



Vol. XXXVII - Número 1 / 2020

Revista Militar de

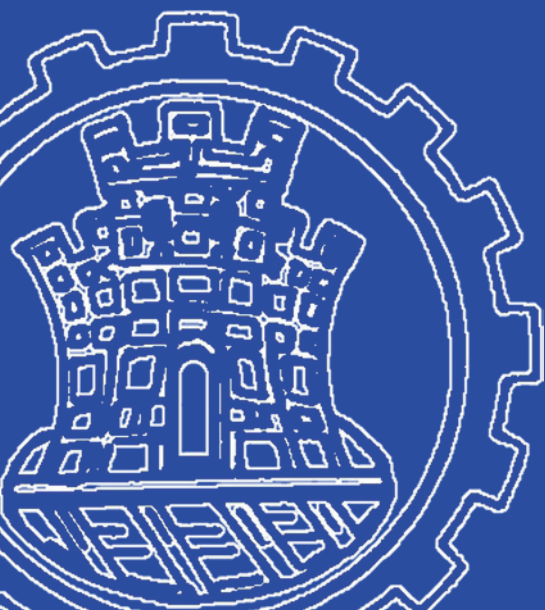
Ciência e Tecnologia

Versão on-line: ISSN 2316-4522

ARTIGOS

- PULVERIZADORES DE AGENTES QUÍMICOS – A QUÍMICA NO GÁS LACRIMOGÊNICO E SPRAY DE PIMENTA* 03
Fernando Barcellos Razuck, Renata Cardoso de Sá Ribeiro Razuck
- CONTROLE DE QUADRICÓPTERO VIA LINEARIZAÇÃO POR REALIMENTAÇÃO ROBUSTA ASSOCIADA À SÍNTESE H^∞* 11
Vinicius M. G. B. Cavalcanti, Alberto M. Simões
- AValiação DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO SRTM E LIDAR E SUAS APLICAÇÕES EM ANÁLISES MORFOMÉTRICAS* 20
Frederico José Basílio do Nascimento, Leonardo Castro de Oliveira
- REVISÃO DE MÉTODOS DE FORMAÇÃO DE SWARMS UTILIZANDO MORFOGÊNESE* 28
André L. Braga, Ronaldo R. Goldschmidt, Paulo F. F. Rosa
- ESCALONADOR MULTICRITÉRIO PARA SISTEMAS DE MENSAGENS MILITARES EM REDES TOLERANTES A ATRASOS E DESCONEXÕES* 39
Guilherme C. Sampaio, Gustavo C. Sampaio, Ronaldo M. Salles
- ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA DE ÁREA URBANA COM O USO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT) QUADROTOR* 51
Elías N. N. Elías, Vivian O. Fernandes, Mirele V. Silva, Elaine G. V. Jesus

Versão on-line: <http://rmct.ime.eb.br>



Biblioteca do Exército
Tradição e qualidade em publicações



Editorial

A

través da história, a comunidade internacional vem passando pelo surgimento ou agravamento de doenças e epidemias em diversas partes do mundo, algumas relacionadas com atividades humanas de risco e manuseio de elementos perigosos ou à falta de cuidado com o manejo ambiental.

Na época atual, o planeta assiste perplexo a rápida evolução do Coronavírus (SARS-CoV-2), que colocou as autoridades sanitárias em alerta, em todo o mundo. Diante de cenários de ameaça química, biológica, radiológica e nuclear, o Exército Brasileiro (EB) vem, sistematicamente, conduzindo ações para dotar sua estrutura com pessoal capacitado, equipamentos especializados e instalações para possibilitar ações preventivas ou corretivas no caso de incidentes desencadeados por agentes biológicos.

Hoje, o Exército pode contar com curso um de pós-graduação em Química, no Instituto Militar de Engenharia (IME), que dispõe de um Laboratório de Modelagem Molecular aplicada à defesa química e biológica (LMDQB), equipado com diversos softwares para construção e visualização de moléculas. Um Laboratório de Antibióticos equipado com todos os equipamentos e insumos básicos para síntese orgânica, sendo dedicado ao desenvolvimento de novas metodologias sintéticas e a síntese de compostos com atividade biológica em potencial, especialmente antibióticos e antiparasitários. Bem como, um Laboratório de Cromatografia Gasosa e um Espectrometria de Massas e um Laboratório de Cromatografia Líquida. As pesquisas nos laboratórios envolvem recursos visando o planejamento de potenciais antídotos contra os agentes de guerra química e fármacos contra potenciais agentes de guerra biológica como Bacillus anthracis, Coxiella burnetti, Variola virus e Yersinia pestis.

A Força Terrestre conta também com o Instituto de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (IDQBRN), que realiza o Estágio Básico de Ações e Resposta a Emergências Químicas, Biológicas, Radiológicas e Nucleares para os militares recém-transferidos para a organização militar.

Ainda nessa área, recentemente, o Exército Brasileiro teve o seu Laboratório de Análises Químicas (LAQ) do Instituto de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (IDQBRN) do Centro Tecnológico do Exército (CTEx), obteve a certificação de Proficiência Oficial da Organização para Proibição de Armas Químicas (OPAQ). Tal resultado garantiu ao LAQ o título de primeiro representante do Grupo da América Latina e do Caribe (GRULAC), que recebeu o conceito A na história desse teste oficial da OPAQ.

Publicação de Pesquisa e
Desenvolvimento Científico-Tecnológico
Do Exército Brasileiro



Revista Militar de Ciência e Tecnologia

Comandante do Exército

Gen Ex Edson Leal Pujol

Departamento de Ciência e Tecnologia

Gen Ex Décio Luís Schons

Departamento de Educação e Cultura do Exército

Gen Ex Tomás Miguel Miné Ribeiro Paiva

Editor

Ten Cel Cav Marco André Leite Ferreira
Diretor da BIBLIEx

Corpo Redatorial

- Presidente: Gen Bda Armando Morado Ferreira
- Editor executivo: Edison Conde Perez dos Santos
- Engenharia Civil, Transportes e Ciências Ambientais:
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães – IME (SE/2)
- Engenharia Nuclear: Sérgio de Oliveira Vellozo – IME (SE/7)
- Engenharia Elétrica: Geraldo Magela Pinheiro Gomes – 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: Antônio Eduardo Carrilho da Cunha – IME (SE/10)
- Engenharia Química e Química: Kátia Regina de Souza – IME (SE/5)
- Engenharia Cartográfica: Heloísa Alves Silva Marques – IME (SE/6)
- Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação: Aderson Campos Passos – IME (SE/9)
- Outras áreas: Paulo Henrique Coelho Maranhão – IME (SE/4); Raquel Aparecida Abrahão Costa e Oliveira – IME (SE/6)

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
- Drª. 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

Composição

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA – IME
Praça General Tibúrcio, 80
Praia Vermelha – Rio de Janeiro-RJ – CEP 22.290-270
Tel.: (21) 2546-7115

Projeto Web

Rubenildo Python de Barros
<http://rmct.ime.eb.br>
rmct@ime.eb.br

Revisão, programação e diagramação

Coordenador: Edison Conde Perez dos Santos
Revisores: Giana Elvira de Oliveira Marquês; Suzana Marly da Costa Magalhães
Programador Web: Rubenildo Python de Barros
Diagramador: Luiz Tadeu Carqueija Mota

Projeto gráfico e editoração eletrônica

Luiz Tadeu Carqueija Mota – IME (SMA)
Telefone: (21) 2546-7118
tadeu.mota@gmail.com

Direção, edição e distribuição

BIBLIEx
Palácio Duque de Caxias
Praça Duque de Caxias, 25 – 3º andar – Ala Marcílio Dias
Rio de Janeiro, RJ – Brasil – CEP 20.221-260
Tels.: (21) 2519-5715 – Fax: (21) 2519-5569
www.bibliex.eb.mil.br
bibliex@bibliex.eb.mil.br

Pulverizadores de agentes químicos – a química no gás lacrimogêneo e spray de pimenta

Fernando Barcellos Razuck^a, Renata Cardoso de Sá Ribeiro Razuck^b

^aInstituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD),

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN),

Rio de Janeiro, Brasil, ^bFaculdade de Educação, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ),

Campus Universitário Praia Vermelha,

Rio de Janeiro - RJ, Brasil,

fernandor@ird.gov.br

RESUMO: Partindo-se da premissa de que ciência e tecnologia estão presentes no cotidiano, entende-se ser necessário informar aos cidadãos as características dos produtos tecnológicos, para que aqueles tenham consciência dos seus riscos. Dessa maneira, este artigo buscou trabalhar com a questão das armas não letais, especificamente dos pulverizadores de agentes químicos (gás lacrimogênio e spray de pimenta), já que, nos últimos anos, estas armas vêm sendo utilizadas na dispersão de manifestações, gerando um grande número de informações inexatas sobre o seu uso. Este trabalho tem, então, por objetivo, mostrar algumas características dessas armas, como a composição química, a detecção e as reações no organismo. Verificou-se que, apesar da ampla bibliografia, aspectos do seu uso ainda dependem de pesquisas na área. Entende-se, assim, a importância da aplicação da química no cotidiano, levando à compreensão da ciência como fenômeno social.

PALAVRAS-CHAVE: Pulverizadores de Agentes Químicos. Gás Lacrimogênio. Spray de Pimenta. Educação Científica.

ABSTRACT: Based on the premise that Science and Technology are present in everyday life, it is understood that it is necessary to inform citizens about the characteristics of the products coming from their development, so that the latter becomes aware of its risks. In this way, this article has tried to work with non-lethal weapons, specifically chemical sprayers (tear gas and pepper spray), since, in recent years, these weapons have been used in the dispersion of manifestations, generating a large inaccurate information about its use. The aim of this work is to show some characteristics of these weapons, such as chemical composition, detection and reactions in the body. It was verified that despite the wide bibliography, aspects of its use still depend on research in the area. It is understood the importance of the application of chemistry in daily life, leading to the understanding of science as a social phenomenon.

KEYWORDS: Sprayers of Chemical Agents, Tear Gas, Pepper Spray, Science Education.

1. INTRODUÇÃO

Pode-se afirmar hoje em dia que ciência e tecnologia (C&T) estão cada vez mais presentes no cotidiano das pessoas, mesmo que estas não tenham consciência dessa influência. Assim, é primordial que os cidadãos tenham acesso às informações com relação aos produtos tecnológicos, a fim de que possam tomar decisões sobre o seu uso ou não.

Nesse sentido, tendo em vista a importância de tornar o ensino da C&T mais próximo da realidade dos cidadãos, a fim de que estes venham a ter consciência dos seus riscos, o presente trabalho visou buscar um fato social, atual e relevante, e verificar de que maneira esse fato poderia interferir nas suas vidas.

No caso, optou-se por trabalhar com a questão das armas não letais, principalmente dos chamados pulverizadores de agentes químicos, devido ao fato de haver um grande número de informações inexatas pela população sobre o uso e a exposição a estas armas.

Isso porque, nos últimos anos, o Brasil vem acompanhando uma série de manifestações populares que envolvem questões de cunho social e político. Como resposta a estas manifestações, com o objetivo de controlá-las, foram utilizadas, pelas forças policiais, estas armas.

Este trabalho está, então, estruturado de forma a mostrar, inicialmente, a classificação das principais armas não letais, para daí identificar aquelas que utilizam os pulverizadores de agentes químicos (no caso, o gás lacrimogênio e o *spray* de pimenta). Posteriormente, serão apresentadas informações com relação as suas características, composição química, detecção do seu uso no ambiente e as possíveis reações no organismo, uma vez que podem, segundo a literatura, de causar lesões graves, fortes alergias e, em casos extremos, a morte.

Isso porque entende-se ser importante atrelar o momento histórico-social com a presença da Ciência – no caso a Química – em um determinado período, inserindo-se, assim,

no enfoque denominado História, Filosofia e Sociologia da Ciência (HFS). Logo, a inclusão da HFS na Ciência apresenta razões que se fundamentam na Filosofia e Epistemologia, contribuindo assim para a humanização da concepção de Ciência, facilitando mudanças de visões mais simplistas para posições mais contextualizadas sobre o uso desse tipo de conhecimento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aspectos legais

De acordo com o Departamento de Defesa dos Estados Unidos [1], definem-se armas não letais como

...armas, dispositivos e munições que são explicitamente projetados e empregados principalmente para incapacitar imediatamente alvo pessoal ou material, minimizando fatalidades, ferimentos permanentes para pessoal e danos indesejáveis à propriedade na área alvo ou ambiente. As armas não letais são destinadas a produzir efeitos reversíveis sobre pessoal e material. As armas não letais são projetadas e empregadas para alcançar objetivos militares, minimizando perdas humanas ou danos a bens e equipamentos.

Ou seja, as armas não letais seriam aquelas utilizadas com a intenção de evitar as fatalidades ou ferimentos permanentes e indesejáveis para a população, tendo em mente também minimizar os danos a bens materiais.

No Brasil, a utilização desse tipo de arma foi autorizado pelo Exército (no uso de suas atribuições) por meio da Portaria nº 020 – D Log (de 27 de dezembro de 2006, posteriormente substituída pela Portaria nº 001 – D Log, de 05 de janeiro de 2009), que trata da aquisição de armamento e munição não letais, classificadas como de uso restrito, para as atividades de segurança privada autorizadas nos termos da lei nº 7.102/83 [2].

Nessa mesma portaria foi listado o rol desses equipamen-

tos, ficando, agora, para a Polícia Federal, a atribuição de definir as dotações em armamentos e munições não letais, bem como a de estabelecer as normas de utilização, armazenamento e destruição das munições [2].

Sendo assim, a Portaria nº 387/2006, alterada em 2008, prevê algumas opções de armas e munições não letais, tais como: pulverizadores de agente químico (gás lacrimogêneo e *spray* de pimenta); arma de choque elétrico; granadas lacrimogêneas e fumígenas; munições calibre 12 lacrimogêneas e fumígenas; e munições calibre 12 com balas de borracha ou plástico. Dessa maneira, foram apresentados alguns exemplos dessas armas, muitas delas já comercializadas no país (Fig. 1).



Fig. 1 – Exemplos de Armas não Letais, como bala de borracha, tasers, gás lacrimogêneo e *spray* de pimenta. Fonte: <http://operacao-naoletais.blogspot.com.br/>

1. Sobre esses materiais, a própria Polícia Federal fez alguns apontamentos sobre quando devem ser usados e como devem ser manuseados [2]:
2. Com relação aos pulverizadores de agentes químicos, estes foram desenvolvidos para utilização em ações de auto-defesa e controle de pequenos distúrbios, não se recomendando o emprego em ambientes confinados;
3. As armas de choque elétrico (também conhecidas como “Taser”, devido ao nome de um dos fabricantes), cuja carga elétrica é armazenada em uma bateria, podem gerar uma descarga de eletrochoque de até 50.000 volts. Têm como propósito paralisar o corpo, podendo ainda serem uma arma de choque de contato ou de lançamento de eletrodos energizados;
4. As granadas manuais fumígenas lacrimogêneas e de sinalização são armas não letais e têm por finalidade emitir nuvens densas de fumaça lacrimogênea ou inócua de sinalização, não sendo, apesar do nome, artefatos explosivos, pois não possuem carga explosiva, funcionando apenas pela queima do agente químico em seu interior; e

As munições de elastômero (calibre 12) são classificadas como munições não letais antipessoal de restrição física, visando à intimidação psicológica do agressor, devendo ter como alvo a região das pernas.

- a) Além desses equipamentos mais difundidos, são indicados outros tipos de armas não letais, conforme sugerido abaixo. Seriam elas [3, 4, 5, 6]:
- b) laser atordoante – utiliza luzes brilhantes que ofuscam a visão temporariamente, ainda restrito ao uso militar;
- c) feixe de energia direcionada – atua por ondas que causam

dor por meio de radiofrequência;

- d) lançadores de bean bag – chamadas de “saco de feijão”, utilizam armas com calibre 12, que disparam pequenos pacotes de malha com carga de projeção;
- e) sistemas pepperball – são armas de gás comprimido que arremessam projéteis fragmentáveis de plástico. Esse projéteis são carregados de gás de pimenta, com alcance de até dez metros; e
- f) sistemas acústicos – visam distanciar o alvo por meio de dor no sistema auditivo, causada devido às frequências que operam em infra-som, som audível e ultra-som.

2.2 Pulverizadores de agentes químicos

Serão apresentados agora detalhes dos chamados “Pulverizadores de Agentes Químicos”, observando aspectos como a sua composição química, os efeitos no organismo, a detecção no ambiente e algumas recomendações e alertas sobre o seu uso.

Assim, as armas químicas não letais, que são constituídas por químicos tóxicos (e seus precursores) e por aparelhos usados para a sua aplicação, podem ser classificadas de acordo com os seus efeitos em [3]:

Agentes que inibem a entrada de oxigênio a partir do sangue, levando à asfixia e morte (cianeto):

- Asfixiantes;
- Agentes neurotóxicos;
- Toxinas;
- Agentes incapacitantes; e
- Agentes perturbadores.

Nesse trabalho foram estudados os agentes perturbadores, que são irritantes sensoriais que causam lacrimejo, irritação da pele e do trato respiratório, e ocasionalmente, náuseas e vômitos (no caso, o *spray* de pimenta e o gás lacrimogêneo).

Inicialmente, vale ressaltar aqui que se entende como gás lacrimogêneo (que deriva do latim *lacrima* = lágrima) todo tipo de gás ou substância que, de forma genérica, tem a capacidade de irritar a pele, os olhos e vias respiratórias. Na verdade, não são gases, mas uma suspensão em aerossol de determinadas substâncias. Vale destacar ainda que “gás lacrimogênio” refere-se ao termo usado popularmente, sendo o termo científico correto “substância irritante”. Também podem ser chamados por armas químicas ou aerossóis de defesa pessoal [2, 3, 4, 5].

