  $\alpha$  é o ângulo de raiamento do cano e  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre o projétil e o

cano. No modelo proposto, está sendo desconsiderado o atrito causado pela turgência do projétil com os cheios do cano, uma vez que, segundo a AMCP [7], esse esforço é desprezível para munições de armamento leve.

$$F_{\text{vaivamento}} = \frac{I_0}{(C_a/2)^2} (\text{sen}\alpha + \mu \cos\alpha) \dots \left( \frac{dV_{el}}{dt} \text{tg}\alpha + V_{el}^2 \frac{d\text{tg}\alpha}{dx} \right) \dots \left( \frac{\cos\alpha - \mu \text{sen}\alpha}{\cos\alpha - \mu \text{sen}\alpha} \right) \quad (7)$$

Assim, a força resistente pode ser calculada por suas componentes, conforme a **equação 10**.

$$F_{\text{res}} = F_{\text{engastamento}} + F_{\text{obturação}} + F_{\text{engrazamento}} + F_{\text{raivamento}} \quad (9)$$

### 3.4 Dinâmica do projétil

Para completar o conjunto de equações a fim de se definir completamente o sistema, falta aplicar a 1ª Lei de Newton ao projétil, apresentado na **equação 10**.

$$F = PA - F_{\text{res}} = M \frac{d^2x}{dt^2} \quad (10)$$

## 4. Metodologia

### 4.1 Problema direto

Seguindo a abordagem de parâmetros concentrados proposta por Cronemberger [4], elaborou-se o seguinte arranjo para resolver o problema de valor inicial (PVI), composto da redução de ordem da **equação 10** com a **equação 1**.

$$\frac{dx}{dt} = V_{el} \quad (11)$$

$$\frac{dV_{el}}{dt} = \frac{1}{M} [A(P - P_a) - F_{\text{res}}] \quad (12)$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{B}{D} P^a + K_x x + K_v V_{el} \quad (13)$$

Tal sistema de equações foi resolvido com a ODE45. Tal função do Matlab utiliza um algoritmo de Dorman-Prince, também conhecido como Runge-Kutta, de 4,5 ordem. É um algoritmo parecido com o Runge-Kutta de 4ª ordem, entretanto, utiliza passo variável a fim de aumentar a rapidez.

As condições iniciais do problema são que o projétil parte do repouso e que a fração restante do comprimento balístico do propelente é a unidade (nenhum propelente queimou).

Numa etapa de validação da implementação computacional, utilizou-se como parâmetro de entrada o perfil da força resistente disponível no banco de dados do PRODAS. Depois passou-se a empregar a **equação 9**.

### 4.2 Ajuste de parâmetros do modelo

O ajuste dos parâmetros do modelo foi realizado com uma abordagem de problemas inversos. Para tanto, o problema direto, isto é, a obtenção das curvas da balística interna, é resolvido para diferentes conjuntos de parâmetros tentados. Uma função objetivo é calculada para avaliar a qualidade de cada conjunto de parâmetros; dependendo se está sendo realizada uma busca global ou local, se calcula o melhor conjunto da população de tentativas e se cria uma nova população (nova geração), ou se calcula uma nova direção de busca.

A função objetivo, definida pela **equação 14**, avalia a diferença entre a curva Pressão-Tempo obtida por cada conjunto de parâmetros e a curva de referência, obtida do software PRODAS.

$$E_{\text{pro}} = \frac{\sum_{i=1}^k E_i}{k} \quad (14)$$

onde, k se refere ao número de pontos e  $E_i$  é dado pela equação:

$$E_i = \frac{(P_{\text{pdi}} - P_{\text{PRODAS}})^2}{P_{\text{ref}}} \quad (15)$$

O problema da estimativa de parâmetros é resolvido pela aplicação de métodos de otimização para a minimização de uma função que meça a distância do comportamento do sistema em relação a um comportamento de referência, no caso deste trabalho, a **equação 14**.

Optou-se pela combinação de um método de busca global para encontrar a região onde o mínimo global deve estar presente com um método de busca local, para que se aproxime do mesmo com uma maior taxa de convergência.

Para a busca global, foi empregada a função do Matlab, que implementa os algoritmos genéticos “*ga*” [8], enquanto para a busca local foi usada a função “*fminunc*”, que implementa um método quasi-Newton baseado no método BFGS [9], [10] e [11].

## 4. Resultados

Foi analisado o caso para a munição 7,62 x 51 mm M80 em cano de 609,6 mm de comprimento balístico. Outros parâmetros referentes ao propelente e à arma que não estão sendo objetos do ajuste – são tidos como conhecidos – estão apresentados na **tabela 1**.

**Tab. 1** – Parâmetros da arma e do propelente utilizados como dados de entrada

Dados de entrada		
Parâmetro	Símbolo	Valor
Comprimento balístico	D	0,2667 mm
Fator de forma	k	0
Massa específica do propelente	$d_{\text{ens}}$	1578 kg/m <sup>3</sup>
Massa inicial do propelente	C	2,67 g
Temperatura adiabática de chama	$T_o$	2825 K
Covolume dos gases	$c_{\text{ovol}}$	0,001 m <sup>3</sup> /kg
Constante de força do propelente	F	0,9774 MJ/kg
Índice de pressão (expoente)	a	0,69
Razão de calores específicos	$\gamma$	1,24
Calibre	Ca	7,62 mm
Massa do projétil	M	9,4876 g
Volume da câmara	$V_a$	3,27761 cm <sup>3</sup>
Comprimento do cano	L	609,6 mm
Ângulo de raiamento	$\alpha$	4,49 °
Temperatura do armamento	$T_s$	300 K
Pressão mínima para início do projétil	$P_{\text{min}}$	7,57 MPa
Momento de inércia	$I_o$	6,8861.10 <sup>-8</sup> kg.m <sup>2</sup>

Na **tabela 2**, aparecem os parâmetros ajustados frente à curva de referência do PRODAS. Eles permitiram que a função objetivo retornasse a 0,0262.

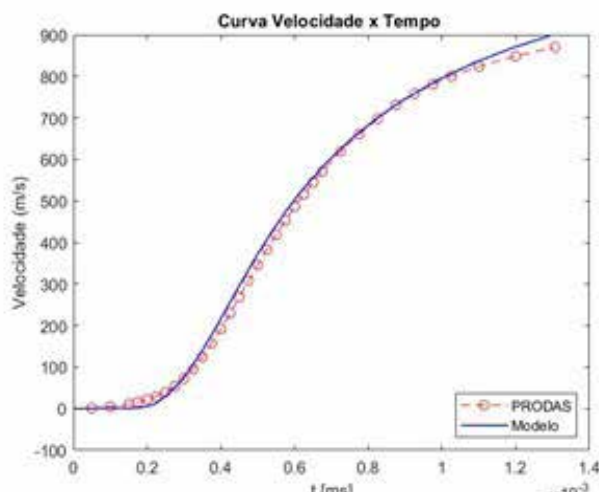
**Tab. 2** – Parâmetros obtidos por ajuste

Parâmetros ajustados			
B	$K_x$	$K_y$	$\mu$
2,499e-7	4493,32	-1,95479	0,09955
$x_{\text{minengrara}}$	$x_{\text{maxengrara}}$	$F_{\text{engrara}}$	$F_{\text{obtu}}$
1,429e-05	3,603e-4	2324,97	162,43

A velocidade de boca segundo o modelo ajustado foi de 897,53 m/s, representando um erro relativo na ordem de 3,16% frente ao valor de referência de 870 m/s apresentado pelo modelo implementado pelo PRODAS. Tendo em vista que o ajuste de parâmetros com a função objetivo da **equação 12** considera apenas os dados referentes à pressão, a boa concordância no perfil de velocidade, apresentado na **figura 3**, foi considerada um bom indicativo da qualidade do modelo.

Na **figura 4**, pode-se perceber uma boa concordância entre a curva de pressão ajustada e a curva de pressão de referência. Tendo em vista a diferença nos modelos, era esperado que houvesse alguma divergência no comportamento geral das mesmas.

A **figura 5** explicita um dos principais motivos para a divergência no comportamento da curva de pressão ao longo do tempo: a força de resistência ao movimento do projétil em função de sua posição na alma tem características distintas das presentes no modelo usado para gerar a curva de referência para a curva pressão-tempo.



**Fig. 3** – Gráfico da velocidade pelo tempo para a munição 7,62mm



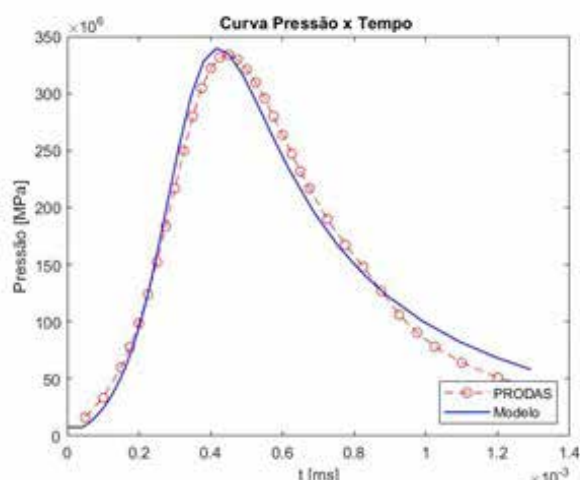


Fig. 4 – Gráfico da pressão pelo tempo para a munição 7,62mm

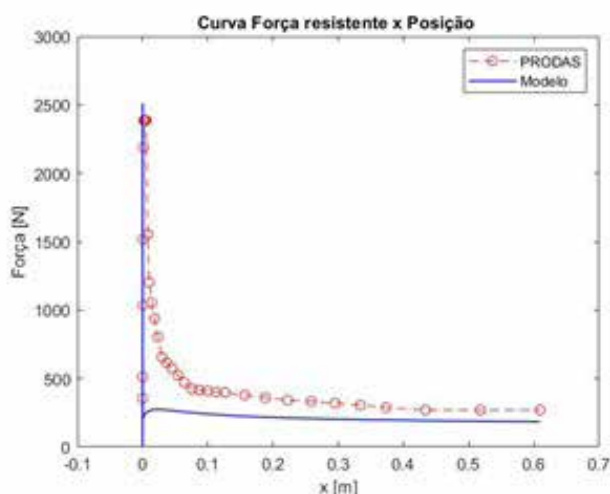


Fig. 5 – Gráfico da força resistente pela posição para a munição 7,62mm

A curva da força resistente em função do tempo, **figura 6**, permite uma melhor visualização de seus diferentes componentes, quando cada uma das forças passa a ser ativa. Inicialmente, tem-se uma força constante, referente à força necessária para desengastar o projétil do estojo; havendo um breve avanço sem resistência, até que o projétil encontre o cone de forçamento; até que as raia sejam gravadas na camisa do projétil e que o mesmo chegue ao maior diâmetro da alma, ele está submetido ao esforço de engrazamento. Ao longo da alma há um componente constante, devido ao atrito da superfície do projétil com o fundo de raia, obturação; e

uma força variável, que é induzida pelo raiamento, e que é função da pressão dos gases e da aceleração do projétil.

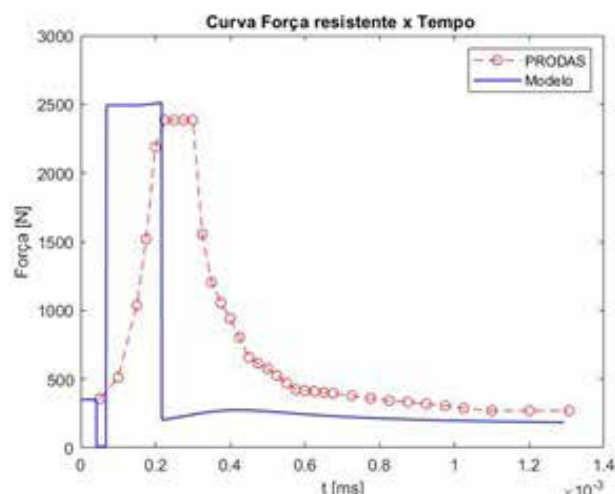


Fig. 6 – Gráfico da força resistente pelo tempo para a munição 7,62mm

Para a execução do modelo no PRODAS, é necessário que se tenha o perfil da força resistente em função da posição do projétil. É parâmetro de entrada, e não há correlação direta da mesma com parâmetros físicos. Na abordagem ora proposta, o perfil da força resistente é função de parâmetros fisicamente significativos. Porém, pela ausência de dados, os mesmos foram obtidos pelo ajuste de parâmetros, a fim de que a curva pressão-tempo do modelo se aproximasse da curva resultante da implementação do modelo de Baer-Frankle, implementado pelo PRODAS com os parâmetros disponíveis em sua base de dados de exemplos.

## 5. Conclusões

A modelagem proposta por Cronemberger [4] foi atualizada, de forma a considerar uma expressão para sua força resistente com base nas características físicas de sua montagem no cartucho, e da interação do projétil com as diferentes porções da alma.

O procedimento proposto para o ajuste dos parâmetros com base na evolução temporal da pressão foi eficaz. A qualidade do modelo, e de sua implementação numérica, foi evidenciada pela concordância de seu

resultado no que se refere à evolução temporal da velocidade do projétil, item que não foi levado em consideração na metodologia de ajuste.

A modelagem e o procedimento apresentados se mostraram promissores, devendo ter a análise de

sua qualidade robustecida por ensaios balísticos com diferentes carregamentos e tipos de munição.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao IME pelo apoio na realização deste trabalho.

## Referências

- [1] BAER, P. G.; FRANKLE, J. M. **The simulation of interior ballistics performance of guns by digital computer program**. Aberdeen Proving Grounds, Maryland 1962.
- [2] HUNT, F. R. **Internal ballistics**. London: H.M.S.O., 1951.
- [3] CRONEMBERGER, P. O.; LIMA JÚNIOR, E. P.; GOISJ. A. M.; CALDEIRA, A. B.. Theoretical study of the interior ballistics of a rifle 7.62. **Engenharia Térmica (Thermal Engineering)**, Vol. 13, No. 2, p. 20-27, 2014.
- [4] CRONEMBERGER, P. O., **Problema inverso de estimativa de parâmetros de propelentes a partir da balística interna de uma arma**. Tese de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.
- [5] RUSSELL, Michael S. Bibliography. In: **The Chemistry of Fireworks** (2). [s.l.]: The Royal Society of Chemistry, 2009, p. 161–163.
- [6] MOSS, G. M.; LEEMING, D. W.; FARRAR, C. L. **Military Ballistics: A Basic Manual**. London: Brassey's, 1995.
- [7] AMCP 706-252. **Engineering Design Handbook**, Gun Series, Gun Tubes, 1964.
- [8] FINLAYSON, D. F. **The forces of constraint on a projectile in a rifled gun bore (Part 1)**, Tech Report, Benét Laboratories, New York, 1988.
- [9] GOLDBERG, David E., **Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning**, Addison-Wesley, 1989.
- [10] BROYDEN, C. G. "The Convergence of a Class of Double-Rank Minimization Algorithms." **Journal Inst. Math. Applic.**, Vol. 6, 1970, pp. 76–90.
- [11] FLETCHER, R. "A New Approach to Variable Metric Algorithms." **Computer Journal**, Vol. 13, 1970, pp. 317–322.
- [12] SHANNO, D. F. "Conditioning of Quasi-Newton Methods for Function Minimization." **Mathematics of Computing**, Vol. 24, 1970, pp. 647–656.

# Mapeamento de *hotspot* em ambientes *outdoors*

Andressa da Silva Siqueira Almeida<sup>a</sup>, Anderson F. Pereira dos Santos<sup>b</sup>, Paulo Fernando Ferreira Rosa<sup>\*c</sup>

Seção de Ensino de Engenharia de Computação - Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

rpaulo@ime.eb.br

**RESUMO:** O crescente avanço tecnológico tem contribuído para a disseminação de novas tecnologias, principalmente na área de telecomunicações. A localização dos dispositivos já é assegurada, com um nível de precisão de aproximadamente de três metros, pelo serviço de GPS (Global Position System), porém a diferença entre a posição real e a estimada de alguns sistemas que utilizam apenas o serviço de GPS é considerada insuficiente, sendo necessária uma precisão maior. O trabalho proposto aborda um problema crítico, especificamente para sistemas de geolocalização e rastreamento de alvos. O principal objetivo é apresentar um algoritmo de localização em ambiente outdoor baseado na força do sinal recebido em que o sistema não possui o conhecimento prévio da localização dos roteadores, também conhecidos como Access Points (AP's).

**ABSTRACT:** The growing technological advancement has contributed to the dissemination of new technologies, especially in the telecommunications area. The location of the devices is already assured, with an accuracy level of approximately three meters, by the GPS (Global Position System) service, but the difference between the actual and estimated position of some systems that use only the GPS service is considered insufficient, requiring greater precision. The proposed work addresses a critical problem, specifically for geolocation and target tracking systems. The main objective is to present an outdoor location algorithm based on the received signal strength in which the system does not have prior knowledge of the location of the routers, also known as Access Points (AP's).

**PALAVRAS-CHAVE:** Access Point. Algoritmo de geolocalização.

**KEYWORDS:** Access Point. Geolocation System.

## 1. Introdução

O avanço tecnológico das últimas décadas foi um fator determinante para a crescente disseminação de novas tecnologias e sistemas de comunicação na sociedade. Isso trouxe um aumento significativo nos dispositivos portáteis sem fio, permitindo a criação de sistemas de geolocalização para os mais diferentes fins, de modo que as inúmeras aplicações desse tipo de sistema têm estimulado o crescimento de pesquisas de serviços e sistemas de localização baseados em dispositivos moveis.

Segundo Siqueira [1], os serviços e sistemas de localização são considerados críticos em aplicações específicas, tais como busca e resgate de vítimas de desastres naturais.

- O principal objetivo desse trabalho foi o desenvolvimento de um algoritmo que, em tempo real, forneça a localização estimada de um *Access Point* (AP), independente do padrão de protocolo de comunicação utilizado em ambientes *outdoors*, utilizando *hardwares* de baixo custo e que se encaixem nas três condições fundamentais descritas por Kim [2], que são:
- Implementável - o algoritmo deve ser facilmente destacável da infraestrutura de comunicação de rede

sem fio *Wi-Fi* (802.11) existente, sem a necessidade de qualquer mudança de *hardware* ou de *firmware* e só deve trabalhar com informações que já estão implantadas nos AP's, tais como Indicador da Força de Sinal Recebido (RSSI - *Receive Signal Strength Indicator*) e Informação do Status do Canal (CSI - *Channel State Information*).

- Universal - deve ser capaz de localizar qualquer dispositivo que forneça *Wi-Fi* (802.11), não exigindo que o alvo tenha qualquer outro *hardware*, tais como acelerômetros, giroscópios, barômetros, câmeras, ultrassom, *bluetooth*, etc.

Preciso - deve ser idealmente tão exato ou mais que os sistemas de localização mais conhecidos que usam sinais *Wi-Fi* (802.11), inclusive aqueles que não satisfazem os dois requisitos anteriores.

A tecnologia *Wi-Fi* (802.11) é recente e tem grandes potencialidades como tecnologia de suporte a aplicações que requerem mobilidade e flexibilidade, sendo a sua viabilidade dependente diretamente dos métodos de localização, da complexidade das áreas em estudo (*indoor* ou *outdoor*) e da tecnologia de infraestrutura, segundo Machado [3].