Sendo assim, pode-se dizer que os gases lacrimogênicos populares são constituídos pelos irritantes sensoriais respiratórios aerossol de pimenta (*spray* de pimenta, ou gás OC - derivado do inglês “Oleoresin capsicum”), e os irritantes sensoriais oculares 2-clorobenzilideno malononitrilo (CS), cloroacetofenona (CN), dibenzoxazepina (CR) e alfa-bromotolunitrila.

Dessa maneira, para facilitar o entendimento, foram analisados, separadamente, os agentes químicos presentes no *spray* de pimenta (nas formas de capsaicina e vanililamida de ácido pelargônico - PAVA) e os denominados gases lacrimogêneos (no caso CS, CN, CR e alfa-bromotolunitrila). pontos).

3. SPRAY DE PIMENTA

Serão descritos agora os 2 (dois) principais tipos de *spray* de pimenta: a Capsaicina e Vanililamida de ácido pelargônico (PAVA).

3.1 Capsaicina

O principal agente do *spray* de pimenta (Fig. 2), conhecido também pela sigla “OC” (derivado do inglês “Oleoresin capsicum”), tem como princípio ativo e pungente uma oleoresina chamada de Capsaicina (8-metil-vanilil-6-nonenamida, figura 2), encontrada em pimentas e pimentões do gênero *Capsicum* [7, 8].

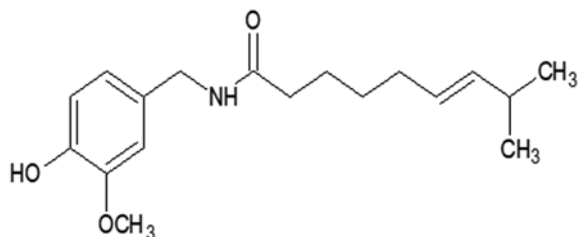


Fig. 2 – Fórmula Estrutural da Capsaicina.

Os extratos concentrados de pimentas (oleoresina de capsaicina) já vêm sendo utilizados historicamente para preparar desde alimentos picantes até anti-inflamatórios e bactericidas [6]. Essa diversidade se deve à presença dos capsinecoides, que podem ser encontrados naturalmente de cinco formas, a saber: capsaicina, dihidrocapsaicina, nordihidrocapsaicina, homocapsaicina e homodihidrocapsaicina. Os mais abundantes são a capsaicina e a dihidrocapsaicina (Figura 3).

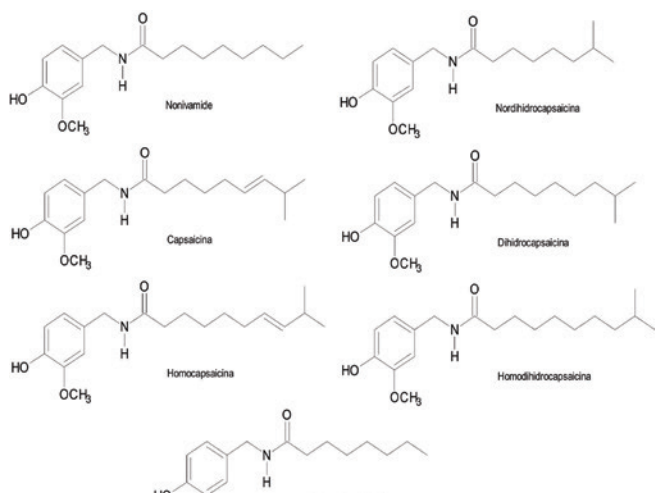


Fig. 3 – Estruturas químicas dos capsinecoides, que contêm em comum o grupo funcional vanilamida (4- hidroxi -3- metoxibenzilamida) e uma cadeia acila contendo 10 a 11 átomos de carbono. Fonte: [6].

Vale destacar, com relação à capsaicina, que, ao contrário de outros agentes que possuem composição química definida, ela possui composição muito variável e complexa, sendo constituída por cerca de 100 compostos diferentes. A compo-

sição varia com fatores como o estado de maturação do fruto, as condições ambientais em que o fruto cresceu e condições da extração [3].

A capsaicina é um composto orgânico e, por esta característica, é misturado em óleo na fabricação do *spray*, o que dificulta a sua remoção com água. Assim, a capacidade dos capsinecoides para produzir dor levou ao desenvolvimento de *sprays* de pimenta, que, em geral, contêm uma solução de 10% de oleoresina de capsaicina diluída em solvente (por exemplo, cloreto de metileno, tricloroetileno, isopropanol, freon, glicopropileno, etanol, metanol ou éter dimetilico) e um propulsor gasoso – geralmente N_2 ou CO_2 [6].

Na Finlândia, por exemplo, a solução usada pela polícia local é composta por uma mistura contendo 5,5% de OC, isobutano (30,5%), como um propelente, e álcool isopropílico (64%) como carreador. No caso dos *sprays*, a concentração total de capsinecoides varia de 0,1 a 2,0% (do peso seco da pimenta) e depende da variedade da pimenta, das condições de crescimento e do tempo de colheita [6, 7].

Os extratos concentrados de pimentas (oleoresina de capsaicina) já vêm sendo utilizados historicamente para preparar desde alimentos picantes até anti-inflamatórios e bactericidas [6]. Essa diversidade se deve à presença dos capsinecoides, que podem ser encontrados naturalmente de cinco formas, a saber: capsaicina, dihidrocapsaicina, nordihidrocapsaicina, homocapsaicina e homodihidrocapsaicina. Os mais abundantes são a capsaicina e a dihidrocapsaicina.

3.1 Vanililamida de ácido pelargônico (PAVA)

A vanililamida de ácido pelargônico (PAVA), também chamada de nonivamida, é um capsicinóide e trata-se de uma amida formada por ácido pelargônico (ácido nonanóico) e a amina vanililo. A PAVA é um composto químico (N-[(4-Hidroxi-3-metoxifenil)metil]nonanamida), cuja estrutura molecular está representada na Figura 4. Está presente em pimentas, mas é comumente produzido sinteticamente. Este composto é mais estável ao calor do que a capsaicina. A PAVA costuma ser utilizada como aditivo alimentar para adicionar ardor a condimentos, aromatizantes e misturas de especiarias.

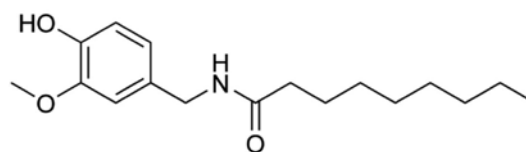


Fig. 4 – Fórmula Estrutural da Vanililamida de ácido pelargônico (PAVA). Fonte: [3,9].

Algumas características físico-químicas dos compostos relacionados ao *spray* de pimenta encontram-se na tabela 1.

Tab 1. Características Físico-Químicas dos compostos relacionados ao *spray*

Nome/ Nome IUPAC/ Fórmula Molecular	Ponto de Fusão (°C) / Ebulição (°C)	Densidade	Solubilidade	Escala Scoville (grau de Picate)*	Forma/cor	Cheiro
Capsaicina/8-Metil-N-vanilil-trans-6-nonenamida ($C_{18}H_{27}NO_3$)	65/210	1,3 g/ cm ³	Água (ins.)/ Etanol (sol.)	15.000. 000	Pó branco cristalino	Altamente volátil e pungente
PAVA/ N-[(4-Hidroxi-3-metoxifenil) metil] nonanamida ($C_{17}H_{27}NO_3$)	54/190	1,1g/cm ³	Água (ins.)/ Metanol, Éter Dietilico e Cloro-fórmio (sol.)	9.200. 000	Pó esbranqui- çado	Pungente

*O ardor ou o grau de picante de uma pimenta é determinado pela quantidade de capsaicina presente na mesma, e está descrita pela escala de Scoville, desenvolvida por Wilbur Scoville, que varia entre os tipos “pimento” (menos picante – valor 0), “molho tabasco” (valor 2500) até ao mais picante “resiniferatoxina” (valor 16.000.000). Fonte [3,8].

4. GÁS LACRIMOGÊNEO

O gás lacrimogêneo é o termo comumente dado (como visto anteriormente) a uma família de compostos químicos (cerca de 15 no total) usados para a dispersão de pessoas [11]. Desse total, 4 compostos são os mais utilizados, sendo eles: CS (ortoclorobenzilmalononitrila – $C_{10}H_5ClN_2$), CN (cloroacetofenona – C_8H_7OCl), CR (dibenzoxazepina – $C_{14}H_{11}N$) e o 2-bromo-2-fenilacetoneitrila (C_8H_6BrN), como pode ser visto na figura 5 e tabela 2.

Vale lembrar que, de todos estes compostos, como o primeiro a ser criado e utilizado (sendo também a forma mais comum até hoje) é o CS, formulado em 1928 pelos químicos americanos Ben Corson e Roger Stoughton, em que as letras “CS” referem-se exatamente às iniciais dos seus nomes [15].

Porém, foi somente em 1956 que o laboratório britânico de armas químicas e biológicas em Porton Down desenvolveu o CS como arma de controle de motins, vindo posteriormente a ser utilizado em larga escala pelos Estados Unidos durante a Guerra do Vietnã. Entretanto, esses compostos foram utilizados pela primeira vez, para fins militares, na 1ª Guerra Mundial. O CN, no caso, possui maior poder lesivo de que o CS, pelo fato de permanecer mais tempo no ar [15].

O seu uso, em geral, é realizado por meio de granada fumígena, que, ao ser acionada, provoca a queima do iniciador, que, por sua vez, promove a dispersão do agente químico, aumentando, assim, a pressão interna gerada pelos gases, o que provoca a abertura dos orifícios de emissão. O processo funciona de forma que, após a retirada do grampo de segurança, o sistema de iniciação ejeta a alça do acionador e dispara a espoleta, o que inicia a queima da coluna de retardo que excita o misto iniciador, provocando a queima do agente químico [2].

Assim, por se tratar de um processo de sublimação por queima (passagem direta do estado sólido para o gasoso) do agente químico, o corpo da granada atinge uma alta temperatura. Vale lembrar que estas granadas devem ser lançadas (com o uso de luvas com isolamento térmico) em ambiente aberto e distante de materiais de fácil combustão. Além disso, é importante, no momento da operação, a identificação da

direção do vento, para que o operador não seja contaminado pelo gás [2].

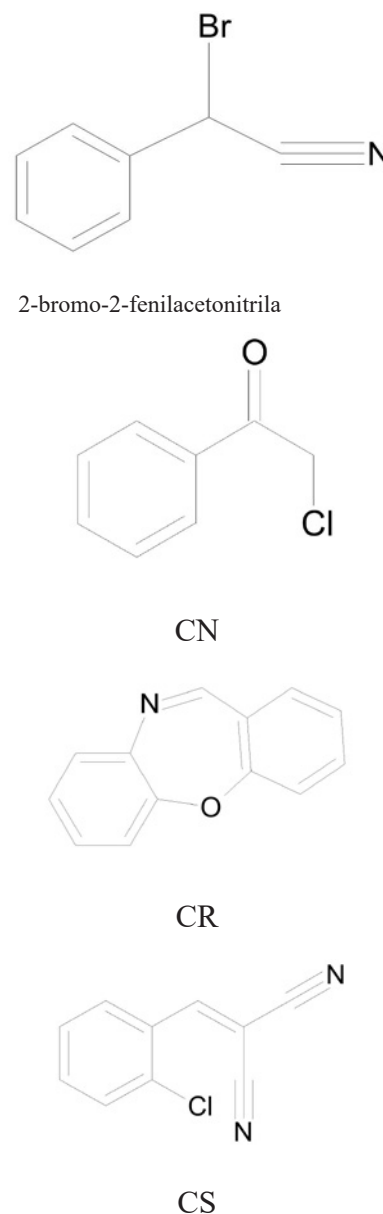


Fig. 5 – Estruturas químicas dos Compostos relacionados ao gás lacrimogêneo mais utilizados: 2-bromo-2-fenilacetoneitrila, CN, CR e CS [12, 13, 14].

Tab 2. Características Físico-Químicas dos compostos relacionados aos Gases Lacrimogêneos: 2-bromo-2-fenilacetoneitrila, CN, CR e CS. Fonte: [12, 13, 14].

Nome/ Fórmula Molecular	Ponto de Fusão (°C) / Ebulição (°C)	Volatilidade (mg/m³; 20 °C)	Solubilidade	LCt50 (inalação; mg.min/m³)	Forma/cor
Cloroaceto-fenona (CN) C_8H_7OCl	55/ 244-245	105	Água (insol.); Etanol (sol.)	11.000	Cristal / Incolor
2-clorobense-lide-nomalo Nonitrila (CS) $C_{10}H_5ClN_2$	95/ 310-315	10	Água (pouco sol.); Acetona (sol.)	25.000	Cristal / Branco Aci- zenta-do

O CS pode ser preparado por condensação do o-clorobenzaldeído com o malonitrilo (Figura 6) ou por condensação do o-clorobenzaldeído com cianoacetamida, seguido de uma desidratação (Figura 7).

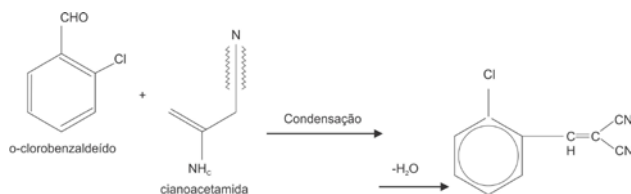


Fig. 6 – Síntese do gás CS por condensação do o-clorobenzaldeído com o malonitrilo. Fonte: [3,9].

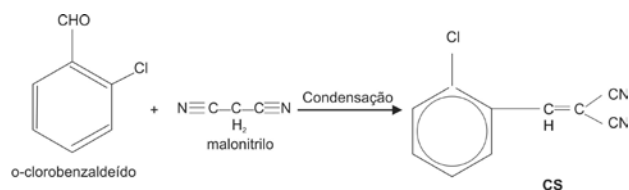


Fig. 7 – Síntese do gás CS por condensação do o-clorobenzaldeído com cianoacetamida. Fonte: [3,9].

Já o CN pode ser preparado por cloração da acetofenona (Figura 8).

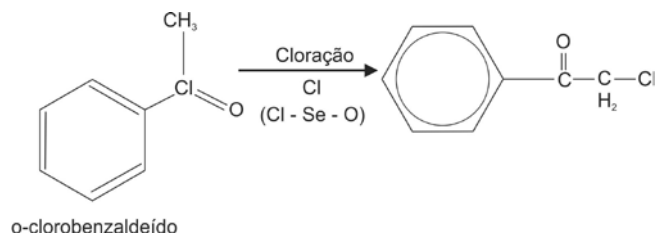


Fig. 8 – Síntese do gás CN. Fonte: [3, 9].

Por fim, desataca-se que, no Brasil, por determinação legal, somente o gás CS pode ser utilizado no controle de distúrbios sociais pela polícia [16]. Ainda especificamente com relação ao CS (que é o composto mais utilizado nas dispersões), este agente é disseminado na forma de uma fumaça ou neblina de gotículas minúsculas, que entram no corpo via inalação, agindo sobre os receptores sensoriais na pele e mucosa, causando sensação de queima e lacrimejamento. Todavia, devido ao mecanismo de filtragem do nariz e das vias aéreas superiores, a maioria das partículas são removidas e secretadas [16].

5. FISILOGIA E TOXOLOGIA

Em geral, os pulverizadores de agentes químicos agem como irritantes sensoriais, cuja toxicidade é dependente da dose e do tempo de exposição. Assim, interagem farmacologicamente com os receptores dos nervos sensoriais, tendo como principais órgãos-alvo os olhos, nariz, trato respiratório e a pele. Qualquer um dos pulverizadores apresentados possui três características comuns: início rápido dos sintomas (segundos a alguns minutos), curta duração dos efeitos (15-30 minutos), após a vítima eliminar o contato, e elevada razão de segurança entre a dose letal (estimada) e a dose efetiva [3].

Com relação aos efeitos (dependendo do local e do tempo

de exposição), estes podem ser:

a) Efeitos Imediatos

- Olhos: produção lacrimal excessiva, ardor, visão turva, vermelhidão;
- Nariz: corrimento nasal, ardor, inchaço;
- Boca: ardor, irritação, dificuldade em engolir, salivação;
- Pulmões: aperto no peito, sensação de engasgamento, respiração ruidosa (pieira), falta de ar;
- Pele: queimaduras, erupção cutânea;
- Outros: náuseas e vômitos.
- 2) Efeitos Após Exposição Prolongada ou a Dose Elevada
- Cegueira;
- Glaucoma;
- Morte imediata devido a queimaduras químicas na garganta e pulmões;
- Edema pulmonar;
- Parada respiratória, podendo levar à morte.

3) Efeitos a Longo Prazo

- Problemas oculares que incluem glaucoma e cataratas;
- Distúrbios respiratórios como a asma. [3].

5.1 Spray de Pimenta - Principais Efeitos no Organismo

Com relação ao spray de pimenta, pode-se dizer que se trata, então, de um tipo de gás lacrimogêneo e inflamatório, uma vez que causa irritação e lacrimejo dos olhos – podendo até mesmo levar à cegueira temporária –, atuando principalmente nas mucosas dos olhos, nariz e da boca. Dessa maneira, a exposição aos sprays de pimenta provoca uma intensa resposta fisiológica que inclui cegueira temporária, lacrimejamento, desorientação, falta de ar e asfixia [2, 7].

A exposição teria como principal objetivo a incapacidade temporária da vítima com o mínimo de efeitos secundários e tóxicos a longo prazo. Os capsinecoides produzem dor por meio do estímulo ao receptor vanilamida, que é um integrador molecular de estímulos potencialmente nocivos (por exemplo, abaixando o pH e aumentando a temperatura). Os capsaicnoides naturais exibem pungência variável, devido às diferenças na sua capacidade para promover a despolarização da membrana por meio de ligação ao receptor vanilamida [7].