Este artigo está organizado da seguinte sequência: a seção 2 aborda os trabalhos já existentes utilizados

como base. Na seção 3, é apresentada a plataforma utilizada durante o trabalho. A seção 4 aborda a metodologia utilizada, enquanto na seção 5 são apresentados os resultados obtidos. Na seção 6, são feitas as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos relacionados

Todos os trabalhos propostos ao longo do tempo possuem o mesmo desafio, o de conseguirem estimar com precisão a localização dos dispositivos, mesmo com a utilização de diferentes técnicas por causa dos efeitos sofridos no sinal *Wi-Fi* (802.11) e dos erros intrínsecos.

O algoritmo RMCL [4] baseia-se no algoritmo de Monte Carlo para determinar a posição de alvos móveis, utilizando as informações de RSSI como base para os cálculos. Apesar de evidenciar uma melhora significativa na precisão da localização dos nós ao restringir uma área de amostragem, seu foco é em nós móveis, diferentemente do estudo realizado. Porém, por utilizar o modelo de sombreado, como a propagação de sinal para os cálculos dos valores de RSSI, serviu como base inicial dos estudos.

O algoritmo chamado FILA [5] utiliza a tecnologia CSI (*Channel State Information*) em conjunto com a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para estimar a localização do AP. A técnica demonstra, através de experimentos, que é bem mais precisa que a utilização do RSSI, cuja limitação está no fato de que somente podem ser lidas as modulações OFDM que estão presentes nos padrões 802.11a/g/n. Isso significa que, se na rota traçada, houver algum AP com padrão diferente, ele não será localizado.

O algoritmo SpotFi [6] utiliza as técnicas de AoA (*Angle of Arrival*), ToF (*Time of Flight*) e RSSI, estimando a probabilidade de cada par de AoA e ToF de diferentes componentes de múltiplos caminhos, de modo a encontrar a localização mais provável do alvo que poderia ter produzido o RSSI e AoA capturados. A utilização dessa técnica fornece uma precisão média de 50 cm, porém, ele foi validado com um NIC (*Network Interface Card*) de três antenas, restringindo seu uso a embarcar o algoritmo em qualquer outro hardware e obter a mesma precisão na localização sem componentes adicionais.

O algoritmo ALPHA [7], que utiliza as técnicas de ToA (*Time of Arrival*), RSSI e TDoA (*Time Difference of Arrival*), mostrou seu melhor desempenho, com erro inferior a 3m para mais de 80% das posições.

Nenhum dos algoritmos encontrados satisfizeram as três condições fundamentais propostas por Kim [2] de serem universais, implementáveis e precisos.

**Tab. 1** - Tabela comparativa entre os trabalhos relacionados exemplificados.

Algoritmo	Nível de precisão	Técnica utilizada	Ponto(s) negativo(s) na utilização do algoritmo
FILA	-	CSI e OFDM	As modulações do tipo OFDM não estão presentes em todos os padrões de <i>Wi-Fi</i> (802.11) existentes. Em um ambiente novo e não estruturado, não é possível a determinação de todos os alvos.
SpotFi	50 cm	AoA, ToF e o RSSI	Não é um algoritmo implementável, pois utiliza um NICs de três antenas.
ALPHA	Menor que 3 metros	ToA e RSSI	Falta de precisão no resultado gerado pelo algoritmo.
RMCL	-	Baseado no algoritmo de localização Monte Carlo e RSSI.	Só realiza localização de nós móveis.

## 3. Plataforma

Foi realizada a prototipação da infraestrutura necessária para o funcionamento do algoritmo utilizando o microcomputador *Raspberry Pi 3 Model B*, *dongle* de Barramento Serial Universal (*Universal Serial Bus* - USB) de *Wi-Fi* (802.11), Navio2, e o kit ARF DJI F450 como base do VANT (Veículos Aéreos Não Tripulados).

### 3.1 Raspberry Pi

O *Raspberry Pi* é um computador de baixo custo e do tamanho de um cartão de crédito, que se conecta a um monitor de computador ou TV, e utiliza um teclado e mouse padrão [8]. Para o projeto, foi escolhida a versão 3, principalmente em função da melhora de processamento de dados e por já ter integrado o módulo de *Wi-Fi* (802.11), fazendo desnecessário o uso do *dongle* de Barramento Serial Universal (*Universal Serial Bus* - USB) de *Wi-Fi* (802.11).



### 3.2 Navio2

O *Navio2* é uma placa criada pela Emlid para permitir a criação de VANT's. Construída para pesquisa e educação, e usada em conjunto com a placa *Raspberry Pi*, elimina a necessidade de ter vários controladores a bordo, aumentando a robustez do projeto e facilitando o desenvolvimento.

### 3.3 Veículo Aéreo Não Tripulado

Projetadas inicialmente para fins militares, VANT's são aeronaves que possuem capacidade de voo sem a necessidade de um piloto a bordo.

Foi utilizado no projeto o kit ARF DJI F450 como base do VANT, pois possui um material ultra resistente (*ultra-strong* PA66 + 30GF).

### 3.4 Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado

Segundo a ANAC [9], por não possuir um piloto a bordo, os VANT's necessitam de infraestrutura remota para sua operação, tais como os componentes necessários para a execução do táxi (rota), decolagem/lançamento, voo e pouso/recuperação do veículo, os meios necessários para a realização da missão, a estação de pilotagem remota, software, meios para comunicações e controle, enlaces de dados (*data links*), cargas, equipamentos para lançamento e recuperação, manutenção e suporte.

### 3.5 Simulador de voo e estação de base

Realizou-se um estudo dos principais *softwares* relacionados ao desenvolvimento de plataformas de voos autônomos, sendo os de maior interesse os simuladores de voos e as estações de controle em solo (ECS). Como simulador de voo, optou-se pelo *FlightGear* por ser gratuito e possuir código fonte aberto, permitindo alterações no código para desenvolvimento de pesquisas científicas [1].

Essa infraestrutura permitirá que o algoritmo seja embarcado em um VANT autônomo, que sobrevoará um ambiente *outdoor* controlado sem intervenção humana [1].

## 4. Algoritmo proposto

A estrutura do algoritmo proposto foi dividida em dois algoritmos menores que rodam em *thread* no *Raspberry Pi*, sendo que o primeiro algoritmo é responsável pela coleta de dados de GPS e RSSI do VANT, cálculo de distância estimada e validação a partir da qualidade do sinal, enquanto o segundo algoritmo é responsável pelo cálculo da posição estimada, utilizando o conceito de trilateração (*figura 1*).

No algoritmo 1, a primeira etapa é a captura de dados de GPS, realizada através do controlador de voo *Navio2*, que fornece informações de latitude e longitude do VANT em tempo real. A captura dos dados é colocada dentro de um *loop*, de forma que fique rodando até que alguém force sua parada.

Em seguida, é feito o *scan* de todas as redes disponíveis dentro do raio de alcance do *hardware* através da biblioteca *Wi-Fi* [11], que fornece um conjunto de ferramentas para configurar e conectar as redes *Wi-Fi* (802.11). São capturadas as informações que permitem a identificação da rede (nome e endereço físico) e as informações de RSSI e qualidade do sinal.

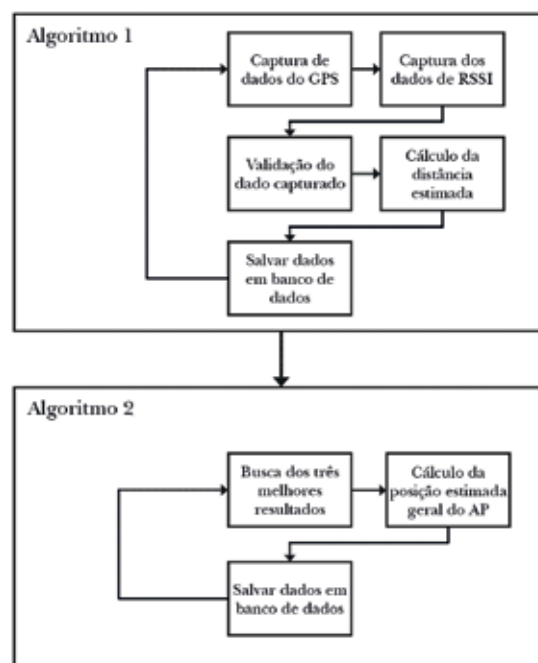


Fig. 1 – Estrutura do algoritmo proposto

Para realizar o cálculo de distância é utilizado a **equação 1**.

$$d = 10^{\frac{RSSI - RSSI_0}{-10n}} \quad (1)$$

Tal que:

- RSSI - Representa o valor da intensidade do sinal a uma distância  $d$  em dBm.
- $RSSI_0$  - Representa o valor da intensidade do sinal a 1 metro de distância em dBm.
- $n$  - Corresponde ao *path loss*.
- $d$  - Distância entre o transmissor e receptor de sinal em metros.

Como na literatura existe pouca explicação de como obter de forma assertiva o valor de  $RSSI_0$ , foi realizado um pequeno experimento para verificar se existe diferença significativa nas leituras de RSSI caso os equipamentos estiverem perto ou longe de uma grande área plana, como o solo. Os testes para determinação dos valores de  $n$  (variável de ambiente) e do valor de  $RSSI_0$  foram feitos em duas etapas, nas quais os equipamentos estavam em contato direto com o solo e em cima de um tripé. O experimento provou que houve uma melhora significativa nas leituras de sinal realizadas quando os roteadores e o receptor estavam a aproximadamente 46 cm do chão, em relação às leituras de sinal realizadas quando os equipamentos estavam encostados no chão.

Em todos os artigos lidos que trabalham em ambientes *outdoors*, os autores atribuem o valor dois para a constante  $n$ , porém, não foi encontrada uma experiência científica que demonstre que valor é o melhor para a constante  $n$ .

Para descobrir o melhor valor de  $n$ , foram realizados os cálculos de distância utilizando os valores de  $n = 2, 2.5$  e  $3$ .

Foi possível verificar que a combinação que apresenta a menor diferença entre a distância real e a estimada acontece quando se utiliza o  $RSSI_0$  igual a  $-30$  dBm,  $n$  igual a  $3$ , e quando os equipamentos não estão em contato direto com uma grande área plana.

Ainda com esse experimento foi possível determinar a partir de quais valores são válidos de RSSI e qualidade, que demonstrou que o erro no cálculo da distância era superior a 40 cm quando os valores de RSSI eram menores que  $-70$  dBm e a qualidade de sinal menor que 41. Logo, foi considerado que todos os sinais captados que possuem o RSSI maior ou igual a  $-70$  dBm e qualidade de sinal maior ou igual a 41 são considerados válidos.

No algoritmo 2, é feito o cálculo de trilateração, que é um método geométrico que permite a localização de um ponto através da distância entre esse ponto e outros três pontos conhecidos, a partir dos três melhores sinais considerados válidos pelo primeiro algoritmo, ou seja, foram verificados os três sinais que possuem os maiores valores de RSSI e qualidade de sinal.

Nesse momento, são usados os dados de geolocalização de pontos distintos e não-complanares para que a solução da equação do sistema da trilateração (**equação 2**) [12] apresente somente um único resultado. Caso o resultado da trilateração possua dois pontos distintos de intersecção entre as circunferências, uma média entre os pontos é tirada. O valor resultante da média é a localização estimada do AP.

$$\begin{cases} d_{A1}^2 = (X - X_{A1})^2 + (Y - Y_{A1})^2 \\ d_{A2}^2 = (X - X_{A2})^2 + (Y - Y_{A2})^2 \\ d_{A3}^2 = (X - X_{A3})^2 + (Y - Y_{A3})^2 \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

- $X$  e  $Y$  correspondem às coordenadas desconhecidas;
- $d_{An}$  indica a distância do dispositivo móvel para cada estação;
- $X_{An}$  e  $Y_{An}$  são as coordenadas das estações fixas, com definindo a referência para os pontos  $A_1, A_2$  e  $A_3$ .

Logo após, é calculada uma média da longitude e latitude das três coordenadas que obtiveram as melhores leituras de RSSI e feita uma média entre o resultado obtido na trilateração e a média dos pontos de longitude e latitude.

Toda a informação obtida e calculada é guardada no banco de dados, o que irá permitir ter um histórico de todos os valores e resultado dos cálculos ao final do voo.

## 5. Resultados

Todos os experimentos válidos da proposta foram realizados em ambientes controlados, em espaços abertos, sem circulação de pessoas e sem grandes construções, visando a comparação da posição estimada pelo algoritmo com a posição real. No momento dos experimentos, as únicas fontes de sinal *Wi-Fi* (802.11) eram dos dois aparelhos utilizados como roteadores de rede.

Os dois aparelhos eram um celular da marca Samsung Note 8 e um roteador da TP-Link TL- R702N Portátil (**tabela 1**). Foram utilizados também dois receptores de rede *Wi-Fi* (802.11), o receptor já presente no *Raspberry Pi* e um *doogle* de Barramento Serial Universal de *Wi-Fi* (802.11)).

**Tab. 1 - Roteadores usados para validação da proposta.**

Roteador	Latitude	Longitude	Distância do chão
Celular Samsung	-22,95527°S	-43,16581°O	152,67 cm
TP-link TL-WR702N	-22,95535°S	-43,16580°O	75,40 cm

Foram feitas o total de 120 leituras no teste de validação da proposta (**tabela 2**), das quais 83 leituras são válidas, ou seja, possuem o RSSI  $\geq -70$  dBm e qualidade de sinal  $\geq 41$ .

**Tab. 2 - Quantidade de leituras feitas para cada roteador versus quantidade de leitura válida.**

Roteador	Quantidade total de leituras	Quantidade Leituras válidas
Celular Samsung	60	36
TP-link TL-WR702N	60	47

O cálculo de trilateração utilizou os três melhores valores de leitura de cada receptor (**tabela 3**).

A partir dos melhores valores, foi feita a média da longitude e da latitude das leituras utilizadas, e do valor obtido da trilateração (**tabela 4**).

**Tab. 3 - As três melhores leituras consideradas válidas para cada roteador ao final do experimento.**

Receptor	Roteador	RSSI	Qualidade de Sinal	Distância calculado
Receptor do <i>Raspberry Pi</i>	Celular Samsung	-54dBm	56	0,16 cm
		-55dBm	55	0,15 cm
		-56 dBm	54	0,14 cm
	TP-link TL-WR702N	-51 dBm	59	0,20 cm
		-55 dBm	55	0,15 cm
		-67 dBm	43	0,06 cm
<i>doogle</i>	Celular Samsung	-47 dBm	63	0,27 cm
		-61 dBm	49	0,09 cm
		-63 dBm	47	0,08 cm
	TP-link TL-WR702N	-41 dBm	69	0,43 cm
		-53 dBm	57	0,17 cm
		-62 dBm	48	0,09 cm

**Tab. 4 - Resultado da solução proposta por receptor.**

Receptor	Roteador	Latitude estimada	Longitude estimada
Receptor do <i>Raspberry Pi</i>	Celular Samsung	-23,12075°S	-43,60682°O
	TP-link TL-WR702N	-22,86113°S	-43,35391°O
<i>doogle</i>	Celular Samsung	-22,90689°S	-43,16517°O
	TP-link TL-WR702N	-23,42572°S	-43,86182°O

Analisando seu resultado foi possível perceber que o erro médio geral foi de 0,43669795 cm (**tabela 5**).

**Tab. 5 - Erro médio entre a posição real e a posição estimada pela solução proposta.**

Tipo de cálculo	Erro médio
Por roteador	39,25 cm
Por receptor	48,09 cm
Erro médio total	43,67 cm

## 6. Conclusões

O objetivo do trabalho foi a criação de um algoritmo implementável, universal e preciso, capaz de estimar a geolocalização de APs sem o seu conhecimento prévio.

O algoritmo criado utilizou-se de métodos matemáticos conhecidos de estimativa de distância e localização como solução, assumindo que a relação entre o RSSI e a distância entre os APs é exponencial, com base igual a 10.

Pode-se concluir que a estimativa da geolocalização dos APs pode ser realizada de maneira satisfatória, desde que o algoritmo consiga se adaptar ao ambiente onde é incorporado.

Uma das grandes dificuldades foi a determinação de quais eram os melhores dados para serem usados nos cálculos. Uma possibilidade de melhoria nos resultados pode ser uma análise mais aprofundada, em tempo de execução, das leituras realizadas que serão utilizadas nos cálculos. Outra possibilidade é o uso do conceito de multilateração, que consiste em utilizar mais de três conjuntos de valores capturados (Posição atual do VANT no momento de

leitura e valor de distância estimada) para o cálculo de geolocalização.

## Agradecimentos

Agradecemos às seguintes instituições, que viabilizaram a realização deste trabalho:

- CAPES (Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior), por conceder uma bolsa de MESTRADO por meio do Edital Pró-Estratégia no 50/2011;
- IME (Instituto Militar de Engenharia), por nos conceder a honra de fazer parte do quadro de alunos e poder completar o programa de Pós-Graduação.

## Referências

- [1] SIQUEIRA, Andresa da Silva. **Algoritmo de localização de rede**. 94 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação) - Instituto Militar de Engenharia, [S. l.], 2017.
- [2] KIM, Minkyong; FIELDING, Jeffrey J; KOTZ, David. **Risks of using AP locations discovered through war driving**. Springer, [S. l.], p. 67-82, 2006. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/11748625\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/11748625_5).
- [3] MACHADO, Joel Filipe. **Localização de Dispositivos Móveis em Redes Wi-Fi**. Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Vila Real, [S. l.], 2007.
- [4] ZHU, Haiping; ZHONG, Xiaoyong; YU, Qianhong; WAN, Yunlong. A localization algorithm for mobile wireless sensor networks. **Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications**, IEEE, [s. l.], p. 81-85, 2013.
- [5] WU, Kaishun; XIAO, Jiang; YI, Youwen; GAO, Min; NI, Lionel. FILA: Fine-grained indoor localization. **Proceedings IEEE INFOCOM**, [s. l.], p. 2210-2218, 2012.
- [6] YANG, Zheng; WU, Chenshu; LIU, Yunhao. Locating in fingerprint space: wireless indoor localization with little human intervention. **Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking**, [s. l.], p. 269-280, 2012.
- [7] PRIETO, Javier; MAZUELAS, Santiago; BAHILLO, Alfonso; FERNANDEZ, Patricia; LORENZO, Rubéns; ABRIL, Evaristo J. Adaptive data fusion for wireless localization in harsh environments. **IEEE Transactions on Signal Processing**, [s. l.], ano 4, v. 60, p. 1585-1996, 2012.
- [8] RASPBERRYPI.ORG, **Raspberry Pi Foundation**. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [9] CIVIL, AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO. **Proposta de instrução suplementar, intitulada "Emissão de certificado de autorização de voo experimental para sistemas de veículo aéreo não tripulado"**, 2012. Disponível em: <http://www2.anac.gov.br/transparencia/consulta2012/01/Justificativa.pdf>
- [10] DJI. **Flame Wheel Arf**. Disponível em: <http://www.dji.com/flame-wheel-arf>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [11] MEZA R.; WAHL G. **Wifi, a Python interface**. Disponível em: <https://wifi.readthedocs.io/en/latest/>. Acesso em: 30 de out. de 2017
- [12] TREVISAN, Luis. **Um Algoritmo de Localização de nós em Redes Sem-Fio Usando Nível de Potência do Sinal**. 94 f. Dissertação (Mestrado em Informática) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2009. Acesso em: 30 de out. de 2017.