Já a capsaicina produz uma dor intensa quando aplicada sobre a pele e a parte frontal dos olhos, bem como produz uma inflamação neurogênica devido à liberação de neuropeptídeos contidos nos terminais nervosos. Além disso, a utilização do spray pode trazer danos ao olho humano, promovendo alterações da conjuntiva, da córnea e erosões epiteliais puntiformes, que podem ser causadas tanto pela capsaicina quanto pelos solventes presentes no spray [8].

5.2 Gás Lacrimogêneo - Principais Efeitos no Organismo

Sobre o gás lacrimogêneo, especificamente com relação ao CS, que é o composto mais utilizado, a sua base tóxica ainda não é totalmente compreendida, mas se entende que sua ação sobre a pele e membranas mucosas forma, entre outras substâncias, o ácido clorídrico, causando irritação [11, 17].

O gás CS é lipossolúvel e tem a propriedade de gerar desconforto nos olhos (como ardor, hiperemia conjuntival, blefaroespasma e lacrimejamento), na boca (sabor ácido e sensação de queimação da língua), no nariz (rinorreia, congestão nasal e irritação), nas vias respiratórias (tosse e dor de garganta) e na pele (sensação de queima e às vezes, alucinação), além de náuseas e vômitos. Geralmente, os sintomas desaparecem dentro de 30-60 minutos após a exposição [11, 17].

A concentração de gás CS que pode ser letal (para 50 % dos adultos saudáveis, baseado em testes com animais) é de 25.000 a 150.000 mg/m³. Em ambiente aberto, uma granada de CS gera uma nuvem de 6 a 9 m de diâmetro, chegando à concentração de 2.000 a 5.000 mg/m³ no seu centro (e menor nas extremidades). Já em ambientes fechados, estes valores podem ser ainda mais altos [11].

Na Inglaterra e no País de Gales, por exemplo, é utilizado um spray de CS por forças policiais desde 1996. Este spray de CS é constituído por 5 % (p/v) de solução de CS em MIBK (metil isobutil cetona), compreendendo 1,5 g de CS dissolvidos em um volume total de 30 mL, contidos em recipiente com nitrogênio como propelente [18].

Nesse spray de CS, ao ser pulverizado à distância de 2 a 3 metros de uma pessoa, o diâmetro médio das partículas de pulverização fica entre 417-441 micrômetros (µm). Existem, no entanto, algumas partículas com diâmetros inferiores a 100 µm e 50 µm. Quando a pulverização é realizada em distâncias menores de 0,1 m (distância menor do que o recomendado para uso operacional), a proporção das gotículas menores diminui [18].

Dessa forma, embora a grande parte pulverizada seja constituída de partículas maiores, existe uma proporção de gotículas com diâmetros inferiores a 100 µm, o que, em caso de descarga completa da lata, pode liberar um máximo de 20 mg de solução de pulverização para o trato respiratório superior, de forma que as pequenas gotículas podem chegar às vias aéreas médias e grandes do pulmão [18].

Tendo em vista que estas vias aéreas são afetadas na asma brônquica, é possível que um ataque asmático ocorra em indivíduos susceptíveis. Foi também reconhecido que o aumento da taxa e a profundidade de respiração que ocorre no indivíduo sob stress pode, além disso, conduzir a uma maior inalação de CS [18].

6. TRATAMENTO E DESCONTAMINAÇÃO

Os agentes químicos agem preferencialmente na pele, nos olhos e no trato respiratório. No caso de tratamento, alguns procedimentos indicados envolvem ventilação, banhos com sabão e uso de luvas. Quanto aos olhos, estes podem ser lavados com soro fisiológico ou água. A pele pode ser lavada com uma solução suavemente alcalina (composta por bicarbonato de sódio 6 %, carbonato de sódio 3 % e cloreto de benzalcônio 1 %) e corticoides [11, 17]. Outra sugestão é o uso da solução Diphoterine®, que é um produto utilizado na descontaminação da pele e dos olhos [19].

No geral, em uma exposição a agentes químicos, deve-se :

a. Afastar-se da área afetada – evitar as nuvens de gás densas e próximas do solo, pois os agentes químicos formam uma nuvem densa próximo ao solo;

b. Remover as roupas – as roupas removidas pela cabeça devem preferencialmente ser cortadas com uma tesou-

ra de forma a evitar o seu contato com o rosto. As roupas contaminadas devem ser colocadas no interior de um saco plástico, evitando-se também o contato com as mãos;

c. Lavar o corpo - Remover qualquer resíduo de agente da pele, utilizando grandes quantidades de água e sabão. Caso os olhos apresentem sinais de contaminação, deve-se lavar os olhos com água abundante durante 10 a 15 minutos. No caso de usar lentes de contato ou óculos, estes devem ser descartados e lavados com água e sabão e podem voltar a ser utilizados assim que devidamente limpos; e

d. Deve-se sempre procurar um médico após o contato com estas substâncias [3, 9].

Por fim, algumas páginas da internet apresentam informações acerca da relação entre o gás lacrimogêneo e o uso do vinagre (ácido acético, em concentração de 5 %) como protetor, que, a princípio, seria inócuo (para combater as queimaduras alcalinas na pele) e que as únicas substâncias reativas de fato seriam a máscara com filtro de carvão ativado e solução de permanganato de potássio (para as feridas). Sugerem ainda aeração e banho frio [20, 21].

7. TÉCNICAS DE ANÁLISE LABORATORIAL PARA DETECÇÃO DE AGENTES QUÍMICOS

Vários métodos de análise para detecção de compostos químicos utilizados em artefatos não letais (no caso, capsinecoides em pimentas e CS no gás lacrimogêneo para a detecção do seu uso no ambiente) foram descritos por alguns autores, geralmente via cromatografia ou espectrometria [3, 16, 22, 23, 24, 25, 26].

No caso, para capsinecoides, extraídos diretamente da pimenta, a identificação e a quantificação são indicadas tanto por cromatografia (gasosa, camada fina e líquida) quanto por espectrometria de massa, além da detecção por ultravioleta. Por essas técnicas, também foi possível se identificar uma grande diversidade de capsinecoides em diferentes variedades de pimenta [3, 24, 26, 27].

Já para a identificação de CS (derivados de artefatos de gás lacrimogêneo) no ambiente, alguns trabalhos demonstraram a possibilidade de detecção também via cromatografia (líquida), espectrometria, ultravioleta e infravermelho, além de reação química para produção de derivados utilizados como indicadores [16, 22, 23, 25, 26].

Em um desses trabalhos, o gás CS reage com o cianeto de potássio (KCN) em dimetil sulfoxido (DMSO), liberando dicianometida que pode ser detectada em bandas de infravermelho [22].

Na detecção de CS via metabólitos, foi realizado um trabalho no qual recrutas tiveram a urina coletada duas horas após exposição ao gás. O metabólito ácido 2-clorohipúrico (2-Chlorhippuric) foi detectado nas amostras por espectrometria de massa, sugerindo que possa servir com um indicador do uso de CS em ambientes [25].

Além desses, dois artigos também sugeriram a detecção de CS no ambiente. No primeiro deles, a detecção foi feita em substâncias expostas ao gás, como algodão e água [23]. A investigação examinou a estabilidade de lacrimógenos sobre esses materiais e também a detecção de produtos derivados da sua degradação. Os resultados demonstraram que, dentro de poucos dias após a utilização, o gás CS pode ser detectado em algodão, vidro e aço inoxidável expostos, mas não em água. Porém, um dos produtos da degradação do CS, o o-clorobenzaldeído ou ácido o-clorobenzóico, pode ser detectado em água [23].

O trabalho também analisou a detecção de CN em água ou algodão, mas não na superfície de vidro ou de aço inoxidável e de nonivamida, uma capsaicina sintética (detectada a partir de algodão, de água e de vidro e superfícies de aço inoxidável). Assim, conclui-se que em locais onde pulverizadores químicos foram usados, as superfícies manchadas devem ser recolhidas o mais rapidamente possível, e as amostras enviadas em recipientes fechados para análise laboratorial [23].

O outro trabalho, inclusive realizado no Brasil, desenvolveu uma metodologia para a determinação prévia (no local) e posterior (no caso, em laboratório) da utilização de CS [16]. A partir de amostras do solo, grama e alvenaria, foi feita a detecção por meio da visualização de uma reação oriunda do CS com a benzofurazana (BSO, utilizada como papel indicador no próprio local), chamada “Reação de Beirute”, que tem por característica uma coloração alaranjada. Posteriormente, em laboratório, foi feita a detecção da quinoxalina (produto da reação) por análise em infravermelho [16].

Por fim, foi feita a dos principais agentes ativos que se pretende identificar. São seis: a Capsaicina, o 2-Cloroben-zilideno Malonitrilo (CS), a 2-Cloroacetofenona (CN), a n-Nonanoilmorfolina (Morfolina), o Ácido Pelargônico Vanililamida (PAVA) e o Isotiocianato de Alilo cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa, além da capsaicina, por meio de um detector de ionização de chama [3, 9].

8. DISCUSSÃO

Com relação às armas não letais, vários autores e até páginas da internet apresentam as características, composição e os efeitos dos usos tanto dos pulverizadores químicos quanto das balas de borracha [3, 7, 9, 11, 18, 21, 28, 29, 30, 31]. Apesar disso, alguns autores apresentam conclusões diversas sobre as concentrações de capsinecoides em pimentas, assim como produtos fabricados a partir de extratos de pimenta, uma vez que a oleoresina de capsaicina é obtida pela extração de pimentas frescas, o que pode levar a uma grande variabilidade nas concentrações [3, 7, 9, 11, 18].

Essas diferenças nas concentrações de componentes ativos em sprays de pimenta interferem na qualidade, eficácia, e segurança desses produtos, o que pode ocasionar resultados imprevisíveis, colocando em risco a segurança e a saúde dos indivíduos que estão expostos. Sendo assim, seriam necessários métodos analíticos quantitativos para determinar a concentração exata para os capsinecoides em sprays de pimenta e para a regulação da formulação desses sprays, aumentando substancialmente a previsibilidade da potência do produto, a eficácia e o seu potencial para causar toxicidade. Alguns autores também apresentam as mesmas conclusões sobre o uso dos gases CS. Para eles, na perspectiva toxicológica, há uma grande necessidade de se realizar mais pesquisas para se verificar as reais consequências da exposição ao gás, uma vez que ainda há dúvidas com relação à formação de tumores e doenças pulmonares, por exemplo. Os autores também apresentam críticas com relação à padronização da concentração de gás nos pulverizadores [11, 18].

Além disso, este trabalho apresenta informações que permitam atender à perícia criminal da Polícia Civil, Federal e das Polícias Judiciárias das Forças Armadas, no controle analítico destas armas ditas não letais, para que, no caso de um uso indevido (como, por exemplo, na utilização do gás CS em recintos fechados) seja possível a detecção da presença dos pulverizadores químicos.

9. CONCLUSÃO

Com o intuito de se relacionar o ensino de ciências à realidade do cidadão, buscou-se para verificar de que maneira alguns apresentavam características científicas que possibilitassem a aproximação entre o e o conhecimento químico e o cotidiano.

Dessa forma, optou-se então por trabalhar com a questão dos pulverizadores de agentes químicos, os quais são usados pelas forças de segurança pública e defesa no controle de distúrbios, devido ao fato de haver um grande número de informações inexatas sobre o uso e a exposição a estas armas.

Verifica-se, portanto, que há ainda muito o que estudar sobre a utilização dessas armas, no que tange às questões de concentração, padronização e consequências da utilização desses produtos. Acredita-se, então, dessa maneira, ser importante o debate com relação ao sistema de controle das práticas policiais decorrentes dos pulverizadores de agentes químicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Disponível em: <http://jnlpw.defense.gov/pressroom/faq_p1.html>. Acessado em: 13 de novembro de 2013.
- [2] Brasil. Departamento da Polícia Federal. Disponível em: <<http://www.dpf.gov.br/simba/seguranca-privada/legislacao-normas-e-orientacoes/manual-do-vigilante/Caderno%20Didatico%20CENL%20II.pdf>>. Acessado em: 8 de novembro de 2013.
- [3] Landim, V. M. P. Análise forense de aerossóis de defesa pessoal em Portugal. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Tomar, Portugal, 2016. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/18526/1/1_An%C3%A1lise%20Forense%20de%20Aeross%C3%B3is%20de%20Defesa%20Pessoal%20em%20Portugal.pdf>. Acessado em: 30 de junho de 2017.
- [4] Alexander, J. B. Vencendo a guerra – armas avançadas, estratégias e conceitos para o mundo pós onze de setembro, 1a. ed., Welser-Itage: Rio de Janeiro, 2005.
- [5] Sandes, W. F.; Uso não letal da força na ação policial: formação, tecnologia e intervenção governamental; Revista Brasileira de Segurança Pública 2007, 2, 26.
- [6] Uso do Spray de Pimenta durante manifestações. (Fonte: https://www.google.com.br/search?q=spray+de+pimenta&espv=2&biw=1600&bih=799&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAcQ_AUoAmoVChMI3sen9oWVYQIVhQ6QCh24WQGU#tbm=isch&q=spray+de+pimenta+condor&imgsrc=EyCvqoIn_wnApM%3A)
- [7] Reilly, C. A.; Crouch, D. J.; Yost, G. S.; Quantitative Analysis of Capsaicinoids in Fresh Peppers, Oleoresin Capsicum and Pepper Spray Products; Journal of Forensic Sciences 2001, 46, 502.
- [8] Vesaluoma, M.; Müller, I.; Gallar, J.; Lambiase, A.; Moilanen, J.; Hack, T.; Belmore, C.; Tervo, T.; Effects of Oleoresin Capsicum Pepper Spray on Human Corneal Morphology and Sensitivity; Investigative Ophthalmology & Visual Science 2000, 41, 2138.
- [9] Olajos E. J.; Salem H.; Riot Control Agents: Pharmacology, Toxicology, Biochemistry and Chemistry; Journal of Applied Toxicology 2001, 21, 355-391.
- [10] Uso do Gás Lacrimogêneo durante manifestações. (Fonte: <http://apublica.org/2013/06/gas-lacrimogeneo-brasileiro-utilizado-pela-policia-na-turquia/>) [10]
- [11] Hu, H.; Fine, J.; Epstein, P.; Kelsey, K.; Reynolds, P.; Walker, B.; Tear Gas—Harassing Agent or Toxic Chemical Weapon?; The Journal of the American Medical Association 1989, 262, 660.
- [12] Amorim, N. M.; Silva, R. A.; Paiva, D. V.; Silva, M. G. V.; Química e armas não letais: gás lacrimogêneo em foco; Química Nova na Escola (2015), Vol. 37, N° 2, p. 88-92.
- [13] França, T.C.C.; Silva, G.R.; De Castro, A.T. Defesa química: uma nova disciplina no ensino de química. Revista Virtual de Química 2010, v. 2, n. 2, p. 84-104.
- [14] Pubchem, 2015 - <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/22044#section=Related-Compounds-with-Annotation>)

- [15] Levin, R. L.; Mershon, M. M. Contact sensitization to CS, a riot control agent, 1a. ed., National Technical Information Service: Maryland, 1973.
- [16] Carvalho, J. R. M.; Lopes, C. C.; Lopes, R. S.; Cardoso, J. N.; Alves, G.; Miranda, M. G.; Identificação do emprego de artefatos não-letais contendo o agente irritante CS (o-clorobenzilideno-malonitrila) pela reação com óxido de benzofurana; *Revista Militar de Ciência e Tecnologia* 2007, XXIV, 19.
- [17] Bhattacharya, S. T.; Hayward, A. W.; CS gas-implications for the anaesthetist; *Anaesthesia* 1993, 48, 896.
- [18] Com - Committees on toxicity, mutagenicity and carcinogenicity of chemicals in food, consumer products and the environment. Statement on 2-chlorobenzylidene malononitrile (CS) and CS spray. Disponível em <<http://www.food.gov.uk/sites/default/files/cot/cotstatementcspava0604.pdf>>. Acessado em: 3 de dezembro de 2013.
- [19] Viala, B.; Blomet, J.; Mathieu, L.; Hall, A. H.; Prevention of CS "tear gas" eye and skin effects and active decontamination with Diphoterine: Preliminary studies in 5 French Gendarmes; *The Journal of Emergency Medicine* 2005, 29, 5.
- [20] Garcia, R. O que descobri sobre o gás lacrimogêneo. Disponível em: <<http://teoriadetudo.blogfolha.uol.com.br/2013/06/21/o-que-descobri-sobre-o-gas-lacrimogeneo/>>. Acessado em: 4 de novembro de 2013.
- [21] G1. Disponível em: <http://m.g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2013/06/saiba-os-riscos-ao-corpo-das-armas-para-dispersao-de-manifestacoes.html>. Acessado em: 4 de novembro de 2013.
- [22] Binev, I. G.; Binev, Y. I.; Juchnovski, I. N.; A new approach to the detection and determination of o-Chlorobenzylidenemalononitrile (CS) and its chemical relatives; *Spectroscopy Letters* 2002, 35(2), 285.
- [23] Kataoka, M.; Seto, Y.; Tsuge, K.; Noami, M.; Stability and detectability of lachrymators and their degradation products in evidence samples; *Journal of Forensic Sciences* 2002, 47(1), 44.
- [24] Moise, M.; Marutoiu, C.; Badea, D. N.; Gavrila, C.; Patroescu, C.; Application of TLC and GC-MS to the detection of capsaicin from hot peppers (*Capsicum annuum*); *Journal of Planar Chromatography-Modern TLC* 2004, 17(2), 147.
- [25] Riches, J. R.; Read, R. W.; Black, R. M.; Harrison, J. M.; Shand, D. A.; Tomsett, E. V.; Newsome, C. R.; Bailey, N. C.; Roughley, N.; Gravett, M. R.; Stubbs, S. J.; McColm, R. R.; The development of an analytical method for urinary metabolites of the riot control agent 2-chlorobenzylidene malononitrile (CS); *Journal of Chromatography B* 2013, 928, 125.
- [26] Sun, L.; Chen, Z.; Qiu, R.; Wang, L.; Qian, W.; Geng, L.; Luo, A.; Quantitative analysis of components in OC-CS sprays by high performance liquid chromatography with double wavelength UV detection; *Journal of China Ordnance* 2010, 6(3), 216.
- [27] Thomas, B. V.; Schreiber, A. A.; Weisskopf, C. P.; Simple Method for Quantitation of Capsaicinoids in Peppers Using Capillary Gas Chromatography; *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 1998, 46(7), 2655.
- [28] Brasil Escola. Disponível em: <<http://www.brasilescola.com/quimica/o-vinagre-neutraliza-gas-lacrimogeneo.htm>>. Acessado em: novembro de 2013.
- [29] Como Tudo Funciona. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/questao340.htm>>. Acessado em: dezembro de 2013.
- [30] Som da Química. Disponível em: <<http://smdaquimica.blogspot.com.br/2013/10/v-behaviorurldefaultvmlo.html>>. Acessado em: 5 de dezembro de 2013.
- [31] Tua saúde. Disponível em: <<http://www.tuasaude.com/gas-lacrimogeneo/>>. Acessado em: 7 de novembro de 2013.