# Comportamento à fratura cíclica de um aço inoxidável ASTM 316

Pedro G S Passalini<sup>\*a</sup>, Ricardo P Weber<sup>a</sup>, Paulo F S Filho<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>b</sup>Instituto Federal do Rio de Janeiro (IFRJ), Coordenação de engenharia mecânica, Paracambi, Rio de Janeiro.

\*pedroguilhermes2@hotmail.com

**RESUMO:** O estudo da fractografia de um material é de extrema importância, pois, através do mesmo, é possível chegar a conclusões que indicam o motivo e as condições pelas quais um material pode vir a romper-se. Aços inoxidáveis austeníticos, quando submetidos a carregamentos uniaxiais, com baixas taxas de deformação até a ruptura, apresentam um aspecto macroscópico de fratura dúctil, entretanto, uma análise detalhada por técnicas, como microscopia eletrônica de varredura (MEV), podem mostrar regiões de fratura frágil, o que pode ocorrer pela transformação de fase que os aços austeníticos apresentam quando submetidos à deformação plástica (efeito TRIP) ou pela austenita encruada. Este trabalho tem como objetivo avaliar o aspecto de fratura de um aço inoxidável 316, submetido a carregamento cíclico uniaxial de baixa frequência para fins comparativos, com o aspecto de fratura do mesmo material fraturado em um ensaio de tração, verificando como a mudança do tipo de carregamento pode afetar na morfologia de fratura do material. Os resultados indicam que ambos os tipos de carregamento apresentam fratura dúctil, porém com morfologias diferentes, ou seja, tipo taça e cone para tração, e ruptura em 45° para o ensaio cíclico. Essa diferença indica que a trinca se nucleia em diferentes regiões para cada carregamento, podendo também indicar serem dependentes da quantidade de material encruado e transformado durante cada ensaio.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fractografia. Aço inoxidável ASTM 316. Ensaio cíclico. Ensaio de Tração.

**ABSTRACT:** The study of the fractography of a material is extremely important, because through it is possible to reach conclusions that indicate the reason and the conditions by which a material may break. Austenitic stainless steels, when subjected to uniaxial loads, with low deformation rates, until rupture, have a ductile fracture macroscopic aspect, however, a detailed analysis by techniques such as scanning electron microscopy (SEM) can show fragile fracture regions, which can occur due to the phase transformation that austenitic steels present when subjected to plastic deformation (TRIP effect) or by hardened austenite. This work aims to evaluate the fracture aspect of a 316 stainless steel, subjected to low frequency uniaxial cyclic loading for comparative purposes with the fracture aspect of the same fractured material in a tensile test, verifying how the type of loading changes can affect the fracture morphology of the material. The results indicate that both types of loading have ductile fractures, but with different morphologies, that is, cup and cone type for traction and 45° rupture for the cyclic test. This difference indicates that the crack is nucleated in different regions for each load, and may also indicate that they are dependent on the amount of material hardened and transformed during each test.

**KEYWORDS:** Fractography. Stainless Steel. ASTM 316. Cyclic test. Tensile test.

## 1. Introdução

O aço inoxidável ASTM 316 possui um importante papel na indústria devido à sua excelente resistência à corrosão [1][2] e ótima ductilidade [3]. É empregado em diversos setores, como petroquímico, alimentício, de equipamentos farmacêuticos, transporte de água, armamento, entre outros [4][5].

O aço inox 316 possui microestrutura austenítica [6], que, sendo metaestável [7], quando submetida à deformação plástica, tende a sofrer uma transformação microestrutural, ou seja, transformar a microestrutura

austenítica em martensítica, mais frágil. Este processo é conhecido por efeito TRIP (plasticidade induzida por transformação de fase), sendo observado pela primeira vez por volta de 1950 [8][9].

Diversos estudos indicam que o efeito TRIP tem a capacidade de reduzir significativamente as trincas produzidas por fadiga no aço com microestrutura austenítica [7][10][11][12], provavelmente devido à mudança microestrutural ocorrida durante sua deformação, indicando um maior efeito quanto maior for a deformação ocorrida no material [13].

Li *et al.*, 2021 [14] realizaram ensaios monótonos de tração em um aço inoxidável 308L. Analisando

tanto macroscopicamente quanto microscopicamente o aspecto da fratura do material, concluíram que este foi rompido por fratura dúctil. Foi observado na microscopia eletrônica de varredura (MEV) vazios (“dimoles”) na superfície de fratura do corpo de prova, indicando uma fratura dúctil do material.

Lall *et al.*, 2021 [15] observaram regiões fibrosas com presença abundante de vazios, típicas de fratura dúctil, no centro da superfície de fratura de um aço inoxidável austenítico ASTM 709, submetido a um ensaio de tração, bem como regiões de clivagem nas bordas de tal superfície, caracterizando uma região de fratura frágil [15].

Ensaio de baixo ciclo uniaxiais e altas amplitudes de deformação foram realizados por Alsmadi *et al.* 2020 [16] em um aço austenítico 709. Foram observadas três regiões: a primeira foi identificada como o ponto de nucleação da trinca, a segunda como regiões de estrias, isto é, de propagação das trincas, e a terceira como regiões de sobrecarga com aspecto dúctil, indicado pela presença de vazios [16].

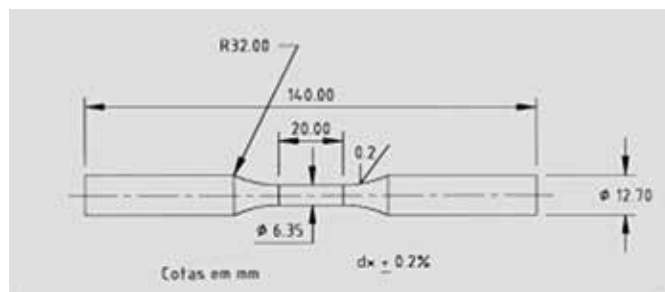
Esta pesquisa tem como objetivo avaliar e comparar o aspecto de fratura do aço inoxidável austenítico ASTM 316, ensaiado monotomicamente à tração e ensaiado ciclicamente, a fim de verificar se houve mudança fractográfica em função do tipo de carregamento empregado.

## 2. Material e métodos

O material empregado neste trabalho foi o aço inoxidável ASTM 316. Sua composição química é descrita na **tabela 1**. Foram produzidos corpos de provas (CP) de acordo com a norma E606-92/12 [17] para ensaios uniaxiais e cíclicos. As dimensões dos CPs são apresentadas na **figura 1**

**Tab. 1** – Composição química do aço inoxidável ASTM 316.

Ele.	C	Si	Mn	P	S
%p	0,018	0,33	1,44	0,035	0,025
Ele	Co	Cr	Ni	Cu	N
%p	0,09	17,0	10,16	0,25	0,064



**Fig. 1** – Dimensões do CP. Fonte: [17].

Os ensaios de tração e cíclico foram realizados em uma máquina servo-hidráulica, modelo Shimadzu Servopulser (**figura 2**), com 5 Mpa de pressão nas garras. No ensaio de tração, foi utilizado um extensômetro modelo Dynastain. O ensaio cíclico foi controlado pelas forças máximas e mínimas de 14kN e -14kN (tração x compressão), variando, assim, a deformação em uma frequência de 0,075Hz até a ruptura.



**Fig. 2** – Máquina universal de ensaios utilizada neste trabalho.

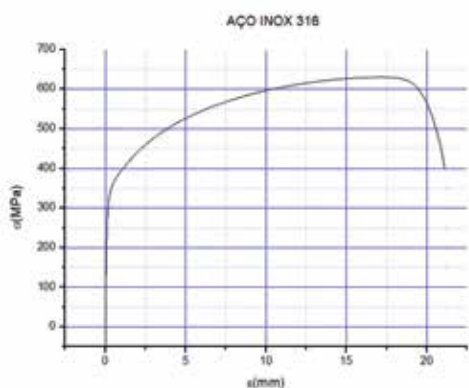
As análises dos aspectos de fratura para ambos os ensaios realizados foram feitas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Utilizando detector de elétrons secundários a uma tensão de aceleração de 10,00kV e “spot size” de 5.0.

### 3. Resultados e discussões

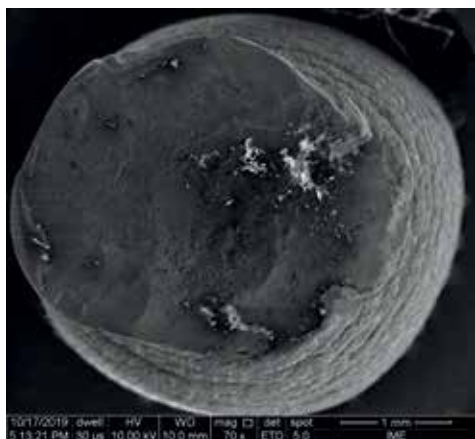
#### 3.1 Ensaio de tração

A curva, obtida pelo ensaio de tração, é apresentada na **figura 3**. O resultado expressa o comportamento típico de um material dúctil [18].

A **figura 4** mostra a fratura para o ensaio de tração, onde é possível a verificação da morfologia taça e cone, típica de fratura dúctil [19], com regiões de clivagem nas bordas, o que mostra que a nucleação da trinca partiu do centro do CP [20]. Em uma análise mais aproximada (**figura 5**), é possível a identificação de dimples, que indicam regiões de fratura dúctil, e de pontos de clivagem, que indicam fratura frágil [21]. Esses pontos podem ter sido formados pela austenita encruada ou por uma fração do material transformado pelo efeito TRIP [22].



**Fig. 3** – Curva tensão x deformação para o material ensaiado a tração.



**Fig. 4** – Micrografia, obtida por MEV para a fratura do aço em estudo submetido a tração.

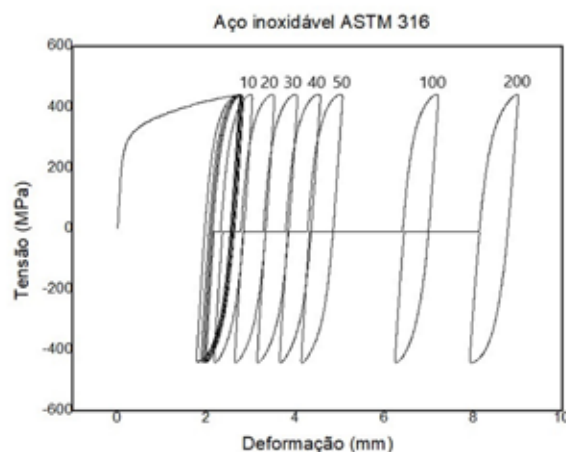


**Fig. 5** – Micrografia aproximada, obtida por MEV para a fratura do aço em estudo submetido a tração.

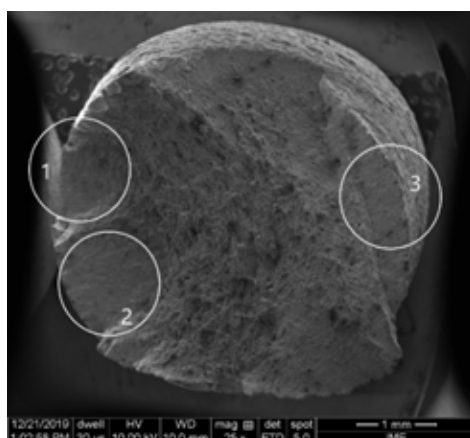
#### 3.2 Ensaio cíclico

A curva característica obtida no ensaio cíclico é apresentada na **figura 6**. O carregamento cíclico foi realizado a uma tensão acima da tensão de escoamento do material, o que fez com que este se rompesse com 220 ciclos.

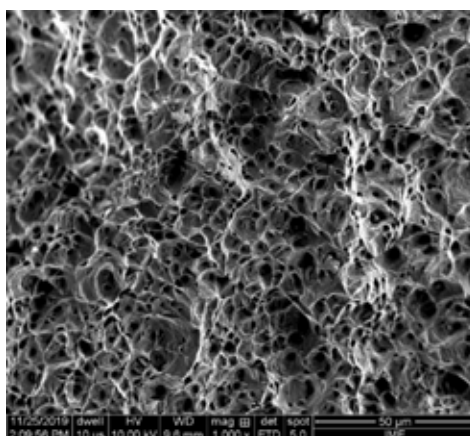
Observa-se, na superfície de fratura do material ensaiado ciclicamente, três regiões (1,2,3) com aspecto de fratura por cisalhamento, apresentando inclinação de 45° (**figura 7**) [23]. Uma imagem aproximada (**figura 8**) destas regiões indica a presença de vazios [24].



**Fig. 6** – Curva tensão x deformação para o material ensaiado ciclicamente (acima de cada ciclo formado é indicado seu número).



**Fig. 7** – Micrografia obtida por MEV para para a fratura do aço em estudo submetido a ensaio cíclico.



**Fig. 8** – Micrografia aproximada, obtida por MEV para a fratura do aço em estudo submetido a ensaio cíclico.

## 4. Conclusão

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que os aspectos microscópicos para ambos os ensaios foram de fratura dúctil, porém se diferenciaram em sua morfologia, sendo tipo taça e cone para tração, e ruptura em 45° para o ensaio cíclico. Essa diferença indica que a trinca se nucleia em regiões diferentes para cada tipo de carregamento,

podendo também ser dependente da quantidade de material encruado e transformado durante cada ensaio, o que influencia diretamente em como as trincas irão se propagar.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao IME e à UFF pela estrutura disponibilizada e à CAPES pelo suporte financeiro.

## Referências

- [1] ABBAS, A. T.; ANWAR, S.; ABDELNASSER, E.; LUGMAN, M.; QUDEIRI, J. E. A.; ELKASEER, A. Effect of different cooling strategies on surface quality and power consumption in finishing end milling of stainless steel 316; **Materials**, 14, 903, 2021.
- [2] HOPPIUS, J. S.; KUKREJA, L. M.; KNYAZEVA, M.; PÖHL, F.; WALTHER, F.; OSTENDORF, A.; GUREVICH, E. L. On femtosecond laser shock peening of stainless steel AISI 316; **Applied Surface Science**, 435, 2018, pp.1120-1124.



- [3] XIONG, Y.; YUE, Y.; LU, Y.; HE, T.; FAN, M.; REN, F.; CAO, W. Cryorolling impacts on microstructure and mechanical properties of AISI 316 LN austenitic stainless steel; **Materials Science & Engineering: A.**, 709, 2018, pp. 270-276.
- [4] WILLIAMS, D. F.; KELLAR, E. J. C.; JESSON, D. A.; WATTS, J. F. Surface analysis of 316 stainless steel teated with cold atmospheric plasma; **Applied Surface Science**, 403, 2018, pp. 240-247.
- [5] HUTLI, E.; NEDELJKOVIC, M.; BONYÁR, A. Controlled modification of the surface morphology and roughness of stainless steel 316 by high speed submerged cavitating water jet; **Applied Surface Science**, 458, 2018, pp. 293-304.
- [6] ZHAO, J.; JIANG, Z. Thermomechanical processing of advanced high strength steels; **Progress in Materials Science**, 94, 2018, pp. 174-242.
- [7] MARTELO, D. F.; MATEO, A. M.; CHAPETTI, M. D.; Fatigue crack growth of a metastable austenitic stainless steel; **International Journal of Fatigue**, 80, 2015, pp. 406-416.
- [8] NISHIYAMA, Z. **Martensitic Transformation**. New York: Academic Press, 1978.
- [9] ONUKI, Y.; SATO, S. In situ observation for deformation-induced martensite transformation during tensile deformation of SUS 304 stainless steel by using neutron diffraction part II: transformation and texture formation mechanisms. **Quantum beam science**, 5, 6, 2021.
- [10] PINEAU, A. G.; PELLOUX, R. M. Influence of strain-induced martensitic transformation on fatigue crack growth rates in stainless steels; **Metall Matter Trans B**, 5, 1974, pp. 1103-1112.
- [11] MARTELO, D.F.; MATEO, A.; CHAPETTI, M.D. Crack closure and fatigue crack growth near threshold of a metastable austenitic stainless steels; **Metall. Trans. A**, 21, 1990.
- [12] MEI, Z.; MORRIS, J. W. Influence of deformation-induced martensite on fatigue crack propagation in 304-type steels. **Metall. Mater Trans. A**, 21, 1990, pp. 3137-3152.
- [13] JAMBOR, M.; VOJTEK, T.; POKORNÝ, P.; SMÍD, M. Effect of solution annealing on fatigue crack propagation in the AISI 304L TRIP steel. **Materials**, 14, 1331, 2021.
- [14] LI, Y.; LUO, Y.; LI, J.; SONG, D.; XU, B.; CHEN, X. Ferrite formation and its effect on deformation mechanism of wire arc additive manufactured 308L stainless steel. **Journal of Nuclear Materials**, 550, 3115, 2021.
- [15] LALL, A.; BOWEN, P.; RABIEI, A. Effect of aging on failure mechanism of alloy 709 at various temperatures. **Materials Characterization**, 171, 1044, 2021.
- [16] ALSMADI, Z. Y.; ALOMARI, A.; KUMAR, N.; MURTY, K. L. Effect of hold time on high temperature creep-fatigue behavior of Fe-25Ni-20Cr (wt.%) austenitic stainless steel (alloy 709). **Materials Science & Engineering A**, 771, 921, 2020.
- [17] ASTM; **Standard test method for strain-controlled fatigue testing**, [S.I.], 2-5, p.10, 52. 2012.
- [18] LIU, Y.; YANG, y.; MAI, S.; WANG.; SONG, C. Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder. **Materials and Design**, 87, 2015, pp. 797-806.
- [19] CARLTON, H. D.; HABOUB, A.; GALLEGOS, G. F.; PARKINSIN, D. Y.; Macdowell, A. A. Damage Evolution and failure mechanisms in additively manufactured stainless steel. **Materials Science & Engineering A**, 651, 2016, pp.406-414.
- [20] ZHONG, Y.; RÄNNAR, L.; LIU, L.; KOPTYUG, A.; WIKMAN, S.; OLSEN, J.; CUI, D.; SHEN, Z. Additive manufacturing of 316L stainless steel by electron beam melting for nuclear fusion applications. **Journal of Nuclear Materials**, 486, 2017, pp.234-245.
- [21] ZHAO, Y.; LEE, D.; SEOK, M.; LEE, J.; PHANIRAJ, M. P.; SUH, J.; HA, H.; KIM, J.; RAMAMURTY, U.; JANG, J. Resistance of CoCrFeMnNi high-entropy alloy to gaseous hydrogen embrittlement. **Scripta Materialia**, 135, 2017, pp. 54-58.
- [22] ORTWEIN, R.; RYS, M.; SKOCZEN, B. Damage Evolution in a stainless steel bar undergoing phase transformation under torsion at cryogenic temperatures. **International Journal of Damage Mechanics**, 25, 2016.
- [23] SUN, Q.; JIANG, F.; DENG, L.; XIAO, H.; LI, L.; LIANG, M.; PENG, T.; Uniaxial fatigue behaviour of Cu-Nb micro-composite conductor, part I: Effect of peak stress and stress ratio. **International Journal of Fatigue**, 91, 2016, pp. 275-285.
- [24] TRÁVNÍČEK, L.; KUBENA, I.; MAZÁNOVÁ, V.; VOJTEK, T.; POLÁK, J.; HUTAR, P.; SMÍD, M. Advantageous description of short fatigue crack growth rates in austenitic stainless steels with distinct properties. **Metals**, 11, 475, 2021.