Controle de quadricóptero via linearização por realimentação robusta associada à síntese H_∞

Vinícius M G B Cavalcanti*, Alberto M Simões

Instituto Militar de Engenharia
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270
Rio de Janeiro, RJ, Brasil
vinicius.cavalcanti@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho trata do projeto de uma lei de controle para o modelo não linear de um quadricóptero sujeito a incertezas paramétricas. O sistema de controle é projetado por meio da combinação de técnicas de linearização por realimentação com a síntese H_∞ . Os resultados das simulações numéricas indicam que a associação de uma lei de linearização por realimentação a um controlador robusto é eficiente para a regulação de sistemas dinâmicos não lineares, operando longe do ponto de equilíbrio. Também é observado que, para uma certa classe de sistemas não lineares, existe equivalência entre as técnicas de linearização por realimentação consideradas.

PALAVRAS-CHAVE: Linearização por realimentação. Síntese H_∞ . Controle de quadricóptero

ABSTRACT: This work deals with the design of controller for the quadrotor nonlinear model subject to parametric uncertainties. The control system is designed by means of feedback linearization techniques combined with H_∞ synthesis. Numerical simulation results indicate that the association of a feedback linearization law and a robust controller is efficient for the regulation of nonlinear dynamics operating far from the equilibrium point. It is also observed that for a certain class of nonlinear systems there is an equivalence between the feedback linearization techniques considered.

KEYWORDS: Feedback linearization. H_∞ synthesis. Quadrotor control.

Notação

H_∞	espaço de Hardy com norma- ∞
W^m	espaço de Sobolev
$ad_f^n g$	colchete de Lie de ordem n de g com respeito a f
$\mathcal{L}_f^n g$	derivada de Lie de ordem n de g com respeito a f
$\gamma_{Wl}(G)$	ganho W do operador não linear G
$\inf(S)$	ínfimo do conjunto S
\mathcal{F}_l	LFT inferior
$\text{span}\{x_1, \dots, x_n\}$	subespaço vetorial gerado por x_1, \dots, x_n

1. INTRODUÇÃO

O controle de sistemas não lineares via linearização por realimentação clássica (CFL, do inglês *Classical Feedback Linearization*) [1]-[2] apresenta algumas limitações importantes. Além do fato da dinâmica linearizada em geral perder relação com a interpretação física do problema original, talvez o mais grave seja o fato de a técnica não conseguir lidar satisfatoriamente com incertezas no modelo.

Baseado no conceito de W -estabilidade introduzido em [4]-[3], foi proposta em [5] uma linearização por realimentação robusta (RFL, do inglês *Robust Feedback Linearization*), como forma de superar as limitações da linearização clássica, citadas acima. A idéia central da RFL consiste em transformar o sistema não linear original em sua

aproximação linear (Jacobiana) em torno de um dado ponto de operação. Desse modo, a combinação com uma lei de controle linear robusta em uma malha externa permite preservar as propriedades de robustez desta última.

Em [6], a efetividade da RFL é corroborada através da sua combinação com uma lei de controle H_∞ baseada na técnica de *loop-shaping* de Glover e McFarlane [7]. A principal vantagem desse método é que ele não requer a obtenção de uma representação linear fracionária para a planta não linear.

No presente trabalho, a abordagem citada, conjugando a RFL e uma lei de controle H_∞ , é utilizada no controle de um dispositivo quadricóptero. Os resultados da aplicação numérica indicam que esta técnica é eficiente para o controle de sistemas não lineares operando afastados do ponto de equilíbrio. Também é observado, que para uma certa classe de sistemas não lineares, como por exemplo, o quadricóptero, existe equivalência entre a RFL e a CFL.

2. LINEARIZAÇÃO POR REALIMENTAÇÃO

Considere o sistema não linear invariante no tempo com múltiplas entradas

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i, \quad (1)$$

$$y_i = h_i(x), \quad (2)$$

onde $f(x)$, $g_1(x)$, ..., $g_m(x)$ são campos vetoriais suaves, e $h_1(x)$, ..., $h_m(x)$ são funções suaves, definidas num subconjunto aberto do \mathbb{R}^n . Note que o sistema é não

linear no vetor de estados $x \in \mathbb{R}^n$, e linear no vetor de entradas $u \in \mathbb{R}^m$.

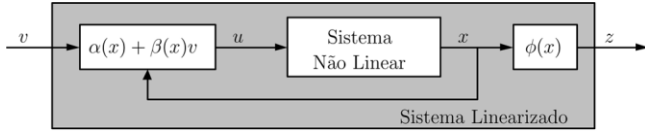


Fig. 1 – Linearização por realimentação.

Com a linearização por realimentação, vide Fig. 1, visa-se encontrar uma transformação de coordenadas, dada por um difeomorfismo $\phi(x)$, funções suaves $\alpha_i(x)$ e $\beta_{ij}(x) \in \mathbb{R}^n$, com $1 \leq i, j \leq m$, de forma que se

$$u_i \stackrel{\text{def}}{=} \alpha_i(x) + \sum_{j=1}^m \beta_{ji}(x)v_j, \quad (3)$$

$$z \stackrel{\text{def}}{=} \phi(x), \quad (4)$$

então as variáveis resultantes z e v satisfazem a equação de estados linear

$$\dot{z} = Az + Bv, \quad (5)$$

na qual o par (A, B) é controlável. Se essa mudança de variáveis for possível, diz-se que o sistema (1)-(2) é linearizável por realimentação.

Uma vez definido o problema da linearização por realimentação, uma questão que naturalmente se coloca é o da existência, ou seja, da linearizabilidade por realimentação da equação de estado não linear. Para obtenção de uma condição de linearizabilidade, estabelece-se adequadamente distribuições geradas por campos vetoriais na forma

$$D_i \stackrel{\text{def}}{=} \text{span}\{ad_f^k g_j : 0 \leq k \leq i, 1 \leq j \leq m\}, \forall 0 \leq i \leq n-1. \quad (6)$$

O Teorema a seguir apresenta condições necessárias e suficientes à linearização por realimentação.

Teorema 1 [1]: Seja a matriz $g(x_0)$ com posto m .

Então, a linearização por realimentação do sistema (1)-(2) é possível se e somente se

- A distribuição D_i tenha dimensão constante, ao redor de x_0 , para cada $0 \leq i \leq n-1$;
- A distribuição D_{n-1} tenha dimensão n ; e
- A distribuição D_i seja involutiva para cada $0 \leq i \leq n-2$.

2.1 Linearização por realimentação clássica

A CFL é realizada através da lei de controle

$$u_c = \alpha_c(x) + \beta_c(x)v_c, \quad (7)$$

e mudança de coordenadas

$$z_c = \phi_c(x). \quad (8)$$

Conforme discutido em [1], a mudança de coordenadas (7)-(8), se possível, tem a forma

$$[\mathcal{L}_f^0 h_1(x) \cdots \mathcal{L}_f^{r_1-1} h_1(x) \cdots \mathcal{L}_f^{r_m-1} h_m(x)]^T, \quad (9)$$

$$\alpha_c(x) \stackrel{\text{def}}{=} -M^{-1}(x) \begin{bmatrix} \mathcal{L}_f^{r_1} h_1(x) \\ \vdots \\ \mathcal{L}_f^{r_m} h_m(x) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\beta_c(x) \stackrel{\text{def}}{=} M^{-1}(x), \quad (11)$$

onde

$$M(x) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} \mathcal{L}_{g_1} \mathcal{L}_f^{r_1-1} h_1(x) & \cdots & \mathcal{L}_{g_m} \mathcal{L}_f^{r_1-1} h_1(x) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{L}_{g_1} \mathcal{L}_f^{r_m-1} h_m(x) & \cdots & \mathcal{L}_{g_m} \mathcal{L}_f^{r_m-1} h_m(x) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

O sistema linearizado

$$\dot{z}_c = A_c z_c + B_c v_c, \quad (13)$$

$$y_c = C_c z_c, \quad (14)$$

está na forma canônica de Brunovsky.

2.2 Linearização por realimentação robusta

A RFL é realizada através da lei de controle

$$u_r = \alpha_r(x) + \beta_r(x)v_r, \quad (15)$$

e mudança de coordenadas

$$z_r = \phi_r(x). \quad (16)$$

Conforme discutido em [5], a mudança de coordenadas (15)-(16), se possível, tem a forma

$$\phi_r(x) \stackrel{\text{def}}{=} T^{-1} \phi_c(x), \quad (17)$$

$$\alpha_r(x) \stackrel{\text{def}}{=} \alpha_c(x) + \beta_c(x) L T^{-1} \phi_c(x), \quad (18)$$

$$\beta_r(x) \stackrel{\text{def}}{=} \beta_c(x) R^{-1}, \quad (19)$$

com

$$T \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial \phi_c(x)}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (20)$$

$$L \stackrel{\text{def}}{=} -M(0) \frac{\partial \alpha_c(x)}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (21)$$

$$R \stackrel{\text{def}}{=} M^{-1}(0). \quad (22)$$

O sistema linearizado

$$\dot{z}_r = A_r z_r + B_r v_r, \quad (23)$$

$$y_r = C_r z_r, \quad (24)$$

corresponde à linearização Jacobiana da equação não linear em torno da origem.

2.3 W-estabilidade

Em um primeiro momento, não parece haver grandes diferenças entre a CFL e a RFL, dado que esta pode ser obtida a partir daquela. Entretanto, conforme discutido no texto a seguir, o fato do sistema linearizado via RFL ser equivalente àquele obtido pela linearização jacobiana revela-se de grande relevância de um ponto de vista da robustez do sistema em malha fechada.

Utilizando o espaço W^n , também conhecido como espaço de Sobolev, uma estabilidade do tipo entrada-saída de um sistema não linear é caracterizada em [3].

A norma de x em W^n é definida como

$$\|x\|_W \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\int_0^\infty x^T(t)x(t)dt + \int_0^\infty \dot{x}^T(t)\dot{x}(t)dt}. \quad (25)$$

Seja $G : W^n \rightarrow W^m$ um sistema não linear invariante no tempo descrito por

$$\dot{x} = F(x, u), \quad (26)$$

$$y = H(x, u), \quad (27)$$

com ponto de equilíbrio $(x, u) = (0, 0)$, e

$$K \stackrel{\text{def}}{=} \{k > 0, \exists \epsilon > 0: \|Gu\|_W \leq k\|u\|_W, \forall u \in W^n \mid \|u\|_W < \epsilon\}. \quad (28)$$

Se K é não vazio, diz-se que G é localmente W -estável e

$$\gamma_{Wl}(G) \stackrel{\text{def}}{=} \inf(K) \quad (29)$$

é o ganho W local de G .

Suponha agora que $G(s) \square C(sI - A)^{-1} + D$ representa a matriz de transferência associada à aproximação linear de G em (26)-(27) em torno do ponto de equilíbrio, de modo que

$$A \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{0,0}, B \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial F}{\partial u} \Big|_{0,0}, C \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{0,0}, D \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial H}{\partial u} \Big|_{0,0}. \quad (30)$$

O resultado, no Teorema 2, a seguir, é central no presente trabalho.

Teorema 2 [4]: Assuma que A, B, C e D definidos como em (30) e que o par (A, B) seja controlável, o par (C, A) seja detectável e $G(s) \square H_\infty$. Então, G é localmente W -estável e

$$\gamma_{Wl}(G) = \|G(s)\|_\infty. \quad (31)$$

Uma forma de interpretar o Teorema 2 é notar que o ganho W local de um sistema não linear invariante no tempo nada mais é do que a norma H_∞ da função de transferência de sua aproximação linear. Com este fundamento, é possível obter uma versão local para o Teorema do Ganho Pequeno [8], indicada no Teorema a seguir.

Teorema 3 [4]: Seja o sistema em malha fechada padrão apresentado na Fig. 2, onde $G_1 : W^n \rightarrow W^m$ e $G_2 : W^m \rightarrow W^n$. Assumindo que este sistema é bem posto [9], existem dois operadores H_1 e $H_2 : W^{n+m} \rightarrow W^{n+m}$ tais que

$$e = H_1 u e y = H_2 u \quad (32)$$

com

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} e u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}. \quad (33)$$

Então se

$$\gamma_{Wl}(G_1)\gamma_{Wl}(G_2) < 1, \quad (34)$$

então o sistema em malha fechada é localmente W -estável.

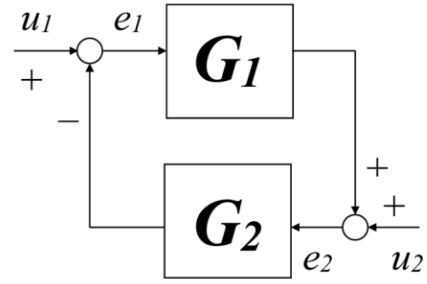


Fig. 2 – Sistema em malha fechada padrão.

O principal resultado desta seção é apresentado no Teorema a seguir.

Teorema 4 [5]: Considere o sistema na Fig. 3 onde a planta não linear P é dada por

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u_\Delta + g_2(x)u, \quad (35)$$

$$y_\Delta = h(x) + k_1(x)u_\Delta + k_2(x)u, \quad (36)$$

$$y = x. \quad (37)$$

Suponha que $f(x)$ e $g_2(x)$ satisfaçam as condições do Teorema 1, de modo que existe a linearização por realimentação dada por (17)-(19). Se o controlador K estabiliza a planta nominal $P(s)$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B_1\hat{u}_\Delta + B_2\hat{u} \\ P(s): \hat{y} &= C\hat{x} + D_1\hat{u}_\Delta + D_2\hat{u}, \\ \hat{y} &= \hat{x} \end{aligned} \quad (38)$$

com

$$A \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=0}, C \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (39)$$

$$B_1 \stackrel{\text{def}}{=} g_1(0), B_2 \stackrel{\text{def}}{=} g_2(0), \quad (40)$$

$$D_1 \stackrel{\text{def}}{=} k_1(0), D_2 \stackrel{\text{def}}{=} k_2(0), \quad (41)$$

e satisfaz

$$\|\mathcal{F}_l(P(s), K)\|_\infty < \frac{1}{\delta}, \quad (42)$$

então a planta não linear nominal em malha fechada $T(A, K)$ é localmente W -estável e

$$\gamma_{Wl}(T(A, K)) < \frac{1}{\delta}. \quad (43)$$

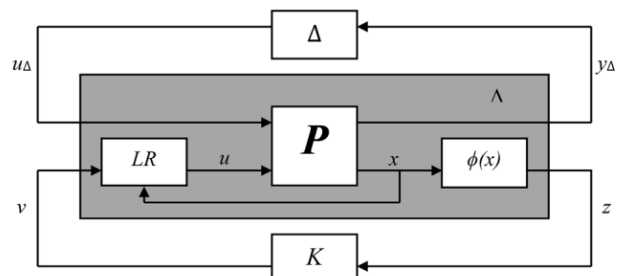


Fig. 3 – Configuração geral de controle com incertezas e linearização por realimentação.

Pode se concluir dos Teoremas 3 e 4, que a lei de controle combinando a RFL e o controlador linear K , definidos anteriormente, garantem a W -estabilidade local do sistema não linear em malha fechada para toda incerteza não linear Δ satisfazendo $\gamma_{Wl}(\Delta) \leq \delta$. Deste modo, as propriedades de

[10]. A fatoração coprima normalizada à direita de $G(s)$ é dada por

$$G(s) \stackrel{\text{def}}{=} N_R(s) M_R^{-1}(s), \quad (44)$$

onde $N_R(s)$ e $M_R(s)$ são matrizes de transferência coprima estáveis.

3.2 Estabilização robusta

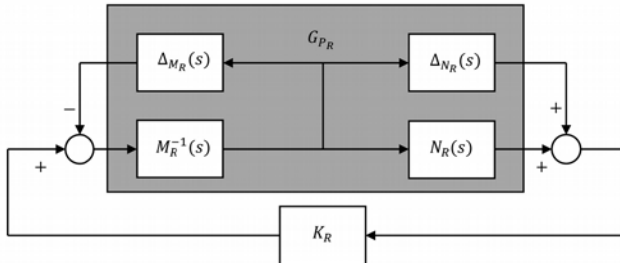


Fig. 4 – Sistema linear perturbado com fatoração coprima normalizada à direita.