# Análise termofluida temporal - Uma abordagem analítica

W E Sousa<sup>\*a</sup>, S O Vellozo<sup>\*b</sup>, R G Cabral<sup>\*c</sup>,

<sup>\*Seção de Engenharia Nuclear, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil,</sup>

<sup>a</sup>walinton.evangelista@ime.eb.br, <sup>b</sup>vellozo@cbpf.br, <sup>c</sup>rgcabral@ime.eb.br

**RESUMO:** Esse trabalho analisa dois transientes postulados do European Sodium Fast Reactor (ESFR). Tanto as equações de condução de calor da pastilha de combustível até o refrigerante, no caso, o sódio, assim como as equações da Cinética Pontual, são utilizadas para estimar a potência ou a distribuição de temperatura no canal do combustível. Dois acidentes postulados do ESFR foram utilizados como benchmark. Os maiores desvios percentuais verificados ficaram abaixo de 13%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reator Regenerador, Análise Termofluida Temporal, Cinética de reatores.

**ABSTRACT:** Two postulated transients of the European Sodium Fast Reactor (ESFR) are analyzed. Both the heat conduction equations from the fuel pellet to the coolant, in this case, sodium, as well as the Point Kinetics equations are used to estimate the power or temperature distribution in the fuel channel. Two postulated ESFR transients were used as a benchmark. The highest percentage deviations found were below 13%.

**KEYWORDS:** Regenerating Reactor, Temporal Thermofluid Analysis, Reactor Kinetics

## 1. Introdução

Para o bom funcionamento de um reator nuclear, é necessário que todo o calor gerado no núcleo seja removido na mesma taxa em que é gerado. Isso caracteriza o estado “estacionário”. O agente responsável por essa remoção de calor é o refrigerante, que pode ser líquido ou gasoso. Entretanto, durante a operação, para atender a demanda de energia diária, o nível de potência do reator pode aumentar ou diminuir, caracterizando os “transientes operacionais”. Esses transientes acontecem de forma intencional e programada, momentaneamente, quando se varia o nível de potência do reator, gerando, assim, um desequilíbrio entre as taxas de produção e remoção de calor no núcleo.

Em outras situações, esse desequilíbrio ocorre de forma não intencional ou programada e o reator deve responder, prontamente, para que o equilíbrio se restabeleça sem danificar nenhum componente. A isso chamamos de “incidente”.

Em uma situação mais extrema, esse desequilíbrio entre produção e remoção de calor pode ocasionar danos irreversíveis ao núcleo, como, por exemplo,

a ruptura do revestimento da vareta de combustível, fusão e etc. A isso denomina-se “acidente”. O Sistema de Remoção de Calor do reator tem que assegurar a proteção do reator em qualquer evento severo.

### 1.1 Trabalhos Relacionados

Seguindo a linha inovadora, o IME, nos últimos anos, vem desenvolvendo um projeto conceitual de um reator regenerador de espectro rápido, sem urânio enriquecido, com o intuito de viabilizar a implementação desse reator no parque nuclear brasileiro, o que tem demandado a realização de cálculos precisos para a determinação do coeficiente de reatividade de vazios para o reator de espectro rápido FBR-IME e a análise termo hidráulica do Sódio.

Num primeiro estudo, foi elaborado o projeto conceitual de um Reator Rápido Regenerador Refrigerado a Sódio Líquido, independente da tecnologia de enriquecimento. Utiliza como combustível a mistura de óxidos (MOX), sendo a parcela referente ao plutônio e proveniente dos rejeitos de Reatores Térmicos. Todo urânio utilizado, tanto no combustível quanto no envoltório fértil, possui U-235 em seu teor natural. Foi utilizado para o desenvolvimento do projeto o sistema computacional

SCALE 6, do *Oak Ridge National Laboratory*. O reator projetado possui um pequeno núcleo heterogêneo, comum sistema de remanejamento de combustível ao final de seus ciclos de 360 dias [1].

Em um segundo trabalho, realizou-se a análise global do coeficiente de reatividade de vazios para o reator de espectro rápido FBR-IME. Para isso, modelou-se o reator FBR no sistema SCALE 6.1. Com base nas pesquisas e trabalhos anteriores, determinou-se a metodologia de inserção de vazio, a reatividade de cada configuração, os coeficientes de reatividade de vazios em diferentes configurações e o patamar de segurança do projeto FBR com relação ao coeficiente de reatividade de vazio [2].

Em prosseguimento, num terceiro trabalho, realizou-se a análise preliminar termofluida do sódio do reator de espectro rápido FBR-IME [3].

## 2. Transferência de calor

Foram calculados os perfis de temperatura, tendo como ponto de partida o eixo central da pastilha de combustível, no qual ocorre a máxima temperatura até a superfície do revestimento. Do revestimento em diante, o calor é removido pelo processo de convecção e um conjunto de propriedades físicas, geométricas e o escoamento do fluido garantirão este processo.

A realização da análise do canal quente do núcleo do reator rápido, resfriado a sódio, não difere de um reator comum. O calor gerado pelas pastilhas de combustível chega à superfície do revestimento (*Clad*).

Nem todo calor gerado nas pastilhas de combustível consegue ser retirado totalmente pelo refrigerante. Pode haver pontos específicos onde a taxa de calor gerado seja maior que a taxa de calor retirado pelo refrigerante. As análises destes casos serão realizadas nas próximas seções.

### 2.1 O Balanço de energia no combustível

Nesta seção, será apresentado, de forma breve, o desenvolvimento da distribuição de temperatura no estado estacionário e transiente.

#### 2.1.1 O estacionário

A equação de balanço estabelece que o calor que foge de um elemento de volume tem que ser igual ao que é produzido. Conforme a expressão da Equação 1:

$$K_f \nabla^2 f(r) + Q_0 = 0 \quad (1)$$

A solução da Equação 1 é a distribuição de temperatura dentro do combustível (Equação 2):

$$f(r) = T_{cl} - \frac{Q_0}{4K_f} r^2 \quad (2)$$

Onde  $T_{cl}$  é definido como a temperatura da linha central do combustível;  $Q_0$  é a densidade de potência naquela região;  $K_f$  é o coeficiente de condução de calor do combustível; e  $r$  é a distância da linha central.

Portanto, a distribuição de temperatura no equilíbrio é uma parábola perfeita.

#### 2.1.2 O transiente

O desequilíbrio entre a produção de calor e a sua remoção leva à variação da temperatura nas diversas regiões do canal da célula de combustível. A equação da condução de calor no combustível se escreve como (Equação 3):

$$\rho_f c_p \left( \frac{\partial T_f(r,t)}{\partial t} \right) = K_f \nabla^2 T_f(r,t) + Q(t) \quad (3)$$

Onde  $\rho_f$  é a densidade média;  $c_p$  é o calor específico;  $K_f$  é o coeficiente de condução de calor médio no combustível;  $Q(t)$  é a densidade de potência; e  $T_f(r, t) = f(r) T_f(t)$  é a distribuição de temperatura no combustível.

Usando separação de variáveis para resolvermos a equação diferencial parcial (Equação 3), chegamos à solução geral final temporal, que fica da seguinte forma (Equação 4):

$$T_f(t) = e^{at} \left\{ T(0) + b \int_0^t e^{a't'} Q(t') dt' \right\} \quad (4)$$

onde  $T(0) = 1, a = \frac{Q_0}{\rho_f c_p \langle f \rangle}; b = \frac{1}{\rho_f c_p \langle f \rangle};$

$\langle f \rangle = T_i - \frac{Q_0}{8K_f} R_f^2$ ; e  $R_f$  é o raio da pastilha de combustível.

A forma da taxa de geração de calor vai definir o perfil da evolução temporal da temperatura, e a Equação 4 é o cerne dessa evolução.

## 2.2 O Revestimento

### 2.2.1 O estacionário

Na ausência de fonte, a equação da condução de calor toma a seguinte forma (Equação 5):

$$K_{rv} \nabla^2 T_{rv}(r) = 0 \quad (5)$$

Resolvendo a Equação 5, e realizando algumas manipulações algébricas, chega-se à seguinte expressão para a distribuição de temperatura no revestimento, em que  $T_{rv}(r)$ , pode ser escrita como mostra a Equação 6:

$$T_{rv}(r) = T_0 - \frac{Q_0 R_{rv}^2}{2} \left\{ \frac{r - R_f}{R_f} \frac{1}{K_{rv}} + \frac{1}{2K_f} \right\} \quad (6)$$

Onde  $T_0$  é a temperatura inicial,  $Q_0$  é a densidade de potência naquela região;  $R_{rv}$  é o raio do revestimento;  $R_f$  é o raio da pastilha de combustível;  $K_{rv}$  é o coeficiente de condução de calor médio no revestimento;  $K_f$  é o coeficiente de condução de calor médio no combustível; e  $r$  é o raio.

### 2.2.2 O transiente

Trata-se aqui da evolução temporal da distribuição de temperatura no revestimento. A Equação 7 mostra o modelo:

$$\rho_{rv} c_{rv} \left( \frac{\partial T_{rv}(r,t)}{\partial t} \right) = K_{rv} \nabla^2 T_{rv}(r,t) \quad (7)$$

Considerando a continuidade da temperatura e do fluxo de calor em  $R_f$ , a solução da Equação 7, após simplificação, toma a seguinte forma (Equação 8):

$$T_c(r,t) = T_f(t) \left\{ f_f(R_f) + m(r - R_f) \right\} \quad (8)$$

Observando a Equação 8, vê-se que a  $T_f(t)$  do combustível é que determina a evolução temporal da distribuição de temperatura no revestimento. Além disso, o coeficiente angular dessa distribuição,  $m = \frac{K_f}{K_c} \frac{df_f(R_f)}{dr}$ , depende da razão entre os coeficientes de condução de calor do combustível e do revestimento.

## 2.3 Equações de Calor para o Refrigerante

Essa seção trata da distribuição de temperatura no refrigerante e do processo de convecção e condução do calor do revestimento para o refrigerante.

A equação que descreve a distribuição de temperatura no refrigerante adquire a seguinte forma (Equação 9):

$$(\rho c_p)_{fl} \left( \frac{\partial T_{fl}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T_{fl} \right) = K_{fl} \nabla^2 T_{fl} \quad (9)$$

Nessa equação,  $\rho$  representa a densidade média do fluido refrigerante,  $c_p$  é o calor específico a pressão constante;  $\vec{v}$  é a velocidade média de escoamento desse fluido;  $K_{fl}$  é o coeficiente de condução de calor; e  $T_{fl}$  é a distribuição de temperatura dentro do refrigerante.  $T_{fl}$  depende das variáveis  $r, z$  e  $t$ , ou seja,  $T_{fl} = T_{fl}(r, z, t)$ .

### 2.3.1 O regime estacionário

Para o regime estacionário, a equação de balanço de energia é suficiente para a determinação da distribuição axial da temperatura do refrigerante. A integração no elemento de volume do refrigerante  $dV = 2\pi r dr dz$  deixará a temperatura com dependência somente em  $z$ . Desse modo, escreve-se a Equação 10:

$$dz \frac{dQ}{dt} = \dot{m} c_{fl} \frac{dT_{fl}}{dz} = q(z) dz \quad (10)$$

onde  $q(z) = q_0 \cos\left(\frac{\pi}{H} z\right)$ ;  $q_0 = Q_0 \pi (R_f)^2$ ;  $\dot{m} = v_z A \rho_{fl}$  é a vazão mássica;  $\rho_{fl}$  é a densidade do sódio líquido refrigerante; e  $A$  é a área transversal do canal.

A integração na parte ativa do canal leva à seguinte solução (Equação 11):



$$T_{fl} = T_m - \frac{Q_0 \tilde{H}}{\dot{m} c_{fl} \pi} \left\{ \operatorname{sen} \left( \frac{\pi}{\tilde{H}} z \right) + \operatorname{sen} \left( \frac{\pi H}{2 \tilde{H}} \right) \right\} \quad (11)$$

Onde  $\tilde{H}$  é o comprimento extrapolado da vareta  $H$  e é o comprimento real. Lembrando que, no regime estacionário, todo o calor gerado no combustível deve chegar ao refrigerante, sendo que esse calor pode ser contabilizado pela densidade linear de potência  $q(z) = q_0$ , onde  $q_0 = Q_0 \pi (R_f)^2$ .

### 2.3.2 O Regime transiente do Refrigerante

O estudo da evolução temporal do refrigerante é bastante simplificado devido ao fato do metal líquido possuir um coeficiente de condução de calor muito alto quando comparado com os outros materiais, como o sódio, por exemplo, cuja condutividade térmica é cerca de  $76,6 \frac{W}{Km^2}$  a  $400^\circ C$ . Em contraste, a condutividade da água varia entre  $0,6 \frac{W}{Km^2}$  a  $20^\circ C$  e  $0,465 \frac{W}{Km^2}$  a  $350^\circ C$  (sob uma pressão de 150 bar). Já a condutividade do sódio é 100 a 150 vezes mais alta do que a pressão atmosférica [4]. Portanto, rapidamente a temperatura se equaliza no elemento de volume transversal ao eixo axial. Em consequência, considerar uma temperatura média em cada volume elementar axial é perfeitamente válido [6][7].

A transferência de calor do revestimento para o refrigerante será representada por um coeficiente de convecção  $h_s \left[ \frac{W}{Km^2} \right]$ . O fluxo de calor por unidade de área é então determinado pelo produto entre o coeficiente de transferência de calor e a diferença entre a temperatura da parede do revestimento e a temperatura média do refrigerante (lei de resfriamento de Newton). Conforme mostra a Eq.12.

$$\dot{q}'' = h_s (T_{rv}(R_{rv}) - T_{fl}) \quad (12)$$

O coeficiente de convecção é calculado por  $h_s = k_s \frac{Nu}{D_h}$ , onde  $k_s$  é o coeficiente de condução de calor do sódio;  $D_h$  é o diâmetro hidráulico; e  $Nu$  é o número de Nusselt para cada arranjo de montagem de combustível, cuja correlação é dada por Todreas e Kazimi,  $Nu = 7 + (0,025)(Pr)(Re)$ , onde  $Pr$  e  $Re$  são os números de Prandtl e Reynolds, respectivamente.

## 3. O reator ESFR

O ESFR [8] é um reator regenerador de espectro rápido em desenvolvimento na Europa. Ele utiliza combustível à base de óxidos de urânio e plutônio. A potência do reator é de 3600 MWth e o comprimento ativo do núcleo é de apenas 1m. As principais características deste projeto, para fins de modelagem neutrônica, podem ser encontradas na referência [9]. Os dados utilizados nas simulações encontram-se nas tabelas 01 e 02. Nela, dois acidentes importantes são analisados utilizando o código AZTH- LIM. Ele modela os processos de transferência de calor no refrigerante (metal líquido) do reator rápido ESFR, considerando os fenômenos de transferência de calor na barra de combustível e os processos de neutrônicos. O primeiro acidente trata-se da ejeção de uma barra absorvedora com a introdução de 175 pcm de reatividade. Ele é designado como *Unprotected Transiente-Over-Power* (UTOP). O segundo acidente trata-se da perda de 50% da potência de bombeamento da bomba e é designado como *Unprotected Loss-Of-Flow Thermofluid* (ULOF). Os resultados, *benchmark*, desses acidentes postulados e calculados [8] serão usados como base de comparação nas simulações analíticas do presente trabalho.

A **Tabela 1** mostra os principais parâmetros do reator Europeu adotados nas simulações.

**Tab. 1** – Principais parâmetros do ESFR

Potência	3600 MWth	Raio do furo central	0,1257 cm
Altura ativa	1,00566 m	Raio do combustível	0,4742 cm
Temp. de entrada	668,15 K	Raio do revestimento	0,5419 cm
Temp. de saída	818,15 K	Passo	1,1897 cm
Temp. média do comb.	818,15 K	Células por EC	271un
Vazão mássica	19000 kg/s	Número de EC	453un

A **Tabela 2** resume as propriedades do combustível.

**Tab. 2** – Propriedades do combustível do ESFR

Propriedades	Correlação
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f = \frac{11043,5}{(0,99672 + 1,179 \times 10^{-5}T - 2,428 \times 10^{-9}T^2 - 1,219 \times 10^{-9}T^3)^3}$
Calor específico (J/kg K)	$C_f = 0,85 \times \left( \frac{0,998 \times 10^6 A}{(A-1)T^2} + 1,6926 \times 10^{-2}T + \frac{1,620 \times 10^{12}}{T^2} \right) + 0,15 \times \left( \frac{111,275 \times 10^{12} B}{(B-1)T^2} + 2,9358 \times 10^{-2}T \right)$
Coef. Transf. de calor (W/m K)	$K_f = 1,158 \times \left( \frac{1}{0,1205 + 2,6455 \times 10^{-2}T} + \frac{6400e^{\frac{-16,35}{\tau}}}{\tau^{\frac{5}{2}}} \right)$ $A = e^{\frac{548,68}{T}}; B = e^{\frac{-18541,7}{T}}; \tau = \frac{T}{1000}$

## 4. Simulações analíticas

Nas simulações analíticas, a Equação 4 desempenha um papel fundamental na descrição da evolução temporal. Os dois transientes serão investigados e comparados com os resultados do ESFR tomados como referência, *benchmark*.

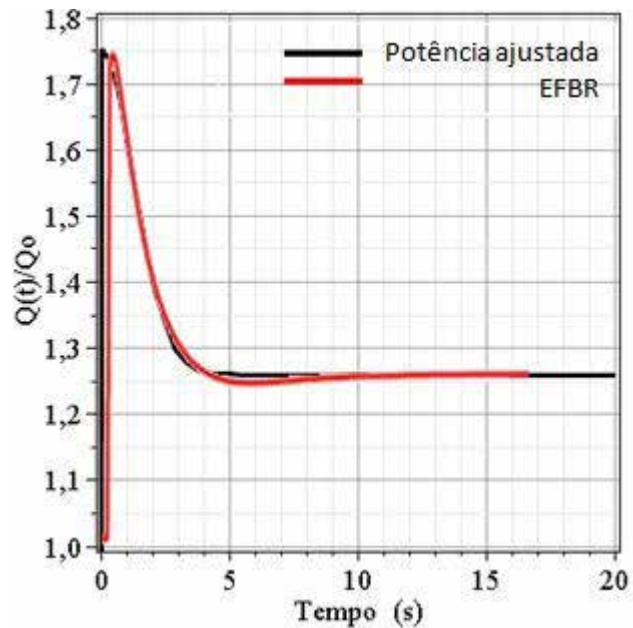
### 4.1 Inserção de 175 pcm devido à ejeção de barra

A função  $T(t)$ , Equação 4, que descreve a evolução temporal, deve ser calculada com base na forma de  $Q(t)$ . Essa última é obtida pelo ajuste à curva de potência do ESFR. Seguindo essa direção, a função ajustada tem o seguinte aspecto:

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = 1,26 + 0,49e^{-0,3t^2} \quad (13)$$

A comparação entre o ajuste e o *benchmark* pode ser apreciada na **Figura 1**, a seguir:

A temperatura média do combustível, calculada no ESFR, pode ser vista na **Figura 2**, (curva em vermelho). Note que o transiente inicia-se em aproximadamente 5s e a temperatura atinge um máximo de aproximadamente 1700 K, estabilizando pouco abaixo desse valor.