Considere o problema ilustrado na Fig. 4 da estabilização robusta da planta incerta baseada na fatoração à direita

$$G_{P_R}(s) = \left\{ (N_R(s) + \Delta_{N_R}(s))(M_R(s) + \Delta_{M_R}(s))^{-1} : \begin{bmatrix} \Delta_{N_R} \\ \Delta_{M_R} \end{bmatrix} \leq \varepsilon \right\}. \quad (45)$$

O objetivo da estabilização robusta é projetar um controlador que estabilize o sistema em malha fechada, não apenas para a planta nominal $G(s)$, mas para toda incerteza admissível.

A condição para estabilidade robusta é dada por

$$\gamma \stackrel{\text{def}}{=} \left\| M_R^{-1}(s) (I - K_R G_{P_R}(s))^{-1} \begin{bmatrix} K_R(s) & I \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \leq \frac{1}{\varepsilon}. \quad (46)$$

3.3 Loop-shaping

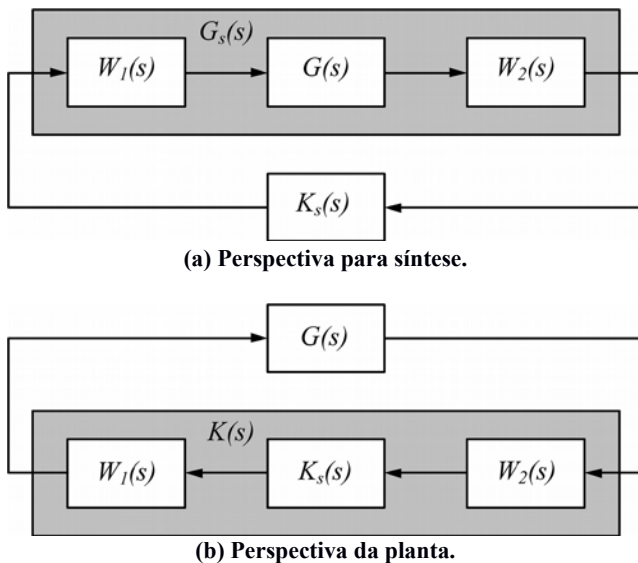


Fig. 5 – Planta com loop-shaping e controlador.

Estabilidade robusta apenas pode não ser de muita utilidade na prática, pois normalmente deseja-se também especificar o desempenho do sistema em malha fechada. Para tanto, em [7] é proposta a introdução de pré-

compensação e pós-compensação à planta de maneira que a resposta frequencial do sistema em malha aberta seja satisfatória. A esta técnica dá-se o nome de *loop-shaping*.

Se W_1 e W_2 são um pré-compensador e um pós-compensador respectivamente, então a planta aumentada é dada por

$$G_s(s) \stackrel{\text{def}}{=} W_2(s) G(s) W_1(s), \quad (47)$$

como mostrado na Fig. 5.

O controlador $K_s(s)$ é sintetizado ao se resolver o problema de estabilização robusta para o sistema aumentado $G_s(s)$ com fatoração coprima normalizada. Então, o controlador final para a planta $G(s)$ será dado por

$$K(s) = W_1(s) K_s(s) W_2(s). \quad (48)$$

4. CONTROLE NÃO LINEAR ROBUSTO

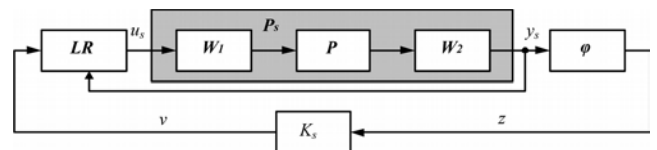


Fig. 6 – Loop-shaping do sistema não linear.

Considere, agora, o sistema não linear aumentado P_s conforme ilustrado na Fig. 6.

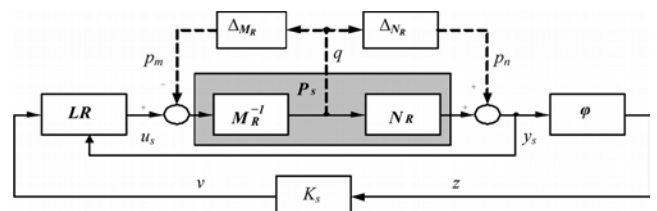


Fig. 7 – Sistema não linear perturbado com fatoração coprima normalizada à direita.

Teorema 5 [6]: O controlador K_s obtido pelo método de loop-shaping de Glover-McFarlane da Seção 3 para o sistema aumentado linearizado $P_s(s)$, combinado à linearização por realimentação robusta e aplicado ao sistema não linear P_s , como na Fig. 7, assegura que o sistema não linear em malha fechada é localmente W-estável para as incertezas tais que

$$\gamma_{W1} \left(\begin{bmatrix} \Delta_{N_R} \\ \Delta_{M_R} \end{bmatrix} \right) < \varepsilon \quad (49)$$

onde ε é a margem de estabilidade local associada à malha fechada e o controlador não linear para o sistema P é dado pela combinação do controlador linear calculado para a aproximação linear $P(s)$ de (48) com a linearização por realimentação robusta.

4.1 Caso particular

Será mostrado a seguir que, sob certa hipótese, as funções de transferências dos sistemas linearizados pelas linearizações por realimentação clássica e robusta estão relacionadas por uma simples transformação linear. Nesse caso, as mesmas propriedades de robustez podem ser alcançadas, independentemente de qual das duas técnicas se

calculado para a aproximação linear $P(s)$ de (48) com a RFL.

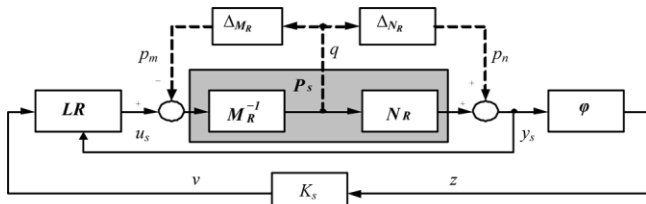


Fig. 7 – Sistema não linear perturbado com fatoração coprima normalizada à direita.

4.1 Caso particular

Será mostrado a seguir que, segundo com certa hipótese, as funções de transferências dos sistemas linearizados por CFL e RFL estão relacionadas por uma simples transformação linear. Nesse caso, as mesmas propriedades de robustez podem ser alcançadas, independentemente de qual das duas técnicas, se utilize, bastando escolher compensadores adequados para o *loop-shaping*.

Proposição 1: Suponha que o sistema não linear (1)-(2) atende ao Teorema 1, ou seja, é linearizável por realimentação. Seja

$$G_c(s) \stackrel{\text{def}}{=} C_c(sI - A_c)^{-1}B_c, \quad (50)$$

a função de transferência do sistema (13)-(14) obtido pela CFL, e

$$G_r(s) \stackrel{\text{def}}{=} C_r(sI - A_r)^{-1}B_r, \quad (51)$$

a função de transferência do sistema (23)-(24) obtido pela RFL. Se

$$\frac{\partial \alpha_c(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (52)$$

então

$$G_r(s) = T^{-1}G_c(s)R^{-1}, \quad (53)$$

com as matrizes T e R dadas pelas equações (20) e (22), respectivamente.

Prova: Inicialmente, sabe-se que

$$z_c(s) = G_c(s)v_c(s), \quad (54)$$

e que

$$z_r = T^{-1}z_c(s), \quad (55)$$

$$v_c(s) = LT^{-1}z_c(s) + R^{-1}v_r(s), \quad (56)$$

Substituindo-se (56) em (54), tem-se que

$$z_c(s) = G_c(s)[LT^{-1}z_c(s) + R^{-1}v_r(s)] \quad (57)$$

$$= [I - G_c(s)LT^{-1}]^{-1}G_c(s)R^{-1}v_r(s). \quad (58)$$

Substituindo-se, em seguida, (58) em (55), tem-se que

$$z_r(s) = T^{-1}[I - G_c(s)LT^{-1}]^{-1}G_c(s)R^{-1}v_r(s). \quad (59)$$

Logo, a função de transferência da RFL pode ser obtida como

$$G_r(s) = T^{-1}[I - G_c(s)LT^{-1}]^{-1}G_c(s)R^{-1}. \quad (60)$$

Se (52) é atendida, então de (21) conclui-se que $L=0$. Por conseguinte, obtém-se (53).

Note que, no caso em que (52) é atendida, e portanto $L=0$, as leis da RFL (17)-(19) se reduzem a

$$\phi_r(x) = T^{-1}\phi_c(x), \quad (61)$$

$$\alpha_r(x) = \alpha_c(x), \quad (62)$$

$$\beta_r(x) = \beta_c(x)R^{-1}. \quad (63)$$

Suponha agora que um controlador linear K_r tenha sido projetado para o sistema linearizado via RFL, de modo que

$$v_r = K_r z_r. \quad (64)$$

Considere ainda que existe um canal de incerteza de u_Δ para y_Δ . Então, a dinâmica incerta do sistema não linear em malha fechada com a RFL e controlador K_r é dada por

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u_\Delta + g_2(x)(\alpha_r(x) + \beta_r(x)K_r\phi_r(x)), \quad (65)$$

$$y_\Delta = h(x) + k_1(x)u_\Delta + k_2(x)(\alpha_r(x) + \beta_r(x)K_r\phi_r(x)). \quad (66)$$

Substituindo (61)-(63) em (65)-(66) tem-se

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u_\Delta + g_2(x)\alpha_c(x) + \beta_c(x)R^{-1}K_rT^{-1}\phi_c(x), \quad (67)$$

$$y_\Delta = h(x) + k_1(x)u_\Delta + k_2(x)(\alpha_c(x) + \beta_c(x)R^{-1}K_rT^{-1}\phi_c(x)). \quad (68)$$

que pode ser interpretada, de forma equivalente, como a dinâmica do sistema não linear em malha fechada com a CFL e com um controlador K_c dado por

$$K_c \stackrel{\text{def}}{=} R^{-1}K_rT^{-1}. \quad (69)$$

Este resultado será útil no projeto do controlador do quadricóptero, a ser discutido na seção 6, uma vez que esse sistema atende à condição da Proposição 1.

5. DINÂMICA DO QUADRICÓPTERO

Na Fig. 8, são representados os referenciais considerados na modelagem da dinâmica de um quadricóptero.

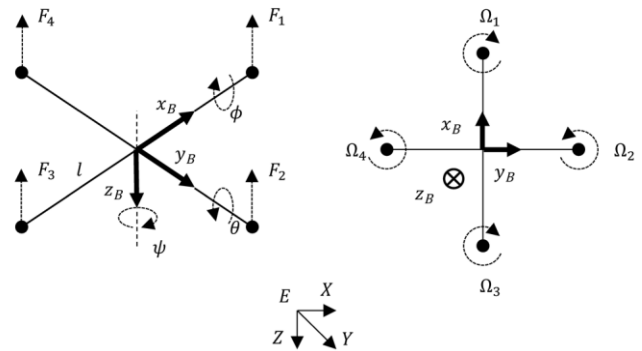


Fig. 8 – Sistema de referenciais do quadricóptero.

O vetor de variáveis de estados é dado por

$$x(t) \stackrel{\text{def}}{=} [XYZ\psi\theta\phi\dot{X}\dot{Y}\dot{Z}pqr]^T, \quad (70)$$

onde X , Y e Z são as coordenadas e \dot{X} , \dot{Y} , \dot{Z} as velocidades lineares do centro de massa do quadricóptero em relação ao referencial inercial E , ψ , θ e ϕ são os ângulos de Euler, e p , q e r são as velocidades angulares em relação ao referencial do corpo.

O vetor de entrada, por sua vez, é determinado a partir das velocidades angulares Ω_i , $i = \{1, \dots, 4\}$, dos rotores, segundo a equação

$$u(t) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_Z \\ b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ b(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ b(-\Omega_1^2 + \Omega_3^2) \\ d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix}, \quad (71)$$

onde b é um coeficiente de empuxo e d é um coeficiente de arraste.

Com as definições acima, a dinâmica do quadricóptero pode ser finalmente descrita por [11]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} = & \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ q \sin \phi \sec \theta + r \cos \phi \sec \theta \\ q \cos \phi - r \sin \phi \\ p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \frac{-1}{m} (\cos \phi \cos \psi \sin \theta + \sin \phi \sin \psi) U \\ \frac{-1}{m} (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \cos \psi \sin \phi) U \\ g - \frac{1}{m} \cos \theta \cos \phi U \\ \frac{I_Y - I_Z}{I_X} qr + \frac{l}{I_X} \tau_X \\ \frac{I_Z - I_X}{I_Y} pr + \frac{l}{I_Y} \tau_Y \\ \frac{I_X - I_Y}{I_Z} pq + \frac{1}{I_Z} \tau_Z \end{bmatrix}, \quad (72) \end{aligned}$$

onde m é a massa do corpo, g é a aceleração gravitacional, I_X , I_Y e I_Z são os momentos de inércia e l é a distância entre o centro de massa e os rotores. Os valores nominais considerados para os parâmetros do sistema, listados na Tabela 1 correspondem ao nanoquadricóptero Crazyflie[®] 1.0.

Tabela 1: Valores nominais dos parâmetros do quadricóptero.

Parâmetro	Valor Nominal
I_X	770 kg.m ²
I_Y	770 kg.m ²
I_Z	1600 kg.m ²
m	0.02 kg
l	0.02 m
g	9.81 m/s ²

Fonte: [12]

O vetor de saída para a malha de controle externa é dado por

$$y(t) = [XYZ\psi]^T. \quad (73)$$

6. CONTROLE DO QUADRICÓPTERO

A dinâmica descrita pelas Equações (72)-(73) apresenta deficit de grau relativo, e portanto, não admite linearização por realimentação. Entretanto, conforme discutido em [1], sob certas condições, é possível se modificar um sistema que não possui um grau relativo suficiente de modo a se obter um sistema que possua, e isso é possível através de uma realimentação dinâmica de estados. Na presente aplicação, a condição de linearizabilidade por realimentação pode ser obtida através da passagem da ação de controle U por um integrador duplo e a posterior realimentação dos estados associados, conforme representado na Fig. 9.

Utilizando-se o esquema de controle representado pelo diagrama de blocos apresentado na Fig. 9, a dinâmica aumentada do quadricóptero torna-se

$$\begin{aligned} \hat{\hat{x}} = & \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ q \sin \phi \sec \theta + r \cos \phi \sec \theta \\ q \cos \phi - r \sin \phi \\ p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \frac{-1}{m} (\cos \phi \cos \psi \sin \theta + \sin \phi \sin \psi) (\zeta + m_\xi) \\ \frac{-1}{m} (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \cos \psi \sin \phi) (\zeta + m_\xi) \\ g - \frac{1}{m} \cos \theta \cos \phi (\zeta + mg) \\ \xi \\ \zeta \\ \frac{I_Y - I_Z}{I_X} qr + \frac{l}{I_X} \tau_X \\ \frac{I_Z - I_X}{I_Y} pr + \frac{l}{I_Y} \tau_Y \\ \frac{I_X - I_Y}{I_Z} pq + \frac{1}{I_Z} \tau_Z \end{bmatrix}, \quad (74) \end{aligned}$$

onde o vetor de estados aumentado é dado por

$$\hat{\hat{x}}(t) \stackrel{\text{def}}{=} [XYZ\psi\theta\phi\dot{X}\dot{Y}\dot{Z}\xi\zeta pqr]^T, \quad (75)$$

e a solução de equilíbrio desse sistema é

$$\hat{\hat{x}}(t) = 0, \quad (76)$$

$$\hat{u}(t) = [u_1 - mg \ 0 \ 0 \ 0]^T. \quad (77)$$

O novo modelo dinâmico (74) atende aos critérios de linearização por realimentação. Para essa dinâmica aumentada é, então, projetada uma lei de linearização.

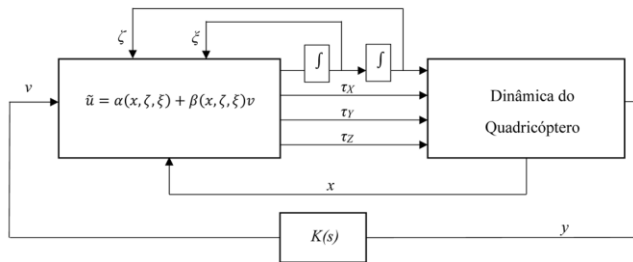


Fig. 9 – Diagrama da realimentação dinâmica.

Por fim, o controlador H_∞ , da malha externa $K(s)$, ilustrado na Fig. 3, é projetado utilizando-se a técnica de *loop-shaping* de Glover e McFarlane [7], explorando-se o resultado da Proposição 1, com a pós-compensação

$$W_r = \begin{bmatrix} \frac{2 \times 10^5 (s+0.1)}{s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2 \times 10^5 (s+0.1)}{s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{s+0.1}{s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2 \times 10^3 (s+0.1)}{s} \end{bmatrix} \quad (78)$$

para a RFL, ou

$$W_c = W_r \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{-gl}{I_y} \\ 0 & \frac{gl}{I_x} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix}, \quad (79)$$

para a CFL.

7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Numa primeira simulação, é considerado o sistema não linear nominal controlado pela combinação de uma das leis de linearização, CFL ou RFL, com o respectivo controlador H_∞ e é averiguado que ambas apresentam a mesma resposta temporal. Nesta simulação, o sistema parte com um ângulo de arfagem inicial de 1 rad e retorna ao ponto de equilíbrio. A resposta temporal dos estados X , Y , Z , ψ , θ e ϕ no caso nominal é mostrada na Fig. 10.