**Fig. 1** – Perfil da potência normalizada ajustada para uma inserção de reatividade de 175 pcm.

Na **Figura 2**, pode-se observar que o modelo analítico se mostra conservador, excedendo em pouco mais de 100 K o valor máximo da temperatura média do combustível, e estabilizando pouco acima de 1800 K, (curva em preto). Isso representa uma

diferença aproximada de 6% em relação ao resultado do EFSR com *benchmark*, se toda a amplitude de temperatura for considerada.

É interessante ressaltar que o modelo analítico representou, qualitativamente, com razoável fidelidade, a inércia da temperatura média caracterizada pelo pico inicial da curva.

A **Figura 2** mostra as temperaturas médias do combustível, simuladas com o modelo analítico proposto e com os dados do ESFR.

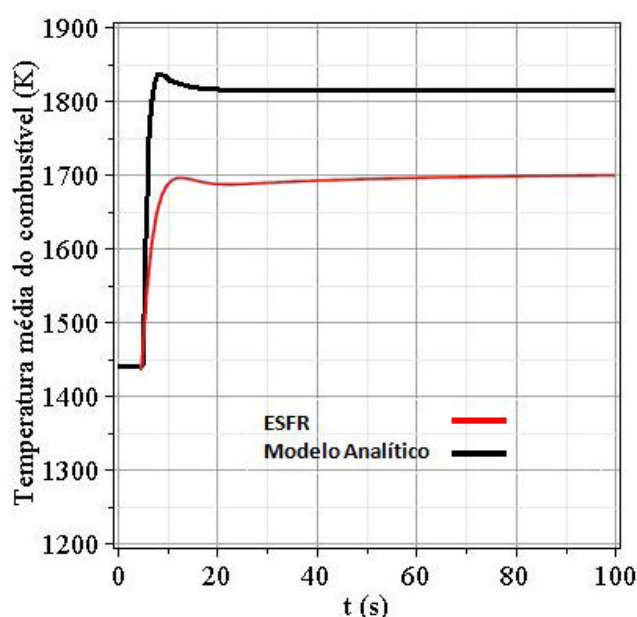


Fig. 2 – Temperatura média do combustível.

## 4.2 Perda de 50% da vazão

O segundo transiente estudado refere-se à perda de vazão no canal de combustível. A **Figura 3** exibe as curvas da distribuição axial de temperatura no sódio na situação de vazão normal e com uma perda de

50% para o ESFR, calculada pelo código AZTHLIM. A temperatura na ponta do canal chega a 881,35 K.

O modelo analítico mantém a tendência conservadora. A **Figura 3** mostra, também, o comportamento da distribuição de temperatura nos casos de vazão normal e com uma perda de 50% de vazão. A temperatura na ponta do canal chegou a pouco mais de 950 K. Isso representa uma diferença de aproximadamente 13% em relação ao ESFR.

A **Figura 3** mostra a temperatura axial do sódio para uma perda de 50% de vazão.

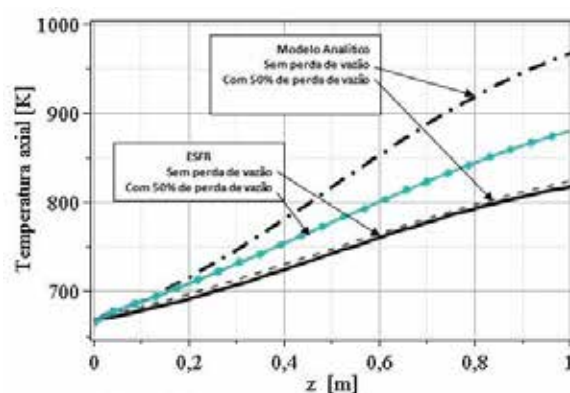


Fig. 3 - Temperatura axial do sódio para uma perda de 50% de vazão estimada pelo modelo analítico e pelo código AZTHLIM.

## 5 Conclusão

Embora os resultados analisados apresentem desvios menores do que 13% em relação ao reator europeu ESFR, usado como benchmark, o modelo analítico é limitado. Sabendo disso, é possível fazer análises rápidas quando o objetivo maior é conhecer os limitantes superiores para um transiente. Posteriormente, uma análise conduzida por um modelo detalhado e resolvido numericamente vai estabelecer os valores confiáveis, trazendo economia ao projeto.

## Referências

- [1] OLIVEIRA, Aline Alves. **Reator rápido regenerador independente de urânio enriquecido**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2014.
- [2] LIMA, Fabiano Petruceli Coelho. **Análise global do coeficiente de reatividade de vazios para o reator de espectro rápido FBR-IME**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018.
- [3] VELOSO, Marta Jan. **Análise termofluida preliminar do reator de espectro rápido FBR-IME**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018.

- [4] BALDEV Raj, et al. **Sodium Fast Reactors with Closed Fuel Cycles**, CRC Press. Florida: Taylor and Francis-Group, 2015.
- [5] BERTHOUD, et al.,. **Sodium-cooled nuclear reactors**. France: Editions Le Moniteur, 2014.
- [6] WALTAR, A.E. et al. **Fast Spectrum Reactors**. 1ªEd. Richland: Springer, 2012.
- [7] TODREAS, N., Kazimi, M. **Nuclear Systems: Thermal Hydraulic Fundamentals**. Nuclear Systems. Hemisphere Pub. Corp. 1990.
- [8] FACCHINI, A., GIUSTI, V., CIOLINI R., TUCEK, K., THOMAS, D., D'AGATA, E. Detailed neutronic study of the power evolution for the European Sodium Fast Reactor during a positive insertion of reactivity. **Nuclear Engineering and Design**, 313, 2017, pp.1–9.
- [9] VALSECA, A. D. P., PAREDES, G. E., RODRÍGUEZ, A. V. Analysis of a Sodium Cooled Fast Reactor during ULOP and UTOP Transients Using AZTHLIM Code. **XXIX Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana**, 2018.



# Sistema de aeronaves remotamente pilotadas para detecção autônoma de entidades terrestres móveis em áreas restritas

Ricardo Maroquio Bernardo<sup>a</sup>, Luis Claudio Batista da Silva<sup>b</sup>, Paulo Fernando Ferreira Rosa<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo,  
ricardo.maroquio@ifes.edu.br

<sup>b</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca,  
luis.silva@cefet-rj.br

<sup>c</sup>Instituto Militar de Engenharia,  
\*rpaulo@ime.eb.br

**RESUMO:** A vigilância de áreas restritas e a respectiva manutenção de um perímetro de segurança para instalações sensíveis à presença de pessoas não autorizadas é uma tarefa necessária tanto no meio civil quanto no meio militar e pode ser realizada de diversas formas. Este artigo apresenta um método de vigilância de áreas restritas em ambientes abertos que faz uso de um sistema de aeronaves remotamente pilotadas para detectar e rastrear, de forma autônoma, entidades terrestres móveis que adentrem um perímetro previamente estabelecido, de forma a apoiar um processo de tomada de decisão em relação a um possível evento de invasão. A solução proposta possui baixo custo aquisitivo e de manutenção, logística de implantação facilitada, redução do risco a vidas humanas e redução do tempo de percepção de uma possível invasão, além de ser portátil e de pronto emprego.

**ABSTRACT:** Surveillance of restricted areas and the respective maintenance of a security perimeter for installations that are sensitive to the presence of unauthorized persons is a necessary task in both civilian and military environments and can be carried out in different ways. This article presents a method of surveillance of restricted areas in open environments that use a remotely piloted aircraft system to autonomously detect and track mobile terrestrial entities that enter a previously established perimeter to support a decision-making process regarding a possible intrusion event. The proposed solution has low acquisition and maintenance costs, easy deployment logistics, reduced risk to human lives, and reduced time to perceive a possible invasion, in addition to being portable and ready to use.

**PALAVRAS-CHAVE:** SARP. Robótica. Vigilância.

**KEYWORDS:** RPAS. Robotics. Surveillance.

## 1. Introdução

A vigilância de áreas restritas consiste em controlar o acesso a áreas sensíveis à presença de humanos, animais, veículos ou outras entidades terrestres móveis (ETMs). Essa tarefa se torna ainda mais desafiadora quando se trata de uma área externa e sem fechamento adequado. Uma forma clássica de se resolver o problema é através do patrulhamento humano, com ou sem o auxílio de veículos, que permite que invasores sejam detectados tão logo entrem na área de visão de um dos patrulheiros.

Em áreas grandes, se houver necessidade de vigilância persistente visando encurtar o tempo de detecção, o número de patrulheiros requeridos pode inviabilizar o uso desse tipo de solução. Além disso,

essa abordagem pode gerar conflitos entre invasores e patrulheiros, colocando vidas humanas em risco. Uma alternativa ao patrulhamento humano são os circuitos fechados de TV (CFTV), que permitem realizar a vigilância a partir de monitores.

Utilizar CFTV reduz o risco a vidas e requer menos recursos humanos, entretanto, a necessidade de atenção ininterrupta do operador pode levá-lo à fadiga e à consequente falha em pouquíssimo tempo [1]. Além disso, a implantação de CFTV requer infraestrutura adequada e tempo de instalação considerável, sendo inadequada para áreas abertas e em locais que demandem vigilância temporária.

O uso de robôs móveis com capacidade sensorial aprimorada por câmeras e algoritmos de visão computacional pode apresentar vantagens relevantes para se atacar o problema da detecção

de invasores. Entretanto, a eficácia desse método requer a solução de subproblemas que, por si só, constituem temas de pesquisa bastante desafiadores, principalmente quando se pretende realizar a tarefa de forma autônoma.

Um dos desafios inerentes ao uso de imagens capturadas a partir de câmeras embarcadas em robôs móveis diz respeito à obtenção de imagens de boa qualidade, principalmente na tarefa de detectar objetos independentemente móveis em sequências de imagens obtidas a partir de câmeras também móveis, pois tanto o plano de fundo quanto o objeto móvel em si se deslocam entre os quadros. Os trabalhos [2, 3, 4] apresentam formas distintas de se lidar com esse problema.

Outra questão importante é que, quando se trata de processamento de imagens e de técnicas de visão computacional, o poder de processamento necessário é relevante e influi diretamente no tempo de resposta do sistema como um todo. Normalmente, os recursos computacionais disponíveis em computadores embarcados em robôs móveis são bastante limitados, demandando, na maioria das vezes, a transferência de responsabilidade de processamento a um computador externo.

Os recursos computacionais tendem a se tornar ainda mais escassos, ou até mesmo inexistentes, quando se trata de robôs móveis aéreos de pequeno porte. Nesse tipo de robô, a capacidade de carga é ainda mais limitada e pode até mesmo demandar a transmissão das imagens para processamento em um computador externo.

Apesar dos desafios mencionados, as aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) são um tipo de robô móvel cujo uso vem se tornando cada vez mais comum, tanto em aplicações civis quanto militares. O uso militar pode ser interessante em tarefas como vigilância e patrulhamento [5], busca e resgate [6], mapeamento [7], abastecimento [8] e comunicação [9]. No meio civil, as aplicações mais comuns incluem transporte de pacotes [10], aquisição de imagens [11], entretenimento [12] e agricultura de precisão [13].

O rápido crescimento do uso de ARPs nos últimos anos em diversas aplicações pode ser explicado pela

facilidade de acesso a equipamentos anteriormente inacessíveis, seja por questões geográficas, técnicas ou econômicas. Os componentes para a construção de ARPs têm tido melhorias em precisão, miniaturização, tempo de resposta e robustez, além de terem alta disponibilidade no mercado e custo cada vez mais reduzido, fomentando seu uso e construção.

Mediante o exposto, este artigo apresenta um método relevante de detecção e rastreamento de entidades terrestres móveis em uma área restrita previamente definida por um operador humano. Como diferencial, o método propõe o uso de uma aeronave remotamente pilotada do tipo quadricóptero, concebida especialmente para este fim, e que atua de forma autônoma e com processamento totalmente embarcado do software inerente ao cumprimento da missão.

Em continuidade a essa introdução, a Seção 2 apresenta uma breve fundamentação teórica de assuntos relacionados aos subproblemas intrínsecos da solução geral. Na Seção 3, são abordados alguns trabalhos relacionados a este. Na sequência, a Seção 4 expõe a formalização do problema e da solução proposta, enquanto a Seção 5 esmiúça detalhes do protótipo de ARP construído para a realização dos experimentos reais. Na Seção 6, são apresentados diagramas e algoritmos do software embarcado. Por fim, a Seção 7 discorre sobre alguns resultados experimentais e a Seção 8 conclui com algumas considerações.

## 2. Fundamentação teórica

Esta seção apresenta conceitos fundamentais da área de robótica móvel, aeronaves remotamente pilotadas e visão computacional. As subseções seguintes tratam cada um desses assuntos individualmente.

### 2.1 Robótica móvel

Grande parte das técnicas usadas na solução proposta são pertinentes à área da robótica móvel. Os conceitos aqui apresentados foram sintetizados a partir de Siegwart [14]. Os robôs móveis podem ser terrestres, aquáticos e aéreos, sendo estes últimos o tipo adotado como plataforma para desenvolvimento

da solução aqui proposta. Os robôs aéreos podem ser de asa fixa, de asa rotativa, ou mais leves do que o ar. A solução proposta faz uso de quadricópteros, que são robôs aéreos de múltiplas asas rotativas.

O grau de autonomia de um robô móvel para a realização de uma tarefa depende do aparato computacional, sensorial e de atuação embarcados. A percepção do ambiente é realizada através do processamento de dados oriundos de sensores, como câmeras e sonares. Alguns sensores também podem ser necessários para aplicações específicas, como sensores de CO<sub>2</sub> ou a própria câmera.

Sensores podem ser classificados sob diversos critérios. O **campo de visão** corresponde à largura de cobertura do sensor, geralmente expressa em graus. O **alcance** diz respeito à distância máxima para uma medida confiável. A **acurácia** indica o quão correta é a leitura fornecida em relação a um referencial exato. A **repetibilidade**, também tratada como a precisão do sensor, refere-se à capacidade de fornecimento da mesma medida em dada condição. A **resolução** corresponde à menor diferença possível entre dois valores sensoreados.

Outro atributo importante é o **consumo de energia**, que diz respeito à corrente e tensão requeridos pelo sensor. A **confiabilidade** do sensor refere-se à sua independência a fatores externos, como variação de tensão. A **complexidade computacional**, por sua vez, corresponde à quantidade de processamento computacional necessário para se processar os dados sensoreados. Por fim, as **dimensões físicas**, a saber, o tamanho e o peso, são atributos bastante relevantes para sistemas embarcados em robôs com restrições de espaço e carga útil.

Um robô móvel pode usar diversos sensores para estimar sua localização em relação a um referencial fixo. Erros e ruídos de sensoriamento são comuns e podem ser tratados com métodos estocásticos e representações baseadas em níveis de crença. O filtro de Kalman é bastante usado para fundir dados de sensores, promovendo normalização ou combinação ponderada [15]. A discretização do espaço de trabalho contínuo pode promover redução de dimensionalidade do problema, facilitando a computação [16].

## 2.2 Aeronaves remotamente pilotadas

Esta subseção apresenta conceitos operacionais e construtivos de ARPs do tipo quadricóptero, que no contexto desse trabalho é tratado como um tipo de robô aéreo.

A **figura 1** mostra um esquema com os dispositivos utilizados durante a operação da ARP, bem como os tipos de mensagens trocadas entre os dispositivos. A ARP deve ter, obrigatoriamente, um rádio-controle transmissor (RCT) vinculado, a fim de possibilitar o controle manual da aeronave. Opcionalmente, o RCT pode receber dados de telemetria, como tensão da bateria, altitude, entre outros. O dispositivo central é uma tela de visualização de fluxo de vídeo em tempo real transmitido por uma câmera embarcada. A ECS é a estação de controle em solo e corresponde ao computador a partir do qual o operador da missão pode definir comandos em alto nível e comandos operacionais de emergência, como pouso ou redefinição de rotas.

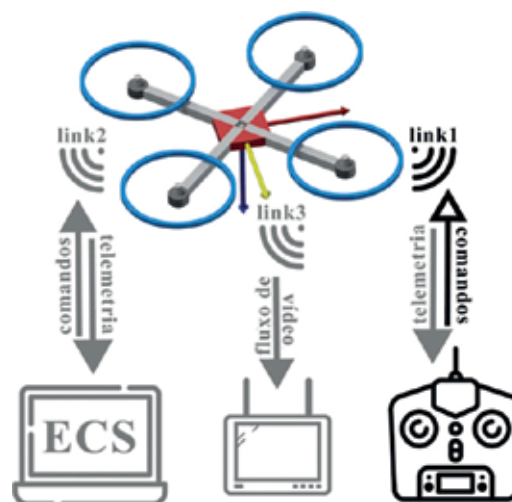
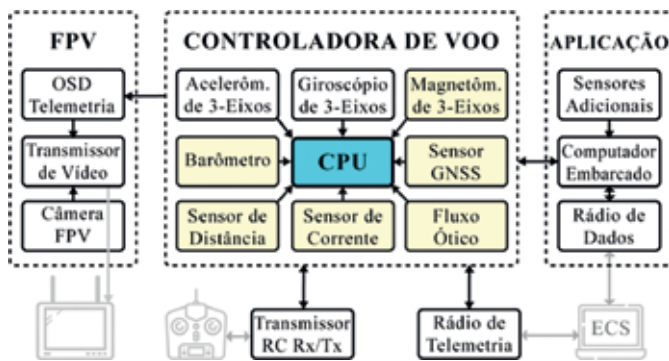


Fig. 1 – Operação básica de uma ARP do tipo quadricóptero.

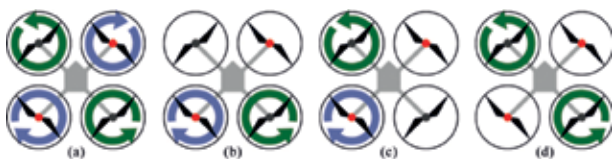
A **figura 2** mostra um esquema com os componentes principais presentes em uma ARP. Os elementos em cinza claro são exteriores ao veículo. Os elementos amarelados não são obrigatórios, mas desejáveis. Os retângulos tracejados representam grupos lógicos de elementos, não significando necessariamente que eles pertençam à mesma placa de circuito impresso. As setas indicam os sentidos dos fluxos de dados entre os componentes.

A controladora de voo, representada pelo retângulo tracejado central, recebe os dados dos sensores em sua unidade de processamento para computar a posição e a orientação da ARP em relação a um referencial fixo. A unidade de processamento é dedicada à execução do software de controle da aeronave. O retângulo pontilhado à direita representa os componentes usados para aplicações específicas, enquanto o retângulo pontilhado à esquerda corresponde aos componentes usados no modo de pilotagem em primeira pessoa, em que o operador visualiza em tempo real as imagens captadas por uma câmera embarcada.



**Fig. 2** – Organização básica dos componentes internos e externos do quadricóptero.

O sistema de propulsão de um quadricóptero é constituído por quatro motores equipados com hélices e comandados por controladores eletrônicos de velocidade (ou ESC, do inglês *electronic speed controller*). A combinação correta do motor e da hélice, bem como do ESC e da bateria, é fundamental para definir a qualidade do voo. O diferencial de rotação entre os quatro conjuntos propulsores é que define o comportamento dinâmico da aeronave. A **figura 3** mostra alguns movimentos de acordo com o diferencial de rotação dos propulsores.



**Fig. 3** – Dinâmica básica de voo de um quadricóptero em função da rotação de cada propulsor. a) subida; b) inclinação para a frente; c) inclinação para a direita; d) guinada para a direita.

## 2.3 Visão computacional

Conforme Szeliski [17], a visão computacional é uma área de estudo que visa compreender uma cena em 3D a partir de imagens 2D, imitando a visão humana a partir do uso de software e hardware. A qualidade das imagens é fundamental para essa compreensão. É comum o uso de sistemas de visão implementados em ARPs para uso em tarefas, como detecção e rastreamento de objetos independentemente móveis (OIM), estimação de posição, navegação, detecção de obstáculos, pouso autônomo, voo estabilizado, determinação de atitude, reconstrução 3D, entre outras [18-25].

A extração de características das imagens é fundamental para se criar descritores que representam pontos específicos da imagem. A atomicidade de um descritor, bem como sua robustez a variações de iluminação e de rotação, por exemplo, permitem rastreá-lo ao longo de vários quadros e obter informações de movimentação de partes da imagem.

Existem diferentes algoritmos para se computar descritores de pontos, e normalmente a robustez do descritor incorre em maior tempo de processamento. Cada algoritmo tem suas vantagens e desvantagens, tendo seu desempenho melhor ou pior de acordo com a situação.

A detecção de OIMs consiste em segmentar as imagens de uma sequência em plano de fundo e plano móvel. Os OIMs ficam no plano móvel, enquanto o cenário de atuação fica no plano de fundo. As principais técnicas para detecção de OIMs são a diferenciação de quadros, o fluxo ótico denso ou esparso, e a subtração de plano de fundo [26].

A diferenciação de quadros considera a subtração de dois quadros consecutivos da sequência. Tem a vantagem de ser simples e rápido, porém, como somente parte de um OIM se move entre dois quadros contíguos, o OIM não é detectado por completo. No método do fluxo ótico, vetores são traçados entre descritores correspondentes de dois quadros subsequentes e, de acordo com a magnitude desses vetores, é possível ter uma noção das regiões



da imagem que estão em movimento, mas sem obter o contorno completo dos OIMs.

No método de subtração de plano de fundo, um quadro inicial é mantido como referencial e é atualizado a cada novo quadro, mantendo uma representação viável do plano de fundo. A cada quadro vindouro, a subtração é feita e a diferença é considerada um OIM. Esse método identifica bem OIMs mas requer a atualização adequada do quadro de referência. O rastreamento de um OIM consiste no registro de sua posição ao longo do tempo, identificando continuamente os objetos correspondentes entre os quadros da sequência. Problemas temporários, como oclusão de objetos, podem ser contornados usando-se técnicas de predição.

### 3. Revisão de literatura

Os trabalhos [27-29], assim como o presente trabalho, são alguns dos vários casos em que os autores propõem suas próprias ARPs durante o desenvolvimento de sua pesquisa. A **tabela 1** mostra as principais características das aeronaves construídas nos trabalhos supracitados. A coluna referente ao modo de voo disponível diz respeito ao modo de voo mais sofisticado oferecido pela ARP.

**Tab. 1** – Comparação das principais características de aeronaves remotamente pilotadas utilizadas nos trabalhos acadêmicos citados.

Ref.	Peso Total (g)	Tempo de Voo (min)	Modo de Voo Disponível	Custo Total (US\$)
[26]	4000	11	Estabilizado	NI
[27]	1400	5-10	Estabilizado	300,00
[28]	2250	30	Automático	1500,00

Na seção introdutória, foram citadas diversas aplicações que fazem uso de ARPs, sendo que algumas delas podem demandar detecção e/ou rastreamento de OIMs. Os parágrafos a seguir descrevem sucintamente alguns trabalhos que fazem uso de ARPs para detectar e/ou rastrear ETMs com algum propósito. No contexto desse trabalho, o termo ETM é usado em substituição a OIM para caracterizar melhor o tipo de objeto alvo da detecção.

No artigo [30], que compartilha três autores com o presente trabalho, foi proposto um sistema para controlar várias ARPs de pequeno porte para a vigilância de uma área predefinida. A solução proposta visa o controle de posicionamento e deslocamento das aeronaves dentro da área alvo da vigilância, sendo que tal área é decomposta em células hexagonais com diferentes prioridades de cobertura. Uma política de distribuição de ARPs baseada nas prioridades define a frequência de visitação de cada célula. A solução permite que um único operador comande uma frota de ARPs autônomas usando uma interface de usuário de alto nível, de forma que não há necessidade de controle manual individual das ARPs.

Outros trabalhos mais recentes atacam o problema da vigilância persistente de áreas restritas usando enxames de ARPs. No artigo [31], os autores apresentam um estudo teórico envolvendo a análise matemática da capacidade de coleta de dados de um enxame de ARPs voando em formação circular, reta e diagonal, sobre uma área decomposta em células quadradas, mantendo uma taxa de atualização uniforme de cada célula alcançada pelas ARPs.

No trabalho apresentado em [32], os autores combinam o uso de ARPs com veículos terrestres não-tripulados para a cobertura de áreas urbanas, atendendo a demandas de sensoriamento visual detalhada em alguns locais. A solução proposta discretiza o espaço de atuação da ARP em cubos e do veículo terrestre em quadrados projetados no solo a partir desses cubos. Um caminho para a atuação cooperativa dos veículos de forma que resolva o problema da cobertura com restrições é modelado como um problema de otimização e a solução proposta usa uma abordagem híbrida de algoritmos genéticos e algoritmos de estimação de distribuição.

Em [33], os autores apresentam uma solução que usa um enxame de ARPs comerciais para vigilância aérea semiautônoma. Um operador define manualmente trajetórias circulares para as ARPs, de acordo com um método que evita a sobreposição das imagens capturadas pelas câmeras embarcadas. Essas imagens são, então, enviadas continuamente para uma estação em solo que, por sua vez, processa

as imagens para detectar objetos de interesse, que não são necessariamente objetos móveis. A quantidade de ARPs e a frequência de cobertura podem variar de acordo com o tamanho da área.

A vigilância de fronteiras usando drones e uma rede de sensores estacionários em solo é tema do trabalho apresentado em Sharma [34]. Uma rede de sensores em terra composta por sonares e sensores infravermelhos é usada para detectar movimentos no ambiente. Quando um movimento é detectado, uma ARP é acionada para ir até o local e capturar imagens da região. Tais imagens são transmitidas a uma estação em terra que, por sua vez, processa as imagens buscando encontrar pessoas.

O estabelecimento de políticas de posicionamento de ARPs tem sido tema de estudo de pesquisa para algumas aplicações. Em Abdel [35], os autores propõem um *framework* para posicionar uma ARP equipada com os devidos dispositivos, visando maximizar a conectividade de estruturas de rede *backhaul*, que conectam *backbones* a redes periféricas. No artigo [36], os autores estabelecem um método de posicionamento de ARPs objetivando prover uma rede *wireless* para usuários em uma área terrestre quadrada previamente definida, buscando maximizar a quantidade de usuários cobertos pela rede, com a possibilidade de clusterização de grupos de usuários e utilização de múltiplas ARPs. O trabalho apresentado em Nasraoui [37] tem semelhanças com [36] no que diz respeito ao uso de ARPs para provimento de conectividade e serviços de comunicação para usuários em solo. Os autores de [37] focam no estabelecimento de uma altitude ótima de operação, considerando a física de propagação do sinal e levando em conta a rugosidade do solo.

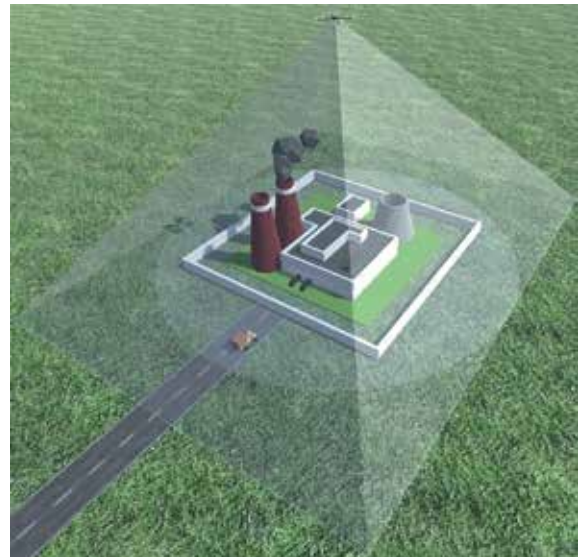
## 4. Formalização do problema

A **figura 4** mostra uma representação 3D em alto nível de um cenário de vigilância simplificado, em que um carro adentra uma área restrita que envolve uma edificação. Os muros no entorno da edificação definem a área restrita. No topo, está a ARP de vigilância com uma câmera apontada para baixo,

processando continuamente as imagens capturadas. O campo de visão da câmera é representado pelo volume piramidal semitransparente entre a ARP e o solo. Pode-se notar que o campo de visão abrange todo o círculo que representa a área restrita. Na estrada que dá acesso à edificação, há um veículo dentro da área restrita, que representa uma ETM.

### 4.1 Formalizações preliminares

Em síntese, os elementos relevantes para o problema são a área restrita a ser vigiada, as entidades terrestres móveis, a ARP e seu espaço de trabalho. Portanto, seja  $W$  um ambiente externo que compreende um conjunto de coordenadas georreferenciadas, onde cada  $w_i \in W$  é um ponto sobre a superfície terrestre dado por  $[latitude, longitude, altitude]$ . A **área restrita** terrestre  $A$  a ser vigiada é um subconjunto de  $W$  manualmente definido e cujo contorno  $C$  é um polígono fechado de coordenadas  $c_i \in A$ .



**Fig. 4** – Representação 3D de um cenário de vigilância.

A área restrita  $A$  decomposta em  $n_d$  células é representada pelo conjunto  $D = \{d_i \mid 0 \leq i < n_d\}$ , cujos elementos assumem os valores de coordenadas dos centroides das células. O ambiente pode conter um conjunto com **entidades terrestres móveis** (ETMs), que podem adentrar a área restrita a qualquer momento. Portanto,  $E = \{e_i \mid 0 \leq i < n_e\}$  cujos elementos correspondem às coordenadas de seus centroides.

Inicialmente, todas as ETMs estão fora da área restrita, isto é,  $\forall e_i \in E, e_i \in (W-A)$ . Quando nesta condição, as ETMs são representadas apenas para fins de formulação do problema, não tendo elementos correspondentes na solução concreta. A partir do momento em que a ETM adentra a área restrita, ela passa a fazer parte de um subconjunto denominado  $E_{det}^t$ , que corresponde às ETMs detectadas.

Seja  $ARP$  uma **ARP estacionária** do tipo VTOL (Vertical Take Off and Landing) com posição de partida  $P^0 \in D$ , ou seja,  $ARP$  se encontra dentro de uma célula de  $D$ , mas não necessariamente em seu centroide.  $ARP$  deve ser capaz de pairar em uma posição  $p^{pairar}$  previamente calculada, cuja projeção no solo pertence à  $A$  e, a partir dessa posição, deve ser capaz de realizar a cobertura visual total de usando uma câmera embarcada.

A imagem  $img^t$  de dimensões  $[w, h]$ , obtida a partir da câmera embarcada em  $ARP$  no tempo  $t$ , é representada por  $img^t = \{p^t(x, y) \in \mathbb{R}^3 \mid 0 \leq x < w, 0 \leq y < h\}$ , sendo que cada elemento  $p^t(x, y)$  da imagem armazena os valores RGB do *pixel* na coordenada  $(x, y)$  da imagem capturada no tempo  $t$ . O conjunto formado pela sequência de imagens capturadas pela câmera de  $ARP$  é representado por  $Img$ .

## 4.2 Formalização da detecção

A detecção de ETMs invasoras requer o processamento individual dos quadros capturados pela câmera embarcada em  $ARP$ . De acordo com a formalização apresentada na subseção anterior, o conjunto de imagens capturadas pela câmera embarcada em  $ARP$  é definido por  $Img$ . A cada imagem  $img^t \in Img$ , para  $t = 1, \dots, t_{curr}$ , onde  $t$  é um índice sequencial temporal e  $t_{curr}$  é o índice mais atual dessa sequência, a função de detecção  $f_{det}$  deve retornar como saída um vetor de  $n_{det}^t$  pares  $(x_{det}^t, y_{det}^t)$  correspondentes às coordenadas dos *pixels*  $p_{est}^t(x_{det}^t, y_{det}^t)$  localizados nos centroides dos  $n_{det}^t$  OIMs detectados em  $img^t$ , para  $i = 1, \dots, n_{det}^t$ . O problema da detecção, portanto, pode ser representado pela **equação 1** a seguir:

$$E_{det}^t = \{(x_{det}^i, y_{det}^i)\} \leftarrow f_{det}(img^t), 1 \leq i \leq n_{det}^t, 1 \leq t \leq t_{curr} \quad (1)$$

Onde  $E^t$  é o conjunto composto pelas ETMs detectadas no tempo  $t$ ,  $n_{det}^t$  é a quantidade de OIMs detectados no instante  $t$  e  $t_{curr}$  é o índice sequencial temporal da imagem mais atual da sequência  $Img$ . Como o resultado da função de detecção é um vetor de centroides baseados em coordenadas de pixels, é necessário ter uma função adicional que converta essas coordenadas para valores georreferenciados, uma vez que o mecanismo de navegação de  $ARP$  é baseado em um sensor de localização por satélites.

Portanto,  $f_{gps}(x, y, lat, long, alt, cam, heading)$  é a função que converte uma coordenada  $(x, y)$  de um *pixel* de uma imagem de  $Img$  para uma coordenada georreferenciada, onde  $(lat, long, alt)$  são as coordenadas georreferenciadas de  $ARP$  no momento da captura da imagem,  $cam$  corresponde aos parâmetros intrínsecos da câmera e  $heading$  é a orientação do veículo em relação ao norte. Vale observar que OIM é a denominação dada aos objetos independentemente móveis detectados na imagem que, posteriormente, serão ou não caracterizados como uma ETM.

## 4.3 Formalização do rastreamento

Para a realização do rastreamento das ETMs invasoras, é necessário encontrar a correspondência entre as ETMs detectadas ao longo do tempo. Portanto, seja  $f_{track}$  a função capaz de determinar as correspondências entre  $E_{det}^t$  e  $E_{det}^{t-1}$ . Para isso, como entrada,  $f_{track}$  recebe continuamente o resultado de  $f_{det}(img^t) = E_{det}^t$  para  $t > 1$ , bem como as entidades detectadas no instante anterior,  $E_{det}^{t-1}$ , e o conjunto de rastreamentos de cada entidade em  $E_{det}^{t-1}$ , denominado  $R^{t-1}$ .

Como saída, a função deve retornar um conjunto  $E_{det}^t$  contendo o conjunto atualizado de ETMs invasoras, bem como o conjunto  $R^t$  atualizado dos dados de rastreamento de cada ETM do conjunto  $E_{det}^t$ . O problema do rastreamento, portanto, pode ser representado pela **equação 2** a seguir:

$$(E_{det}^t, R^t) = \left( \left\{ \left( x_{e_{det}^t}^t, y_{e_{det}^t}^t \right) \right\}, \left\{ R_{e_{det}^t}^t \right\} \right) \quad (2)$$

$$(E_{det}^t, R^t) \leftarrow f_{track} (E_{det}^t, E_{det}^{t-1}, R^{t-1}) \mid 1 \leq i \leq n_{det}^t, 2 \leq t \leq t_{curr}$$

Onde  $E_{det}^t$  corresponde às coordenadas de todas as ETMs pertencentes ao conjunto  $E_{det}$  no instante  $t$ ,  $R^t$  corresponde aos vetores de coordenadas de posição ao longo do tempo para toda  $e_{det}^i \in E_{det}^t$ ,  $(x_{e_{det}^i}^t, y_{e_{det}^i}^t)$  corresponde à posição de  $e_{det}^i$  no instante  $t$  e  $R_{e_{det}^i}^t$  corresponde ao conjunto de posições de  $e_{det}^i$  desde o instante 0 até o instante  $t$ .

Vale observar que manter o conjunto  $E_{det}^t$  atualizado corresponde a manter apenas as ETMs presentes na área restrita  $A$  no instante  $t$ , ou seja,  $f_{track}$  deve manter uma política de inclusão e exclusão de ETMs em  $E_{det}^t$ , uma vez que algumas ETMs de  $E_{det}^{t-1}$  podem não estar presentes em  $A$  no instante  $t$ , assim como algumas ETMs de  $E_{det}^t$  podem ter acabado de adentrar a área restrita e não terão correspondência em  $E_{det}^{t-1}$ .

#### 4.4 Restrições, premissas e requisitos adicionais

Considera-se que *ARP* possui capacidade de navegação automática por *waypoints* georreferenciados. Como o sistema depende de câmeras do tipo RGB, é fundamental que o cenário de operações possua iluminação adequada. Considera-se, ainda, que o terreno seja plano e que a área restrita  $A$  seja estacionária, isto é, sua localização e forma perimetral não se alteram ao longo da missão. A trajetória realizada entre o ponto de decolagem de e a posição de vigilância desconsidera a presença de obstáculos com altura superior à altitude de operação da aeronave. deve ser do tipo VTOL e deve ser capaz de se comunicar com uma estação de controle em solo, que, por sua vez, é a interface com o operador da missão.

## 5. Solução proposta

A **figura 5** apresenta uma visão simplificada da arquitetura do SARP (Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada) usado na solução proposta.

Ele é composto por uma ARP estacionária e uma estação de controle em solo que se comunicam por um canal bidirecional entre si. A ARP detecta e rastreia ETMs invasoras usando somente o aparato embarcado no veículo, transmitindo continuamente à ECS dados referentes às ETMs (posição, velocidade e tamanho) e dados de telemetria (bateria, posição, inclinação e estado dos sensores).

Complementando a **figura 5**, a **figura 6** apresenta uma visão comportamental do SARP ao longo de uma missão, destacando as tarefas de alto nível envolvidas na solução do problema e a sequência em que tais tarefas são executadas. O retângulo tracejado corresponde às coordenadas dos vértices que definem um polígono correspondente ao perímetro da área restrita, que são fornecidas pelo operador da missão como dados de entrada. O sistema então inicia computando a posição e orientação (pose) ideais da ARP de forma a manter cobertura visual total da área restrita.

Com a pose computada, a ARP decola e navega até alcançá-la. Em seguida, o algoritmo de detecção de ETMs é iniciado, obtendo um quadro de referência e processando os quadros vindouros em busca de alterações que caracterizem OIMs presentes na imagem. Com os resultados da detecção, o algoritmo de rastreamento entra em ação visando manter um registro temporal do posicionamento das ETMs detectadas. Concluindo um ciclo, informações estáticas e dinâmicas referentes às ETMs são transmitidas para a ECS.

Caso a missão deva prosseguir, um novo ciclo de detecção-rastreamento-transmissão é iniciado. A missão pode ser finalizada de forma deliberada pelo operador ou de forma automática mediante o estado da ARP. As subseções seguintes apresentam detalhes das tarefas de alto nível apresentadas nesta subseção.