Em seguida, considera-se o sistema não linear nominal controlado apenas pelo controlador H_∞ , isto é, sem uma lei de linearização por realimentação. O resultado é apresentado na Fig. 11. Neste caso, o sistema se torna instável, e não retorna para o ponto de equilíbrio ao se aplicar um distúrbio na direção do ângulo de arfagem.

Por último, realiza-se um experimento no qual o sistema encontra-se em uma condição inicial correspondente a um ângulo de arfagem de 45° e um ângulo de rolagem de 30°, enquanto que os outros estados são nulos. O objetivo desse experimento é avaliar o comportamento da lei de controle durante a regulação até a origem do sistema sujeito a incertezas paramétricas. Supõe-se que os parâmetros I_x , I_y , I_z e m apresentam variação de até ±14% em relação aos valores nominais na Tabela 1. Além disso delimita-se a faixa de

operação de atitude, como em [11], de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Faixa de operação de atitude.

Ângulo	Faixa
Guinada	$-180^\circ < \psi < 180^\circ$
Arfagem	$-90^\circ < \theta < 90^\circ$
Rolagem	$-90^\circ < \phi < 90^\circ$

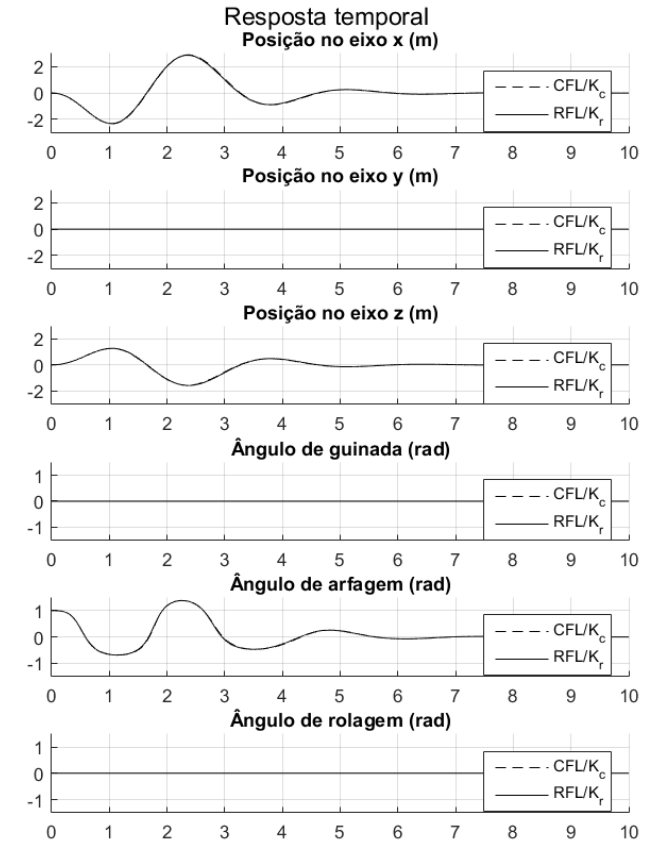


Fig. 10 – Desempenho dos controladores não lineares no caso nominal.

Nas Fig. 12-17 são mostradas as respostas do sistema em malha fechada sob condição nominal dos parâmetros, e para 10 condições aleatórias para os parâmetros, dentre os valores admissíveis de incerteza. É observado nessas figuras que, apesar do sistema apresentar estabilidade robusta para o controlador projetado, o desempenho é comprometido para incertezas não muito elevadas, apresentando sobressinal e tempo de acomodação indesejados. Porém, este resultado era esperado a partir da Proposição 1, confirmando que, mesmo utilizando a RFL associada a um controlador H_∞ o sistema apresenta pouca robustez com relação a variações paramétricas.

8. CONCLUSÃO

A aplicação da técnica apresentada, para controle robusto de sistemas não lineares, ao modelo não linear do quadricóptero, revelou que, para alguns sistemas, existe equivalência de desempenho robusto ao se utilizar tanto a RFL quanto a CFL e que, para ambos os casos, a dinâmica linearizada é dada por cadeia de integradores, sensível a variações paramétricas, de acordo com a Proposição 1. Além disso, evidenciou-se a dificuldade de regular sistemas não lineares longe do ponto de equilíbrio, utilizando apenas um

controlador linear. Por isso, mesmo que não haja ganho de robustez em desempenho ao se utilizar a RFL, ao invés da CFL, os resultados corroboram a abordagem não linear para o controle dessa classe de sistemas.

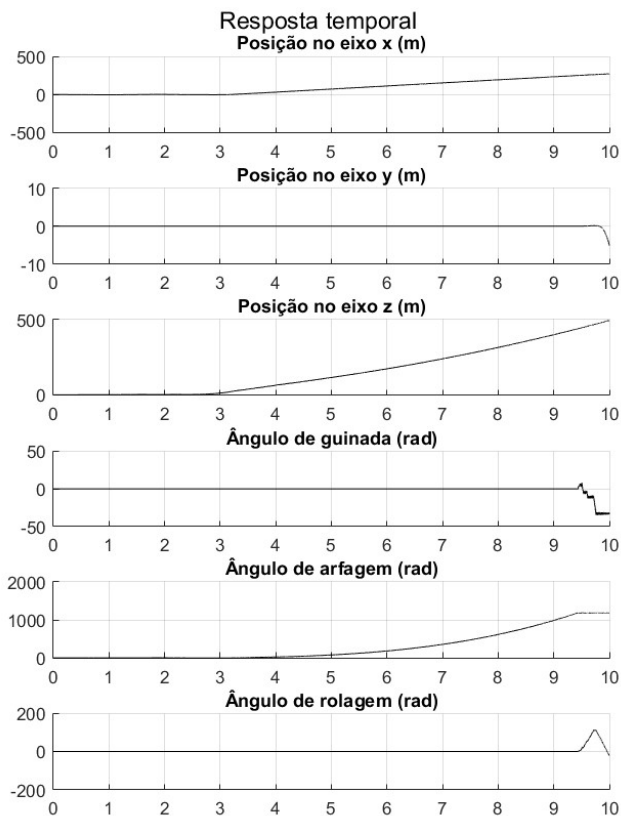


Fig. 11 – Controlador H_∞ no caso nominal, com ângulo de arfagem inicial de 1 rad.

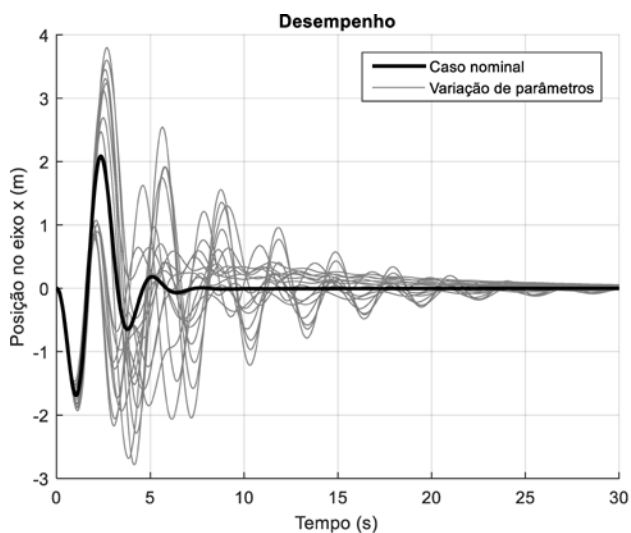


Fig. 12 – Resposta da posição X.

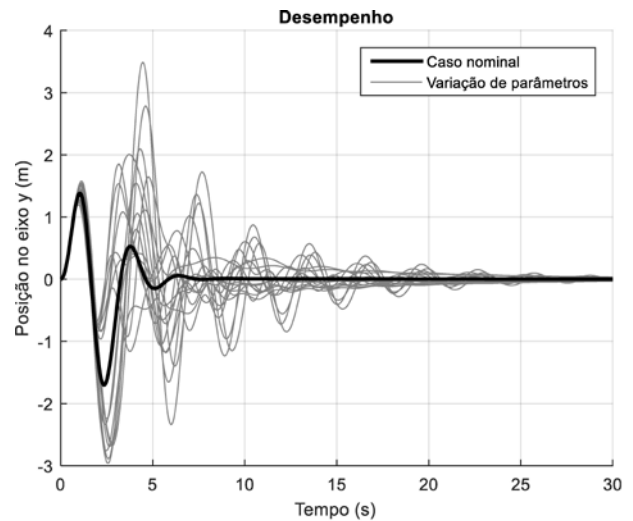


Fig. 13 – Resposta da posição Y.

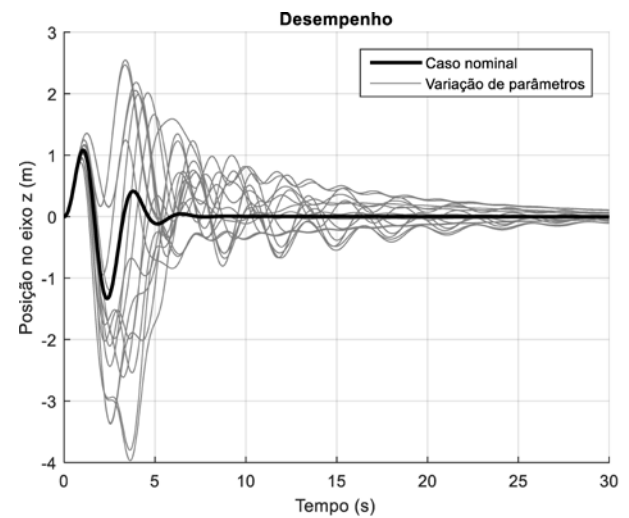


Fig. 14 – Resposta da posição Z.

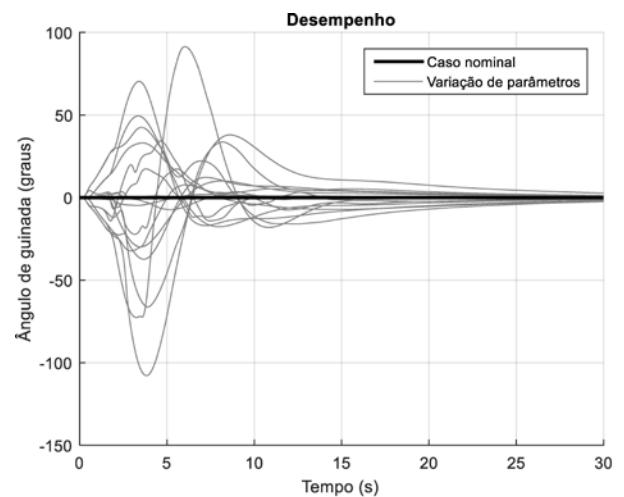


Fig. 15 – Resposta do ângulo de guinada.

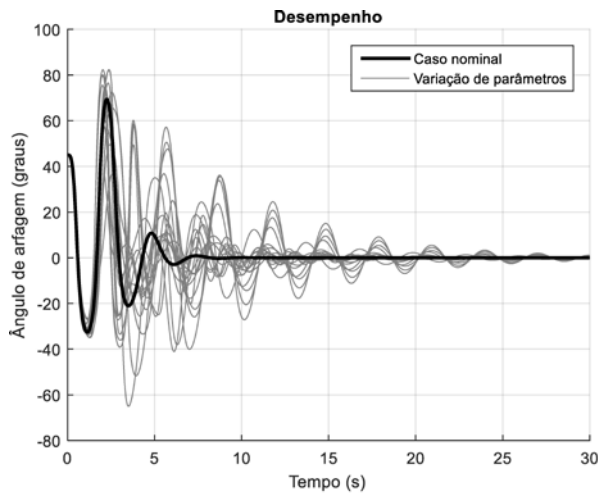


Fig. 16 – Resposta do ângulo de arfagem.

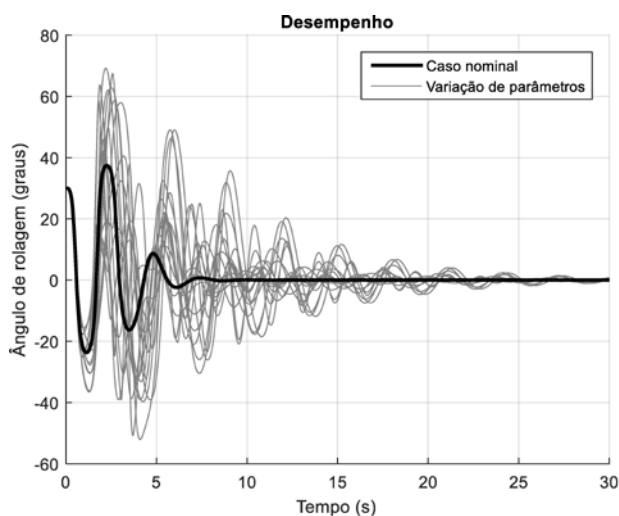


Fig. 17 – Resposta do ângulo de rolagem

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Isidori, Nonlinear Control Systems, 3rd Edition, Springer-Verlag, 1995.
- [2] M. Vidyasagar, Nonlinear Systems Analysis, 2nd Edition, Prentice Hall, 1993.
- [3] H. Bourlès, Adendum to "W-stability and Local Input-Output Stability Results", IEEE Trans. Autom. Control, Vol 45(6), pgs 1220-1221, Jun 2000.
- [4] H. Bourlès, e F. Colledani, W-stability and Local Input-Output Stability Results, IEEE Trans. Autom. Control, Vol 40(6), pgs 1102-1108, Jun 1995.
- [5] H. Guillard, e H. Bourlès, Robust Feedback Linearization, Proc. 14th Int. Symp. in Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS' 2000), Perpignan, França, Jun 2000, pgs 1-6.
- [6] A. L. D. Franco, H. Bourlès, E. R. De Pieri, e H. Guillard, Robust Nonlinear Control Associating Robust Feedback Linearization and H^∞ Control, IEEE Trans. Autom. Control, Vol 51(7), pgs 1200-1207, Jul 2006.
- [7] D. McFarlane, e K. Glover, A Loop-Shaping Design Procedure Using H-infinity Synthesis, IEEE Trans. Autom. Control, Vol 37(6), pgs 759-769, Jun 1992.
- [8] G. Zames, On the Input-Output Stability of Time-Varying Nonlinear Feedback Systems – Part One: Conditions Derived Using Concepts of Loop Gain, Conicity, and Positivity, IEEE Trans. Autom. Control, Vol 11(2), pgs 228-238, Abr 1966.
- [9] J. C. Willems, The Analysis of Feedback Systems, MIT Presse, 1971.
- [10] J. M. A. Scherpen, e A. J. Van der Schaft, Normalized Coprime Factorization and Balacing for Unstable Nonlinear Systems, Int. J. Control, Vol 60(6), pgs 1193-1222, Dez 1994.
- [11] A. Mokhtari, A. Benallegue, e B. Daachi, Robust Feedback Linearization and GH^∞ Controller for a Quadrotor Unmaned Aerial Vehicle, IEEE/RSJ International Conference on Inteligent Robust and Systems, Canadá, 2005.
- [12] M. Furci, G. Casadei, R. Naldi, R. G. Sanfelice, e I. Marconi, An Open-Source Architecture for Control and Coordination of a Swarm of Micro-Quadrotors, International Conference of Unmanned Aircraft Systems, EUA, 2015.

Avaliação de Modelos Digitais de Elevação SRTM e LIDAR e suas aplicações em análises morfométricas

Frederico José Basilio do Nascimento*, Leonardo Castro de Oliveira

Instituto Militar de Engenharia (IME)
Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 22290-290
frednascimento.geo@gmail.com

RESUMO: O levantamento de parâmetros morfométricos contribui para o entendimento da paisagem, quanto a dinâmica de circulação de energia dentro de uma bacia hidrográfica. A partir da popularização e evolução de geotecnologias como: fotografias aéreas, imagens de satélite, Modelos Digitais do Terreno (MDT) e Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), análises morfométricas tornaram-se menos onerosas em tempo de duração e mais produtivas em quantidade de resultados obtidos. O objetivo do presente artigo é avaliar o modelo SRTM comparado ao modelo LIDAR (de maior resolução espacial) para verificação de perdas e ganhos, potencialidades e limitações em representações morfométricas para o Parque Big Sky, localizado em Montana nos Estados Unidos. Os resultados apontaram que o modelo SRTM, comparado ao modelo LIDAR, possui certa limitação quanto à representação de feições geomorfológicas, formas e extensões de canais de drenagem e as maiores discrepâncias entre ambos os modelos ocorreram em localidades com maiores altitudes e declividades.

PALAVRAS-CHAVE: Geomorfologia, Sensoriamento Remoto, Associação de MDEs, Representação do Relevo.

ABSTRACT: MORPHOMETRIC parameters surveys contribute to the understanding of the landscape, about a energy circulation dynamic within a hydrographic basin. With the development and increase in usage of geotechnologies, such as aerial photography, satellite images, Digital Elevation Models (DEM) and Geographic Information Systems (GIS), morphometric analysis has become less time consuming and more efficient in terms of achieved quantitative outcomes. The objective of this paper is to evaluate SRTM models in comparison to LIDAR models (with higher spatial resolution) in order to verify the losses, gains potentialities and limitations in morphometric representations to the Big Sky Park, located in Montana, United States. The results showed that, in comparison to the LIDAR model, SRTM model has some limitations in terms of the representation of geomorphological features, forms and lengths of drainage channels and the larger discrepancies between the two models occur in higher altitude and higher slope areas.

KEYWORDS: Geomorphology, Remote Sensing, Association of DEMs, Relief Representation.

1. INTRODUÇÃO

A Geomorfologia é a ciência que estuda o relevo quanto à sua gênese, forma, composição e seus processos modeladores (CHRISTOFOLETTI, 1999). Dentre as suas linhas de pesquisas a morfometria surgiu no início do século XX, como o estudo quantitativo de feições geomorfológicas presentes na superfície terrestre. Estudos ambientais relacionados a essa temática visam ao monitoramento do equilíbrio e da sensibilidade ambiental frente às mudanças ocasionadas, ou não, pela sociedade. (CHORLEY, 1969; CHRISTOFOLETTI, 1999; FLORENZANO, 2008).