### 5.1 Posicionamento da ARP

Para maior utilidade das imagens capturadas, a ARP deve pairar sobre a área restrita  $A$ , de forma que o campo de visão seja ajustado para que a área restrita compreenda a maior quantidade possível de *pixels*, visando maximizar a relação *pixels*/área. Desta forma, ETMs que adentrem  $A$  ocuparão mais *pixels*,



facilitando a detecção. Considerando que o sensor da câmera é retangular, para maximizar a relação *pixel/área*, primeiramente, é computado um retângulo de área mínima que envolve toda a área restrita *A*.

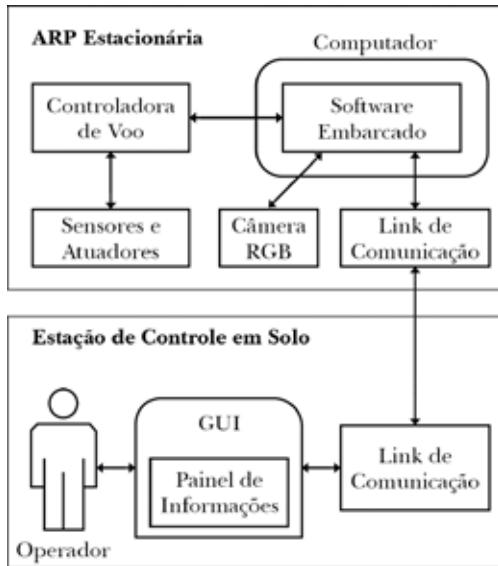


Fig. 5 – Arquitetura simplificada do SARP aplicado na solução.

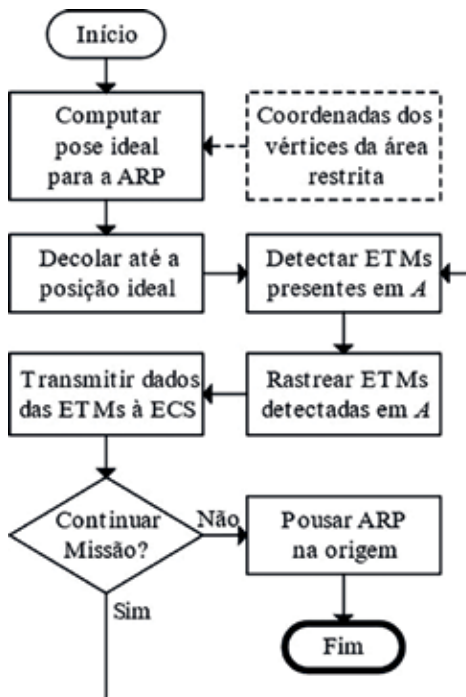


Fig. 6 – Visão em alto nível das tarefas executadas pelo SARP.

Então, a latitude e longitude da *ARP* deve coincidir com o centro de *Rect* e a orientação da *ARP* deve ser

definida de forma que o lado de maior comprimento do retângulo computado e o lado de maior comprimento da imagem capturada sejam paralelos e os centros sejam coincidentes. Com a pose da *ARP* computada, é necessário calcular a altitude em que a aeronave deve pairar para que a câmera tenha abrangência completa da área restrita. Nesse caso, considera-se que os parâmetros relacionados à lente da câmera são previamente conhecidos.

Conforme a **equação 3** [38], as dimensões (*W*, *L*) da área de cobertura de uma câmera planar ao solo a uma altitude *h* podem ser calculadas da seguinte forma, onde  $\alpha$  corresponde ao ângulo de abertura vertical da câmera e  $\beta$  corresponde ao ângulo de abertura horizontal da câmera:

$$W = 2h * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

$$L = 2h * \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

Portanto, a altitude mínima  $h_{\min}$  admitida para a câmera da *ARP*, de forma que ela faça a cobertura total de *A*, pode ser derivada da **equação 3**, como segue:

$$h_w = \frac{W}{2 * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

$$h_L = \frac{L}{2 * \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (4)$$

$$h_{\min} = \max(h_w, h_L)$$

Esses cálculos desprezam deslocamentos horizontais e verticais provocados por intempéries do ambiente e erros nos sensores da *ARP*. Portanto, é recomendado usar uma margem de segurança para evitar a possível falta de cobertura de regiões próximas às bordas de *A*. A **figura 7** apresenta uma imagem de uma área restrita fictícia a ser vigiada.

Na **figura 7**, o polígono com arestas sólidas verde-escuras corresponde à área restrita *A*. O retângulo com

arestas sólidas amarelas corresponde ao retângulo de área mínima que envolve a área restrita. O retângulo com arestas em pontilhado azul corresponde à área coberta pela câmera da *ARP* quando a aeronave está na pose computada previamente, representada pelo círculo branco com borda vermelha. Para fins de comparação, o retângulo maior, com arestas pontilhadas amarelas, corresponde à imagem capturada pela câmera na *ARP* quando a aeronave estiver pairando na posição horizontal da pose computada, mas a uma altitude superior e com uma orientação diferente.



**Fig. 7** – Área restrita fictícia a ser vigiada e representações da área de abrangência da câmera em diferentes situações.

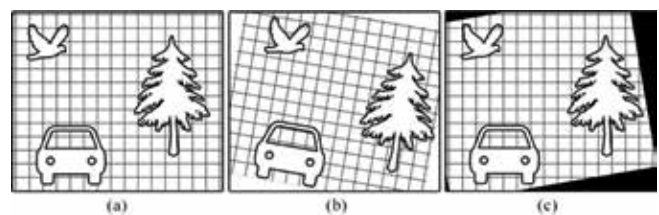
O retângulo de arestas vermelhas dentro da área restrita corresponde a um objeto de interesse aleatório. Na imagem compreendida pelo retângulo pontilhado azul, esse objeto ocupa cerca de 2,3% da imagem, enquanto ocupa 1,4% da imagem compreendida pelo retângulo pontilhado amarelo, ou seja, na imagem capturada a partir da pose ideal, o objeto teria aproximadamente 64% mais I, tornando-o mais “visível” na fase de detecção de ETMs.

## 5.2 Estabilização de imagens

Vibrações provocadas por motores e movimentos causados por intempéries do ambiente ou por

imprecisão de sensores estão entre os causadores de problemas em imagens capturadas a partir de ARPs. Manter o alinhamento dos quadros capturados pela câmera é crucial para algoritmos de detecção de OIMs. Este trabalho utiliza uma solução híbrida, baseada em estabilização mecânica com um *gimbal* motorizado e estabilização por software. Para movimentos angulares de rolagem e arfagem, o *gimbal* é acionado. A técnica utilizada foi desenvolvida pelos mesmos autores deste artigo e é apresentada em Bernardo [39].

A **figura 8** mostra um exemplo de alinhamento que cria bordas inválidas, com (a) apresentando o quadro de referência, (b) apresentando o quadro a ser alinhado e (c) mostrando o quadro corrigido pela transformação geométrica e as bordas pretas surgidas como efeito colateral. Vale mencionar que o tamanho das bordas pretas aumenta de forma proporcional aos movimentos da câmera, portanto, a manutenção de estabilidade da ARP é algo de fundamental importância.



**Fig. 8** – Geração de bordas inválidas causada pela transformação geométrica aplicada para correção dos movimentos indesejados da câmera. (a) quadro de referência; (b) quadro a ser alinhado; (c) quadro corrigido.

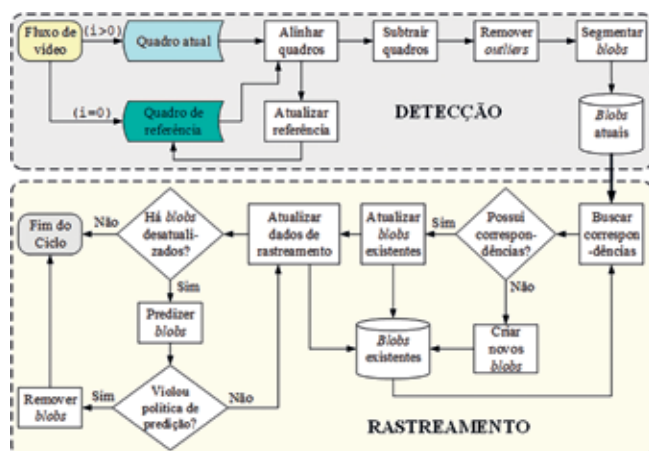
## 5.3 Detecção e rastreamento de ETMs

A detecção e o rastreamento de ETMs consideram que o eixo ótico da câmera embarcada tem a mesma direção e sentido do vetor gravidade, graças ao recurso de estabilização de imagens. Portanto, as imagens capturadas do solo são coplanares, facilitando a etapa de detecção de ETMs. O diagrama da **figura 10** apresenta uma visão geral do algoritmo de detecção e rastreamento de ETMs.

Um ciclo de detecção e rastreamento inicia a partir do **fluxo de vídeo** da câmera embarcada em *ARP*. Este ciclo se repete para cada quadro processado. Primeiramente, captura-se um quadro para usar como

**quadro de referência.** Cada novo quadro, representado no diagrama pelo bloco com o rótulo **quadro atual**, passa, primeiramente, por um processo de alinhamento, de forma que a imagem do quadro atual fique coincidente com a imagem do quadro de referência. Em seguida, o quadro atual é subtraído do quadro de referência e o resultado é submetido a um limiar que vai determinar se cada *pixel* resultante deve ser desprezado (0) ou considerado (1), gerando uma imagem binária.

Os agrupamentos de *pixels* binários contíguos formam *blobs* (do inglês *binary large objects*). Os *blobs* de tamanho superior a um segundo limiar são mantidos, enquanto os menores são considerados *outliers* e são removidos da imagem. Por fim, os *blobs* são devidamente segmentados do plano de fundo e armazenados na coleção *blobs atuais*. Esses *blobs* são os candidatos às ETMs detectadas. A partir deste ponto, é iniciada a fase de rastreamento.



**Fig. 9** – Visão geral do algoritmo de detecção e rastreamento de ETMs.

No primeiro ciclo, os *blobs* passarão a constituir automaticamente a coleção de *blobs existentes*. No ciclo seguinte, os *blobs* atuais são comparados com aqueles computados no ciclo anterior, de forma a se **buscar correspondências** entre as coleções de *blobs*. Assim, é possível manter um histórico de posições dos *blobs* ao longo do tempo.

Em vista da taxa de processamento de quadros, da resolução da câmera e da altitude da *ARP*, os *blobs* deslocam-se por poucos *pixels* entre um quadro e outro. Por conta disso, a busca por uma correspondência se

resume a encontrar um *blob* na vizinhança que tenha as mesmas características físicas (razão de aspecto e área) e comportamentais (direção e velocidade) que o *blob* do quadro atual, sendo que o raio de busca é um parâmetro que influi no desempenho.

Quando algum dos *blobs* atuais não possui um *blob* existente correspondente, significa que ele é um novo *blob*, ou seja, trata-se de uma nova ETM que acabou de adentrar a área restrita. Os *blobs* atuais que tiveram *blobs* existentes correspondentes terão suas informações e dados de rastreamento atualizados. Caso algum *blob* existente não tenha correspondente, pode ser que ele tenha deixado a área restrita ou que esteja passando por um evento de oclusão.

Os casos de oclusão são tratados através de uma política de predição, em que a próxima posição do *blob* ocluído é computada de acordo com seu comportamento dinâmico, baseado em seu histórico de posições ao longo do tempo. A política de predição pode excluir um *blob* ou atualizar seus dados de rastreamento com a nova posição estimada. A exclusão pode ocorrer quando a posição do *blob* indicar que ele deixou a área restrita ou quando ele está sem correspondência por um tempo acima de um limiar ajustável.

## 5.4 A ARP construída

Para a condução de experimentos de partes intrínsecas do SARP proposto, foi construída uma ARP com características que atendem a todas as premissas do problema. A metodologia construtiva evoluiu de em um projeto anterior publicado em Bernado [40]. A ARP usa componentes de prateleira com alta disponibilidade comercial, sendo que cada componente foi criteriosamente selecionado a partir de testes empíricos, individuais e integrados, usando equipamentos computadorizados.

A ARP construída possui 330mm de envergadura, autonomia de voo pairado superior a 40 minutos e peso final de 1080g, enquanto seu antecessor tinha envergadura de 450mm, voava até 23 minutos e pesava 1,5kg. As evoluções na parte sensorial também foram relevantes. O ganho de autonomia deve-se, principalmente, à bateria de células de íons de

lítio construída especificamente para este veículo. Vale mencionar, ainda, que o *gimbal* usado para a estabilização mecânica também foi construído usando-se componentes de prateleira. A **figura 9** mostra uma foto real da ARP construída para este trabalho.

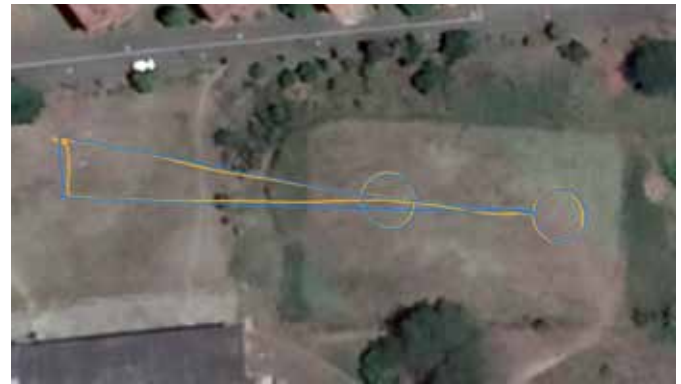


**Fig. 10** – ARP de 330mm construída para desempenhar o papel de ARP estacionária.

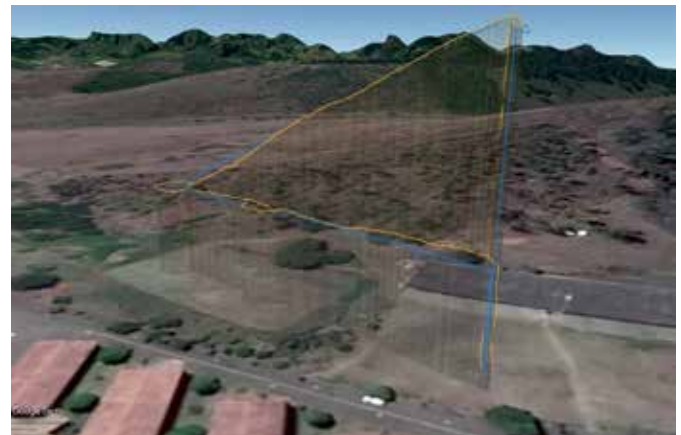
Para as tarefas de navegação e controle, foi desenvolvida uma biblioteca com funções em alto nível para movimentação da ARP e está disponível em Bernardo [41]. Ela é baseada em outra, de abstração inferior, chamada DroneKit [42], que utiliza um protocolo específico para comunicação com ARPs de pequeno porte chamado MavLink [43].

## 6. Resultados experimentais

Dada a complexidade de se criar um cenário real para validação integral do SARP em uma missão de vigilância, as partes intrínsecas do sistema foram validadas individualmente. Para validar a ARP construída, foram realizados testes de voo reais e simulados por computador. A simulação por computador utilizou uma arquitetura *Software in the Loop* (SITL) disponibilizada pela equipe que desenvolve o ArduPilot [44], que é o *firmware* da controladora de voo. A **figura 11** mostra os resultados obtidos.



(a)



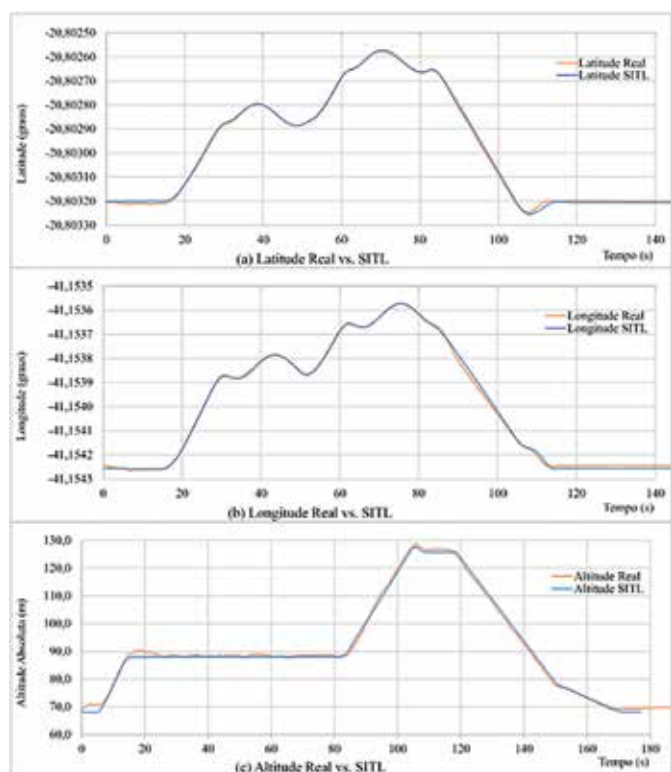
(b)

**Fig. 11** – Latitude (a), longitude (b) e altitude (c) das trajetórias

geradas pela simulação com SITL (linha azul) e com a ARP em

voo real (linha laranja).



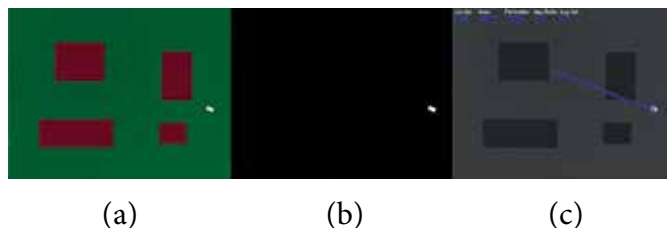


**Fig. 12** – Latitude (a), longitude (b) e altitude (c) das trajetórias geradas pela simulação com SITL (linha azul) e com a ARP em voo real (linha laranja).

Os gráficos da **figura 12** mostram a diferença de latitude, longitude e altitude entre os experimentos de voo real e por SITL. A diferença entre os resultados é desprezível para esse tipo de aplicação e demonstra claramente que a precisão de navegação da ARP habilita o uso do simulador SITL para validação inicial de algoritmos de navegação.

Para validar o algoritmo de detecção e rastreamento, um simulador computacional foi concebido para gerar animações de ETMs adentrando uma área restrita, passando por situações de oclusão e cruzando com outras ETMs. A **figura 13** mostra capturas de tela do algoritmo de detecção e rastreamento em ação. A primeira captura (a) mostra uma região verde correspondente ao terreno, retângulos marrons representando regiões de oclusão e um retângulo branco representando uma ETM. A segunda captura (b) mostra a imagem binária com a ETM destacada do plano de fundo. A terceira captura (c) mostra o rastro da ETM ao longo do tempo, incluindo posições determinadas por predição.

O simulador também gera dados de *groundtruth*. O gráfico da **figura 14** mostra alguns resultados qualitativos do processo de detecção e rastreamento comparando dados de rastreamento gerados pelo algoritmo com os dados de *groundtruth* gerados pelo simulador.



**Fig. 13** – Resultado do algoritmo de rastreamento aplicado em animação gerada pelo simulador. (a) imagem original; (b) imagem subtraída do plano de fundo; (c) rastreamento computado.

Na legenda mostrada na parte superior do gráfico da **figura 14**, “GT” significa “*groundtruth*”, “Rast” significa “rastreamento”, “S.O.” significa “sem oclusão” e “C.O.” significa “com oclusão”. O gráfico possui 8 linhas, que representam trajetórias percorridas pelas respectivas ETMs ao longo da imagem, sendo 4 geradas pelos dados de *groundtruth* (linhas grossas) e 4 computadas pelo algoritmo de detecção e rastreamento (linhas estreitas). Cada ponto gerador de tais linhas refere-se ao centroide da ETM que percorreu a trajetória representada pela linha. A linha relacionada ao *groundtruth* foi alargada para facilitar a comparação, uma vez que o gráfico apresenta muitas sobreposições.

O primeiro experimento, representado na **figura 14** pelas linhas cinza e amarela, corresponde a uma ETM movendo-se em linha reta sem sofrer oclusão. A linha amarela sofre variações pequenas, mas não deixa de ocupar a região central da linha de *groundtruth*. O segundo experimento, representado na **figura 14** pelas linhas preta e azul-clara, corresponde a uma ETM movendo-se em linha reta e sofrendo algumas oclusões. O rastreamento computado também ficou próximo ao *groundtruth*, exceto pela região destacada, onde ocorreu uma situação de oclusão que demandou o uso mais intenso do mecanismo de predição.

O terceiro experimento, representado na **figura 14** pelas linhas vermelha e branca, simulou uma ETM em um trajeto com curvas sem sofrer oclusão. O

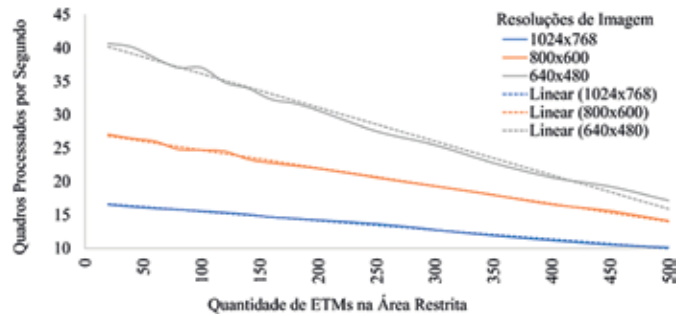


rastreamento também ficou bem próximo ao *groundtruth*. O quarto e último experimento, representado na **figura 14** pelas linhas azul e verde, simulou uma ETM em uma trajetória com curvas e sofrendo oclusões em alguns pontos. Nesse quarto experimento, o rastro computado ficou próximo ao *groundtruth*, porém, destaca um trecho em que uma oclusão provocou um leve desvio na trajetória estimada pela política de predição.

Para validação do tempo de execução, foram geradas 16 animações simulando grupos de 20 a 500 ETMs passando simultaneamente pela cena. As animações foram capturadas em 3 resoluções de vídeo distintas, a saber, 1024x768, 800x600 e 640x480, representando diferentes resoluções de câmera. A **figura 15** mostra a relação entre a quantidade de ETMs e a taxa de quadros por segundo para cada resolução testada. As linhas pontilhadas são apenas para demonstrar uma tendência linear na complexidade do algoritmo.

Os experimentos foram executados em um Raspberry Pi 4B com 4GB de RAM, com temperatura mantida entre 41 e 45 graus Celsius. Uma observação já esperada é que o melhor caso ocorre com a presença de 20 ETMs, enquanto o pior caso ocorre com a presença de 500 ETMs. Para a resolução de vídeo 640x480, a taxa de quadros por segundo variou entre 17,1 (pior caso) e 40,7 (melhor caso), incorrendo em um tempo de processamento por quadro de 58ms e 24ms, respectivamente. Na resolução de vídeo 800x600, a taxa de quadros por segundo variou entre 14,1 e 27,1, demandando 71ms e 37ms por quadro, respectivamente. Com a resolução de 1024x768, a taxa de quadros por segundo variou entre 10,1 e 16,5, demandando 99ms e 61ms por quadro, respectivamente.

**Fig. 14** – Comparação entre trajetórias *groundtruth* e trajetórias computadas pelo algoritmo de detecção e rastreamento.



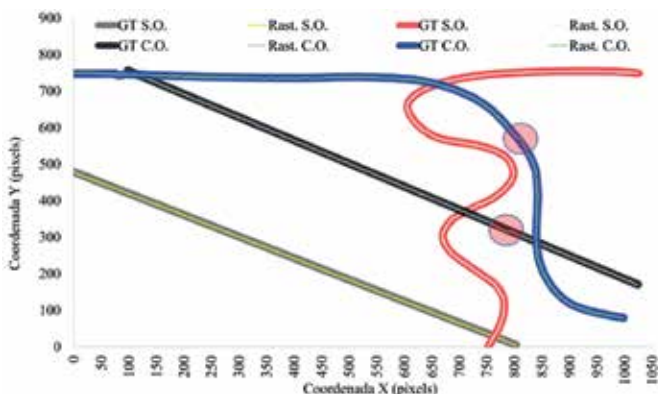
**Fig. 15** – Influência da quantidade de ETMs e da resolução de vídeo na taxa de quadros processados por segundo.

Nota-se que, quanto maior é a resolução do vídeo, menor é o impacto da quantidade de ETMs no tempo de processamento, indicando que o algoritmo passa a maior parte do tempo realizando processamento de imagem e menos tempo gerenciando as ETMs presentes na cena. A tendência linear e o fato da quantidade de ETMs presentes na cena ser menos impactante no tempo de execução do que as demais variáveis envolvidas contribuem para facilitar o dimensionamento dos recursos computacionais necessários para alguma aplicação específica que demande, por exemplo, vigilância de áreas extensas e o uso de câmeras de maior resolução.

Por fim, vale mencionar que, em termos qualitativos, o tamanho mínimo da ETM detectável varia de acordo com a quantidade de *pixels* que ela ocupa na imagem e com o contraste que ela possui em relação ao plano de fundo (solo). O algoritmo de detecção e rastreamento proposto se mostrou capaz de rastrear ETMs ocupando no mínimo 4 *pixels* nos vídeos gerados por simulação. Entretanto, em ambientes reais visualmente ruidosos, o tamanho mínimo da ETM detectável tende a aumentar na medida em que a intensidade dos ruídos aumenta, sendo que o estabelecimento dessa tendência demanda estudos mais específicos.

## 7. Considerações finais

Este artigo apresentou um SARP para detecção autônoma de ETMs em áreas restritas em



ambientes abertos, pensado para situações em que os meios convencionais de vigilância, como CFTV e patrulhamento humano, mostram-se inviáveis do ponto de vista de tempo de estabelecimento, estrutura disponível, custo e logística operacional. A solução proposta pode trazer vantagens relevantes nesses aspectos, além de reduzir o risco a vidas

humanas por demandar somente um operador agindo à distância.

No que diz respeito à ARP, os resultados obtidos experimentalmente demonstram a viabilidade do protótipo construído em atender às premissas estabelecidas, mostrando-se uma plataforma de baixo custo, portátil, e de fácil operação e manutenção, desse modo, útil para diversas aplicações. Quanto

ao software desenvolvido, os resultados de desempenho demonstram que a complexidade algorítmica admite execução em tempo real de forma totalmente embarcada na ARP, dispensando a necessidade de transmissão das imagens para processamento externo.

Uma limitação importante de se mencionar é o tempo de voo reduzido das ARPs portáteis do tipo quadricóptero, o que limitaria o tempo útil do sistema de detecção de ETMs e, conseqüentemente, a viabilidade de uso. Algumas soluções podem ser usadas para reduzir essa limitação. Uma possibilidade é o uso de múltiplas ARPs com substituição automática da ARP estacionária. Outra possibilidade é o uso de alimentação cabeada a partir do solo, como ocorre em Papachristos [45]. Uma sugestão para trabalho futuro é a criação de um algoritmo para determinar o nível de ameaça de uma ETM de acordo com suas características físicas e comportamentais, como seu tamanho, velocidade, padrão de movimentação e direção.

## Agradecimentos

Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001.

## Referências

- [1] HAERING, N.; VENETIANER, P. L.; LIPTON, A. The evolution of video surveillance: an overview. **Machine Vision and Applications**, v. 19, n. 5-6, p. 279–290, 2008.
- [2] NAYAR, S. K.; NARASIMHAN, S. G. Vision in bad weather. In *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. USA: IEEE, 1999. p. 820–827.
- [3] WANG, H.; LI, S. Z.; WANG, Y. Face recognition under varying lighting conditions using self quotient image. In *Proceedings of the Sixth IEEE Int. Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*. USA: IEEE, 2004. p. 819–824.
- [4] HAUTIERE, N.; TAREL, J.P.; AUBERT, D. Towards fog-free in-vehicle vision systems through contrast restoration. In **IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)**. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007. p. 1–8.
- [5] JAKOB, E. S.M.; PAVLICEK, D.; PECHOUCHEK, M. Autonomous UAV surveillance in complex urban environments. **IEEE Int. Joint Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technologies**, v. 2, n. 1, p. 82–85, 2009.
- [6] NAIDOO, Y.; STOPFORTH, R.; BRIGHT, G. Development of an UAV for search & rescue applications. **IEEE AFRICON**, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2011.
- [7] GOTOVAC, D.; GOTOVAC, S.; PAPI, V. Mapping aerial images from UAV. In **IEEE International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)**, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2016.
- [8] WU, C.; QI, J.; SONG, D.; QI, X.; LIN, T.; HAN, J. Development of an unmanned helicopter automatic barrels transportation system. In **IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**, v. 1, n. 1,

- p. 4686–4691, 2015.
- [9] MERWADAY, A.; GUVENC, I. UAV assisted heterogeneous networks for public safety communications. In **IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)**, v. 1, n. 1, p. 329–334, 2015.
  - [10] GRIPPA, P. Decision making in a UAV-based delivery system with impatient customers. **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, v. 1, n. 1, p. 5034–5039, 2016.
  - [11] BESTDRONEFORTHEJOB. **Best Drone for The Job: Pro Photography**. 2021. Acesso: 28 ago. 2021. Disponível em: <http://bestdroneforthejob.com/product-category/work-drones/pro-photography-drones/>.
  - [12] LEAGUE, D. R. **The Drone Racing League**. 2021. 28 ago. de 2021. Disponível em: <https://thedroneracingleague.com/>.
  - [13] GEORGE, E. A.; TIWARI, G.; YADAV, R.; PETERS, E.; SADANA, S. UAV systems for parameter identification in agriculture. In **IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS)**, v. 1, n. 1, p. 270–273, 2013.
  - [14] SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to Autonomous Mobile Robots**. 2.ed. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 2011. 472 p.
  - [15] SABATELLI, S. et al. A sensor fusion algorithm for an integrated angular position estimation with inertial measurement units. In: **Design, Automation & Test In Europe Conference & Exhibition (DATE)**, 2011, Grenoble, France. USA: IEEE, 2011. p. 1-4.
  - [16] FRIEDRICHS, Stephan et al. **The continuous 1.5 D terrain guarding problem: Discretization, optimal solutions, and PTAS**. 2015, Cornell University, Ithaca, New York, USA: arXiv preprint arXiv:1509.08285.
  - [17] SZELISKI, R. **Computer vision: algorithms and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010.
  - [18] AJMERA, J.; SIDDHARTHAN, P.; RAMARAVIND, K.; VASAN, G.; BALAJI, N.; SANKARANARAYANAN, V. Autonomous visual tracking and landing of a quadrotor on a moving platform. In **2015 Third Int. Conference on Image Information Processing (ICIIP)**. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015. p. 342–347.
  - [19] KAKVAND, P.; JABERZADEH, M.; INALLOU, M. M.; ALBORZ, Y. Smart onboard UAV system: using computer vision system to find a movable and stationary target. In **2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)**. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015. p. 694–699.
  - [20] ZHANG, C.; CHEN, J.; SONG, C.; XU, J. An UAV navigation aided with computer vision. In **26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)**. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014. p. 5297–5301.
  - [21] GUPTA, S.; MOHANDAS, P. I. T.; CONRAD, J. A Survey of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles. In **2012 Proceedings of IEEE Southeastcon**. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012. p. 1–6.
  - [22] PAZ, C.; PAINA, G. P.; CANALI, L. Visual homography-based pose estimation of a quadrotor using spectral features. In **2015 Latin America Congress on Computational Intelligence (LA-CCI)**. USA: IEEE, 2015. p. 1–6.
  - [23] FOWERS, S.; LEE, D.J.; TIPPETTS, B.; LILLYWHITE, K.; DENNIS, A.; ARCHIBALD, J. Vision aided stabilization and the development of a quad-rotor micro UAV. In **2007 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA)**. USA: IEEE, 2007. p. 143–148.
  - [24] TANG, D.; LI, F.; SHEN, N.; GUO, S. UAV attitude and position estimation for vision-based landing. In **2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT)**. USA: IEEE, 2011. p. 4446–4450.
  - [25] JIN, Z.; WANG, X.; PAN, Q.; MORAN, B. Optimal UAV localisation in vision based navigation systems. In **2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)**. USA: IEEE, 2016. p. 1021–1025.
  - [26] SUKANYA, C. M.; GOKUL, R.; PAUL, V. A survey on object recognition methods. **International Journal of Science, Engineering and Computer Technology**, v. 6, p. 48–52, 2016.
  - [27] POUNDS, P.; MAHONY, R.; CORKE, P. Modelling and control of a quad-rotor robot. In Australian Robotics and Automation Association Inc. In **Proceedings Australasian Conference on Robotics and Automation 2006**. [S.l.], 2006.
  - [28] NAVAJAS, G. T.; PRADA, S. R. Building your own quadrotor: A mechatronics system design case study. In **IEEE 2014 III International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA)**. [S.l.], 2014. p. 1–5.
  - [29] TARIQ, Abdullah; OSAMA, Syed M.; GILLANI, A. Development of a low cost and light weight UAV for photogrammetry and precision land mapping using aerial imagery. In **IEEE. 2016 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)**. [S.l.], 2016. p.360–364.
  - [30] SILVA, L. C. B.; BERNARDO, R. M.; OLIVEIRA, H. A.; ROSA, P. F. F. Multi-UAV agent-based coordination for persistent surveillance with dynamic priorities. In **2017 International Conference on Military Technologies**

- (ICMT), 2017, p. 765-771, doi: 10.1109/MILTECHS.2017.7988859.
- [31] CHO, J.; SUNG, J.; YOON, J.; LEE, H. Towards Persistent Surveillance and Reconnaissance Using a Connected Swarm of Multiple UAVs. In **IEEE Access**, vol. 8, p. 157906-157917, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019963.
- [32] WU, Y.; WU, S.; HU, X. Cooperative Path Planning of UAVs & UGVs for a Persistent Surveillance Task in Urban Environments. In **IEEE Internet of Things Journal**, vol. 8, no. 6, p. 4906-4919, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3030240.
- [33] BANDARUPALLI, A.; SWARUP, D.; WESTON, N.; CHATERJI, S. Persistent Airborne Surveillance using Semi-Autonomous Drone swarms. In **Proceedings of the 7th Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications**, 2021, p. 19–24, doi:10.1145/3469259.3470487.
- [34] SHARMA, M. K.; SINGAL, G.; GUPTA, S. K.; CHANDRANEIL, B.; AGARWAL, S.; GARG, D.; MUKHOPADHYAY, D. INTERVENOR: Intelligent Border Surveillance using Sensors and Drones. In **6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)**. IEEE, 2021, p. 1-7.
- [35] ABDEL-MALEK, M. A.; IBRAHIM, A. S.; MOKHTAR, M. Optimum UAV positioning for better coverage-connectivity tradeoff. 2017 **IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)**, 2017, p. 1-5, doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292633.
- [36] SUN, J.; MASOUIROS, C. Drone Positioning for User Coverage Maximization. In **2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)**, 2018, p. 318-322, doi: 10.1109/PIMRC.2018.8580746.
- [37] NASRAOUI, L.; ROY, S. Optimal UAV Positioning for Terrestrial Users. In **91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)**, IEEE, 2020, p. 1-5, doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128870.
- [38] NAM, L. H.; HUANG, L.; LI, X.J.; XU, J.F. An approach for coverage path planning for UAVs. In **IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)**. USA: IEEE, 2016. p. 411–416.
- [39] BERNARDO, R. M.; SILVA, L. C. B.; ROSA, P. F. F. Onboard Video Stabilization for Low Cost Small RPAS Surveillance Applications. In **7th Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS)**, 2018, p. 450-455, doi: 10.1109/BRACIS.2018.00084.
- [40] BERNARDO, R. M.; SILVA, L. C. B.; ROSA, P. F. F. Conceção de Uma Plataforma de VANT de Baixo Custo para Uso em Pesquisas. **V Workshop de Comunicação em Sistemas Embarcados Críticos (WoCCES)**. SBC, 2017.
- [41] BERNARDO, R. Maroquio. **The DroneAPI Python Library**. Disponível em: <https://github.com/maroquio/DroneAPI>. Acesso em 20 de janeiro de 2021.
- [42] DRONEKIT. **Developer Tools for Drones**. 2021. 20out. de 2021. Disponível em: <https://dronekit.io/>.
- [43] MAVLINK. **Micro Air Vehicle Communication Protocol**. 2021. 20out. de 2021. Disponível em: <https://mavlink.io/en/>.
- [44] ARDUPILOT. **Open-Source Autopilot Software System**. 2021. 20out. de 2021. Disponível em: <https://ardupilot.org/>.
- [45] PAPACHRISTOS, C.; TZES, A. The power-tethered UAV-UGV team: A collaborative strategy for navigation in partially-mapped environments. In **22nd Mediterranean Conference on Control and Automation**, 2014, p. 1153-1158, doi: 10.1109/MED.2014.6961531.

# Contrate produtos da FHE POUPEX pela internet\_



Consórcio



Crédito com Garantia de Imóvel



Crédito para Bens Duráveis



Crédito Imobiliário Digital



Crédito Simples Digital



Plano Odontológico



Seguro Auto



Seguro Fiança Locatícia



Seguro Residência



Seguro Viagem

Mais comodidade e segurança para você!



Aponte sua câmera  
para o código ao  
lado ou acesse  
[www.fhe.org](http://www.fhe.org)



Aponte sua câmera  
para o código ao  
lado ou acesse  
[pouplex.com.br](http://pouplex.com.br)



# Crédito Imobiliário Digital

Sua casa própria com as melhores condições

Juros baixos para aquisição de imóvel, terreno e material de construção\*.



## Diferenciais:

**Teto IPCA** – limite de 6,5% a.a. para a inflação.

**Garante30** – possibilidade de alterar, em até 30 meses, a forma de atualização do contrato.

**Idade limite** – 85 anos.

Consulte as normas e condições vigentes.  
\*Material de construção somente para militares das Forças Armadas e conveniados.





# PÓS-GRADUAÇÃO NO IME

Bolsas: CAPES, CNPq e FAPERJ

## Mestrado

- Engenharia Nuclear
- Engenharia Elétrica
- Engenharia de Transportes
- Sistemas e Computação

## Mestrado e Doutorado

- Química
- Ciência dos Materiais
- Engenharia de Defesa



Apoio:



**CREA-RJ**  
Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura  
e Agronomia do Rio de Janeiro

Matrículas: Fluxo Contínuo

Tel.: (21) 2546-7114 – Fax: (21) 2546-7089 – [www.ime.eb.br](http://www.ime.eb.br) – [sd1@ime.eb.br](mailto:sd1@ime.eb.br)