Para a realização de estudos morfométricos é essencial a obtenção de dados altimétricos da superfície a ser analisada. No Brasil, os dados altimétricos digitais são disponibilizados por meio de aquisição de licenças pagas junto às empresas de aerolevantamentos, ou gratuitamente através de portais digitais como, por exemplo: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) localizado em (http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm) e pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), disponível em (<http://www.geoportal.eb.mil.br/mediador/>).

Ambas as instituições realizam o Mapeamento Sistemático Nacional, que possui a finalidade de representar o espaço territorial brasileiro por meio de cartas gerais contínuas e articuladas, elaboradas seletiva e progressivamente, seguindo as escalas padrão que variam de 1:1.000.000 até 1:25.000 (BRASIL, 1967).

De acordo com Nogueira (2009), as cartas do Mapeamento Sistemático Nacional encontram-se desatualizadas devido à pouca renovação do quadro técnico de profissionais qualificados para exercerem as funções necessárias, às diferentes demandas e oportunidades de financiamentos de projetos, dentre outros fatores. Em contraponto, empresas de aerolevantamentos apresentam acervos cartográficos atualizados a

partir de diversas metodologias, que vão desde levantamentos de campo até a utilização de sensores aerotransportados e/ou imagens de satélite georreferenciadas para levantamentos de informações do terreno em localidades definidas por seus clientes.

Atualmente devido à grande disponibilização de geotecnologias como: Modelos Digitais do Terreno (MDTs), imagens de satélite, Sistemas de Posicionamento Globais; Sistemas de Informação Geográfica, dentre outras, foram ampliadas as metodologias para coleta de amostras do terreno e, conseqüente, diversificação de produtos a serem extraídos delas (LONGLEY *et.al*, 2013; MENEZES & FERNANDES, 2013).

Dentre as geotecnologias disponibilizadas gratuitamente encontra-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que originalmente fora disponibilizado com resoluções espaciais de 30m e 90m para o território norte americano e demais continentes do mundo, respectivamente.

De acordo com Jensen (2009), o MDE SRTM (coletado em 2000) foi elaborado por meio de interferometria de radar. A partir de duas antenas, equidistantes em 60m, que continham receptores da banda-C (resolução espacial 90m) e banda-X (resolução espacial 30m), foram coletados dados altimétricos a partir de dois ângulos de visada distintos.

Atualmente os MDEs SRTM, com resolução espacial de 30m, encontram-se disponibilizados gratuitamente para todos os continentes. Entretanto durante a confecção do presente trabalho apenas o continente norte americano possuía MDEs SRTM com resolução espacial de 30m, para os demais continentes o modelo era disponibilizado com resolução espacial padrão de 90m. Deste modo, para aproximação da realidade nacional, optou-se pela utilização de MDE com resolução espacial de 90m.

A inovação das tecnologias de levantamento da superfície

terrestre possibilitou a geração de MDEs de alta resolução espacial, como é o caso da tecnologia *Light Detection And Ranging* (LIDAR). A tecnologia consiste na coleta de milhões de pontos tridimensionais da superfície do alvo, a partir de um sensor ativo *laser*. (CENTENO & MITISHITA, 2007)

Levantamentos LIDAR, em território nacional, são realizados por empresas de aerolevantamentos e compreendem áreas de obras em estradas, obras em represas ou para fins de cadastro de imóveis rurais ou urbanos. Sua disponibilidade é justamente por meio da compra de licenças de utilização junto às empresas de aerolevantamento. Por ser um produto novo no mercado nacional, sua aquisição para pesquisas torna-se onerosa quando comparado a outras metodologias de levantamentos altimétricos já disponíveis no mercado.

Os sobrevoos existentes não comportam bacias hidrográficas completas ou unidades de relevo em escala que permitam diferenciações de ambientes geomorfológicos. Logo, os dados gerados acabam não favorecendo a realização de mapeamentos de feições geomorfológicas ou análises morfométricas em bacias hidrográficas completas, que compreendem das cabeceiras de drenagem até sua desembocadura.

Já nos EUA existe a NCALM (*National Center for Airbone Laser Mapping* - <http://ncalm.cive.uh.edu/>), que é operacionalizado pela Universidade de Houston (UH) e pela Universidade da Califórnia-Berkeley (UCB). Neste centro de pesquisas os dados do sensor LIDAR são disponibilizados de maneira gratuita correspondendo, em sua maioria, a localidades específicas do território norte americano.

No Brasil, a aplicabilidade de modelos LIDAR vem aumentando em diversas áreas do conhecimento, como alguns exemplos a seguir:

Para FERREIRA (2014) o modelo LIDAR fora utilizado para segmentação e classificação de edificações em espaços urbanos, no intuito de qualificar dados altimétricos coletados pelo sensor.

No caso de PEREIRA (2017) o modelo LIDAR foi utilizado para estimar a biomassa acima do solo em ambiente de manguezal, com distintos graus de alteração, em comparação ao modelo WorldView-2, de alta resolução espacial.

A pesquisa realizada por VIANNA & CALLIARI (2019), utilizou modelo LIDAR para a delimitação de parâmetros morfológicos de um sistema praia-duna, com objetivo de identificar variáveis responsáveis pela diversidade do ambiente.

2. OBJETIVO

Dada a diversidade de aplicações e metodologias de análises de modelos LIDAR, o presente trabalho tem como objetivo analisar a morfometria de uma bacia hidrográfica utilizando como insumos os MDEs SRTM e LIDAR, para verificar suas potencialidades e possíveis limitações na representação de feições presentes em superfícies de relevo acidentado.

3. Área Teste

Os testes foram realizados a partir do reconhecimento de áreas que possuam levantamentos SRTM e LIDAR no Parque Big Sky, localizado no estado de Montana, Estados Unidos da América, que possui uma abrangência de aproximadamente 249 km² (FIG. 1).

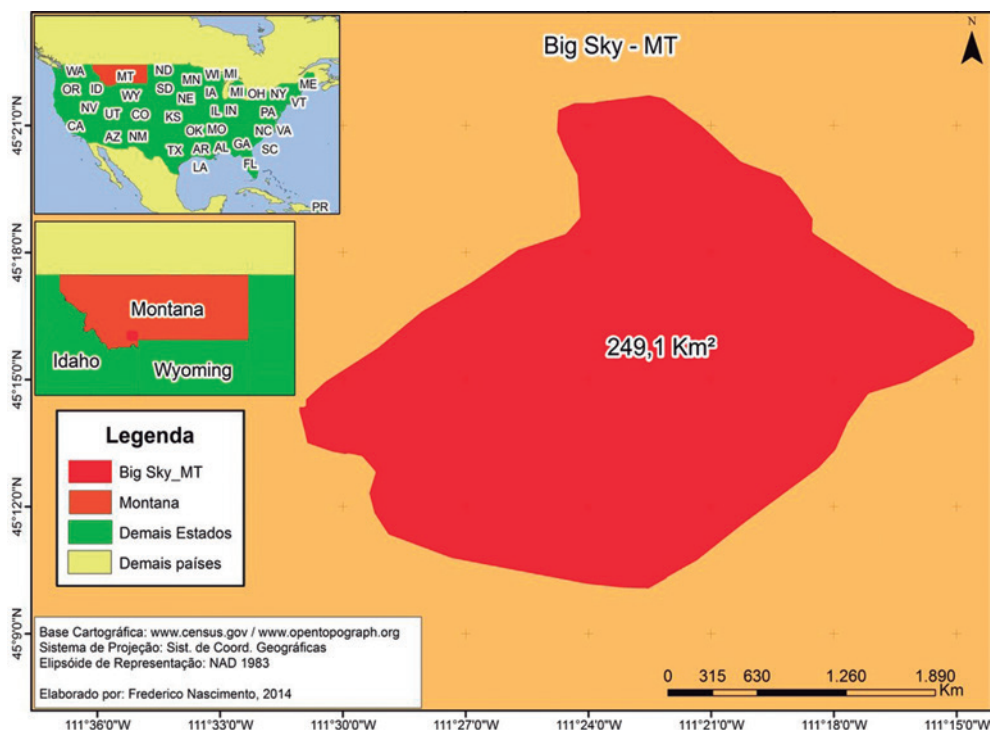


Fig.1: Mapa de Localização Parque Big Sky, Montana – EUA

A escolha da área teste não possibilitou a realização de visitas de campo. Durante a elaboração do presente trabalho, no ano de 2014, o Brasil não possuía aerolevantamentos em bacias hidrográficas, utilizando a tecnologia de laser scanner. Tal cenário demandou a busca por diretórios internacionais que possuíssem tal insumo.

4. DADOS E RECURSOS UTILIZADOS

Para realização do presente trabalho foram utilizados os seguintes MDEs:

a) SRTM - disponível no diretório <http://earthexplorer.usgs.gov/>, com resolução espacial de aproximadamente 90m;

b) LIDAR - disponível no diretório <http://opentopo.sdsc.edu/gridsphere/gridsphere?cid=datasets>, com resolução espacial de 1m.

O MDE LIDAR foi disponibilizado em formato matricial *.GRID*, segmentado num total de 79 arquivos.

Durante a elaboração do presente trabalho, no ano de 2014, o MDE SRTM foi disponibilizado com resoluções espaciais de 30m e 90m para os Estados Unidos e resolução espacial de 90m para demais países. Para verificação da representação de feições geomorfológicas em relevo acidentado, comum em áreas do Sudeste brasileiro, optou-se pela utilização do modelo SRTM 90m, no intuito de aproximar à realidade nacional as análises confeccionadas em território estadunidense. Uma vez que, durante a confecção do presente artigo, não existia modelo LIDAR que contemplasse uma bacia hidrográfica, localizada em relevo acidentado no Brasil.

5. METODOLOGIA

Para as análises morfométricas foram elaborados mapas altimétricos, mapas de declividade e mapas de drenagens a partir dos modelos: **LIDAR_1m** (representa MDE LIDAR em sua resolução espacial original de 1m) e **SRTM_90m** (MDE SRTM em sua resolução espacial original de 90m).

Para elaboração dos **mapas altimétricos** os modelos foram inseridos separadamente no software QGIS, classificados com intervalos altimétricos de 300m e foram obtidos os valores máximos e mínimos representados para a área teste.

Para cálculos de **declividade** é utilizada a fórmula contida em (1) e para cálculos percentuais de declividade é utilizada a fórmula contida em (2):

$$\tan \alpha = \frac{\Delta h}{Dp} \quad (1)$$

$$\tan \alpha \times 100 = \frac{\Delta h}{Dp} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

Δh Diferença de altura entre dois pontos

Dp Distância horizontal entre dois pontos

Os modelos foram inseridos no software ArcGIS 9.3 e foram extraídas as declividades em unidade percentual. A partir do cálculo que considera a variação de valores de elevação de cada célula em relação a 8 células vizinhas, quanto maior for a variação maior será a declividade e quanto menor for a

variação mais plano será o terreno.

Utilizou-se a classificação da EMBRAPA (1979), representado na TAB.1, e a partir daí foram elaborados os **mapas de declividades**.

Classe Percentual	Tipo de Relevo
0% - 3%	Plano
3,1% - 8%	Suave Ondulado
8,1% - 20%	Ondulado
20,1% - 45%	Fone Ondulado
45,1% - 75%	Montanhoso
> 75%	Escarpado

Tab.1: Classificação de declividade EMBRAPA (1979)

A **rede de drenagem** foi extraída utilizando o algoritmo **D8**, contido no software SAGA GIS, criado por O'CALLAGHAN & MARK (1984) e nele o escoamento da drenagem dá-se de maneira mais simples por considerar, para cada célula, os valores altimétricos das 8 células vizinhas. Dessa forma aquela que apresentar maior declividade em relação à célula central será a célula por onde o fluxo se direcionará, posteriormente, classificada de acordo com o método de Strahler (1952).

Além disso, foi realizada a associação por meio de sobreposição de ambos os modelos, de modo a verificar o comportamento do modelo LIDAR_1m dentro de cada pixel SRTM, que possui área de aproximadamente 8.100m².

A partir da sobreposição de registros pontuais LIDAR, para cada pixel SRTM foram obtidos valores como: a média LIDAR e a amplitude altimétrica LIDAR para cada pixel SRTM. Nesse sentido, tornou-se possível a elaboração de mapas que associassem ambos os modelos e permitissem a análise espacial em áreas onde ocorreram discrepância entre eles.

As análises morfométricas dão-se pelas associações de altimetria, declividades e drenagens, configurando um diagnóstico do relevo e drenagem da área levantada.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análises Morfométricas

6.1.1 Altimetria

A FIG.2 contém o mapa altimétrico realizado a partir do produto **LIDAR_1m**. Nela observa-se que a diferença entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo é em torno de 1.586m. As altitudes mais elevadas encontram-se em locais mais próximos às bordas da área teste FIG.4A e FIG.4B e, em algumas delas, ocorre a formação de cristais, denotando o forte controle estrutural presente na área teste.

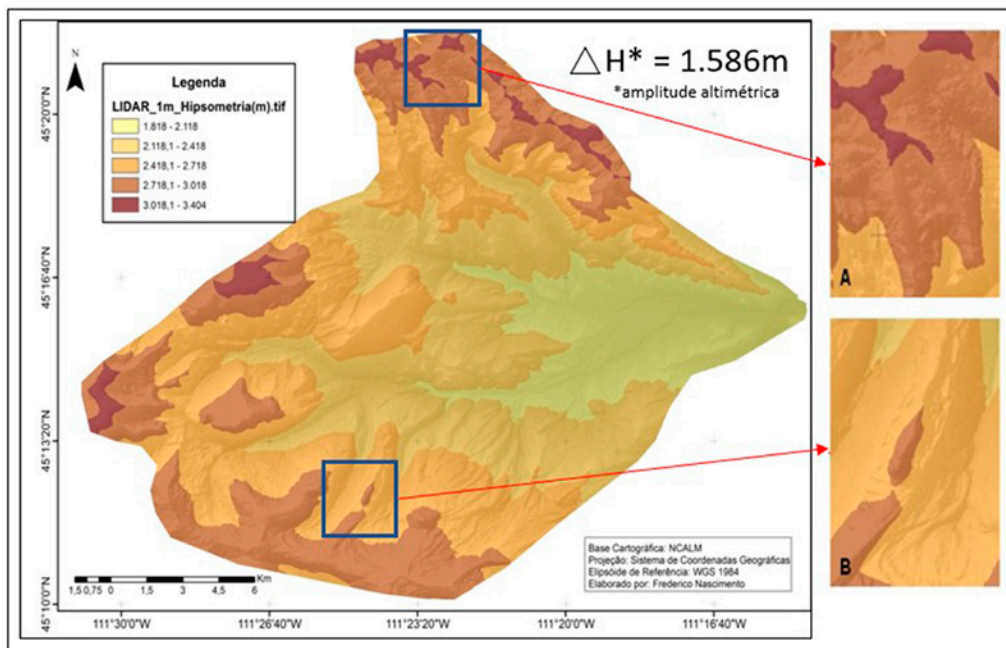


Fig.2: Mapa Altimétrico do modelo LIDAR_1m.

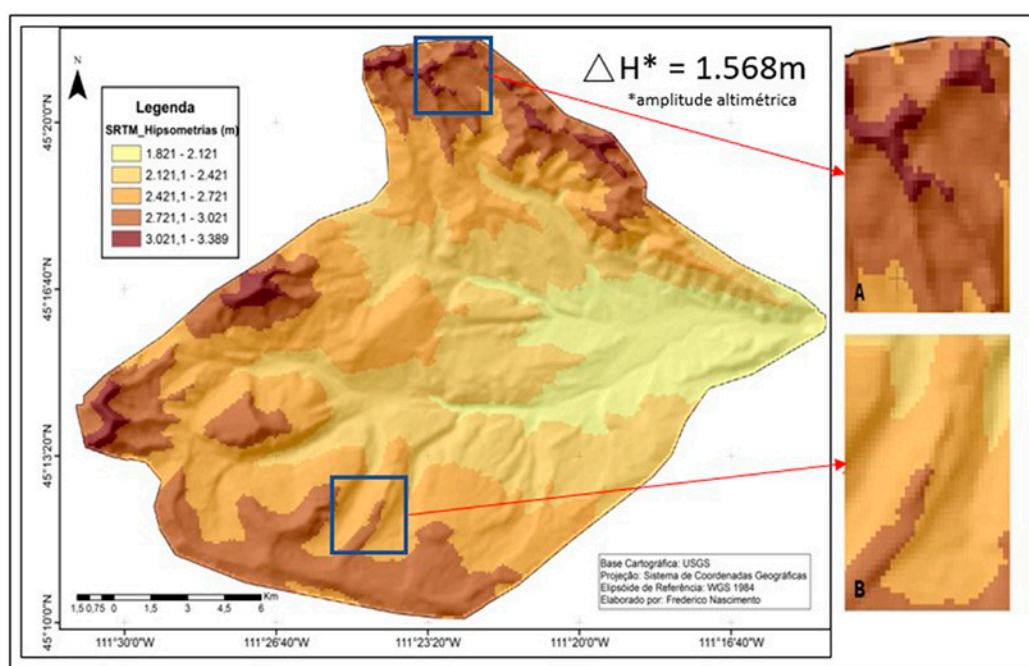


Fig.3 Mapa Altimétrico do modelo SRTM_90m.

A FIG.3 contém o mapa altimétrico realizado a partir do produto **SRTM_90m**. Observa-se que a amplitude altimétrica registrada encontra-se em torno de 1568m e que a partir dos detalhes das FIG.4A, FIG.4B os pixels apresentam deformidade quanto ao delineamento de cristas encontradas na superfície alvo.

A diferença entre as amplitudes altimétricas obtidas a partir dos modelos **LIDAR_1m** e **SRTM_90m** ocorrem em torno de 18m, observa-se ainda a perda de detalhamento de cristas e cumeadas no modelo **SRTM_90**.

6.1.2 Declividade

Na FIG.4 encontra-se o mapa de declividade para área

teste. Observa-se que para o produto **LIDAR_1m** a área teste possui declividades mais elevadas em áreas que coincidem com os mais elevados registros altimétricos, observados nos alta, resolução do produto contribui para a percepção do forte controle geológico estrutural a partir da formação de alinhamentos cristais, nas áreas mais elevadas. Tais áreas estão associadas às altas declividades, denotando a formação de relevo bastante escarpado, com presença de planícies em alguma áreas mais rebaixadas topograficamente, de acordo com a classificação da EMBRAPA (1979).

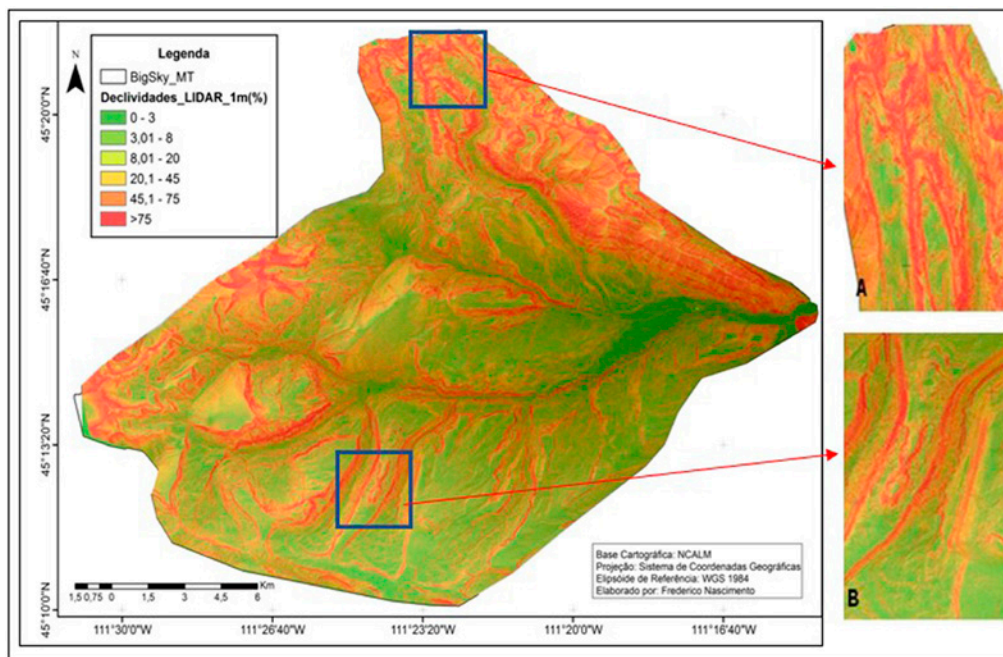


FIG.4: Mapa de declividade do modelo LIDAR_1m.

Na FIG.5 encontra-se o mapa de declividade para o modelo **SRTM_90m** e nele observa-se também as cristas, encostas e cumes delineados, porém percebe-se a perda de detalhamento das informações devido a característica contida em cada pixel do modelo SRTM.

O modelo **LIDAR_1m** representa um relevo com inúmeras cristas bem delineadas, com altas declividades, associadas a topos de morros que possuem as mesmas características e presença de topografia mais ondulada e

suave em áreas mais rebaixadas.

Já o modelo **SRTM_90m** representa um relevo mais generalista que não contribuiu para melhor análise das cristas e suas declividades, gerando análises incompletas em relação ao detalhamento da informação representada. Em áreas de baixas altitudes, o modelo **SRTM_90** apresentou uma topografia mais homogênea em comparação ao modelo **LIDAR_1m**.

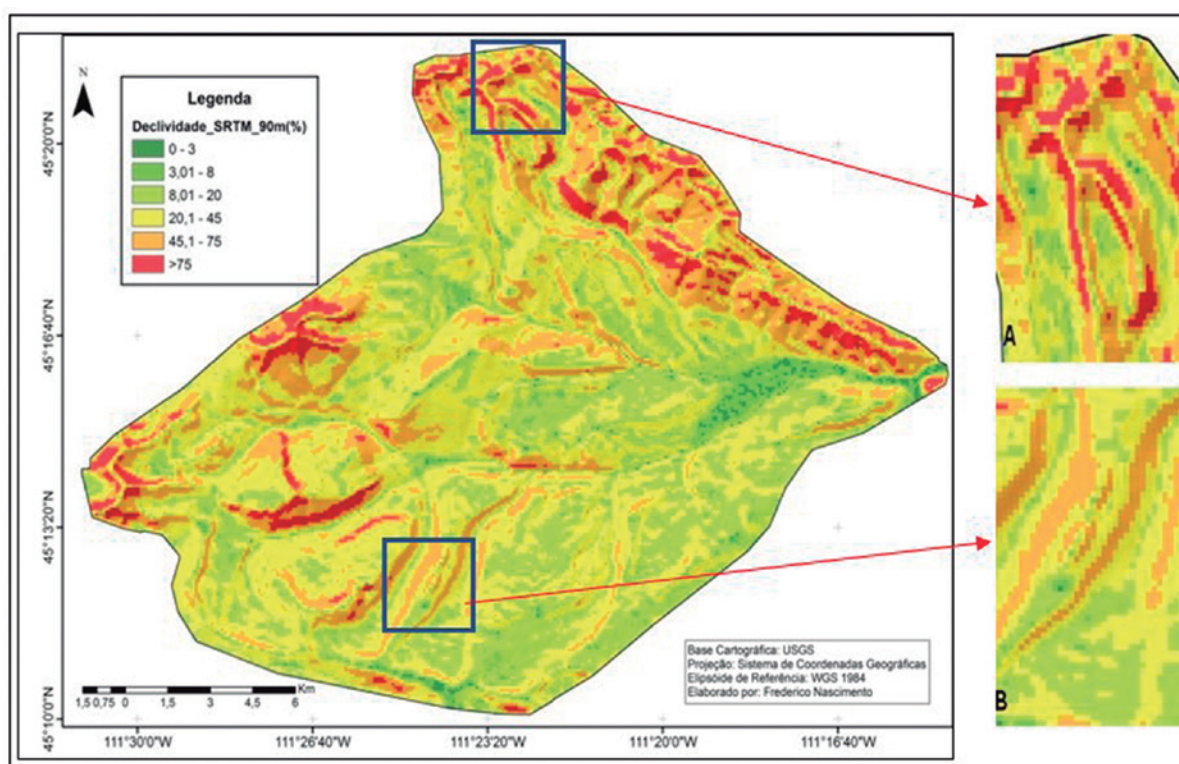


FIG.5: Mapa de declividade do modelo SRTM_90m

6.1.3 Rede de Drenagem

Na FIG.6 encontra-se o mapa de drenagens extraídas a partir do produto **LIDAR_1m** e a tabela dos canais de drenagem. Para a área teste o padrão de drenagem pode ser classificado como dendrítico, e a partir da hierarquização pelo mé-

todo de Strahler (1952) encontra-se uma bacia hidrográfica de 7ª Ordem na qual existem cerca de 2.239 canais.

Na FIG.7 encontra-se o mapa de drenagens do MDE **SRTM_90m**, nele a bacia hidrográfica é caracterizada como de 6ª Ordem e possui padrão de drenagem dendrítico, compondo um total de 577 canais de drenagens.

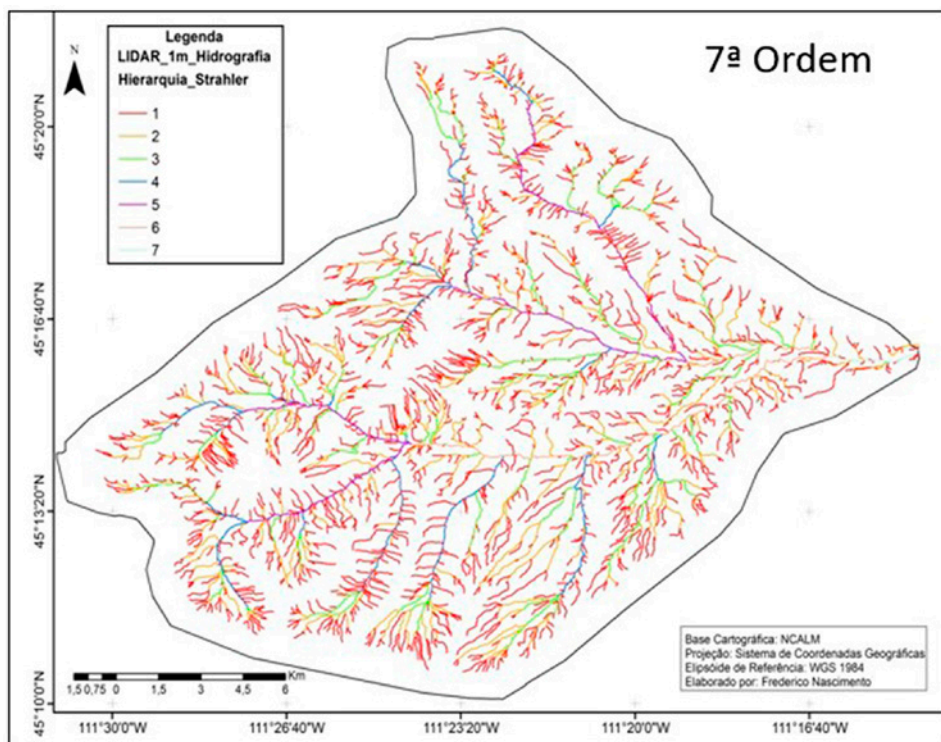


Fig. 6: Mapa de Rede de Drenagem para o MDE LIDAR_1m.

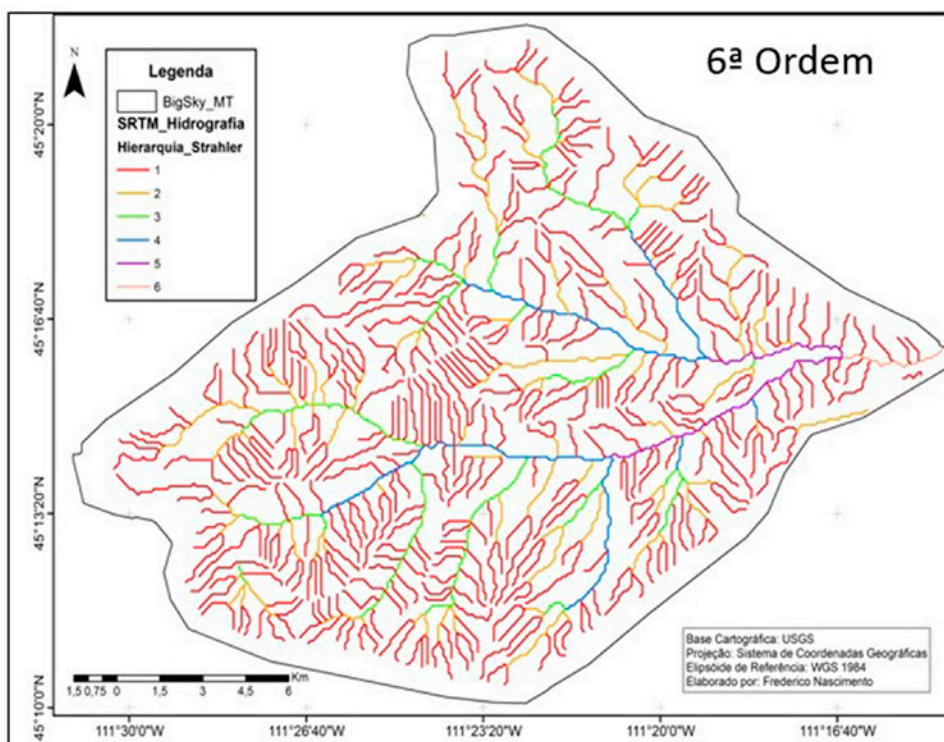


Fig. 7: Mapa de Rede de Drenagem para o MDE SRTM_90m.

Na TAB.2 encontram-se os comparativos das redes de drenagens extraídas para os modelos **LIDAR_1m** e **SRTM_90m**.

A comparação entre os totais de canais de drenagem nos modelos **LIDAR_1m** e **SRTM_90m**, denota uma diferença em torno de 3,8 vezes mais canais, detectados no modelo **LIDAR_1m**. Destaca-se ainda que esta diferença é superior em canais de 1ª e que ela vai reduzindo sua grandeza conforme o aumento da ordem dos canais de drenagem. Esta diferença de resultados permitiu que o modelo **LIDAR_1m** representasse uma bacia hidrográfica de 7ª ordem, devido ao maior quantitativo de cruzamentos de canais de ordens distintas. Tal informação constatou-se como nula na representação dos canais de drenagem extraídos do modelo **SRTM_90m** que está caracterizada como uma bacia hidrográfica de 6ª ordem.

Hierarquia Strahler	LIDAR 1m	SRTM_90m
1	1681	399
2	418	149
3	93	20
4	20	6
5	4	2
6	2	1
7	1	
	2.239 canais	577 canais

Tab.2: Quantitativo de canais de drenagens

Na TAB.3 encontram-se valores referentes às extensões dos canais de drenagem. Assim como observado anteriormente, o modelo **LIDAR_1m** representou maior extensão de canais de drenagens em comparação aos canais de drenagem extraídos do modelo **SRTM_90m**.

Entende-se que quanto maior a quantidade de canais de 1ª ordem presentes em uma bacia hidrográfica, maior será seu potencial erosivo e maiores serão as probabilidades de inundações em áreas mais rebaixadas, durante eventos de maior

concentração de chuvas.

Hierarquia Strahler	LIDAR 1m	SRTM_90m
1	552,3	491,8
2	220,3	91
3	103,1	43,6
4	43,7	27,8
5	29,9	12,4
6	18,2	3,2
7	2,5	
	970,3 Km	669,8 Km

Tab.3: Extensões de canais de drenagens.

Em seguida foram realizadas análises espaciais entre a associação LIDAR e SRTM e o mapa de declividades gerado a partir do modelo **SRTM_90m**.

A FIG.8 representa as amplitudes altimétricas **LIDAR_1m** registradas para cada pixel **SRTM** e nota-se que os registros mais elevados coincidem com as áreas em que o modelo **SRTM_90m** apresenta suas declividades mais elevadas. Em contrapartida, observa-se que em localidades de relevo mais suave e rebaixado, os valores da amplitude altimétrica **LIDAR_1m** para cada pixel **SRTM** são consideravelmente mais reduzidos.

Já a FIG.9 representa a diferença entre respectivo valor altimétrico de cada pixel **SRTM_90** e o valor médio **LIDAR_1m** em cada pixel **SRTM**. Nesta diferença, verificou-se que as áreas de maiores discrepâncias entre os valores, tanto negativos (quando os registros altimétricos médios **LIDAR_1m** são mais elevados que os registros altimétricos **SRTM_90m**), quanto positivos (quando os registros **SRTM_90m** superam os registros altimétricos da média **LIDAR_1m**) ocorrem em áreas de terrenos mais elevados e com maiores declividades. Já em áreas de relevo mais suave as diferenças entre ambos os modelos são reduzidas.

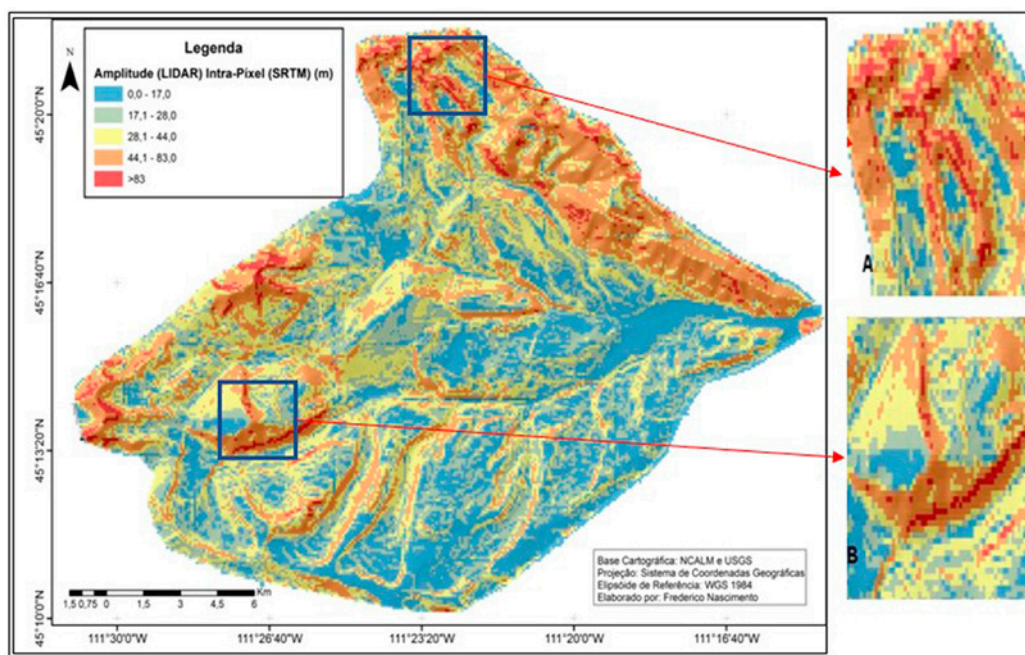


Fig. 8: Mapa de Amplitude Altimétrica LIDAR para cada pixel SRTM.

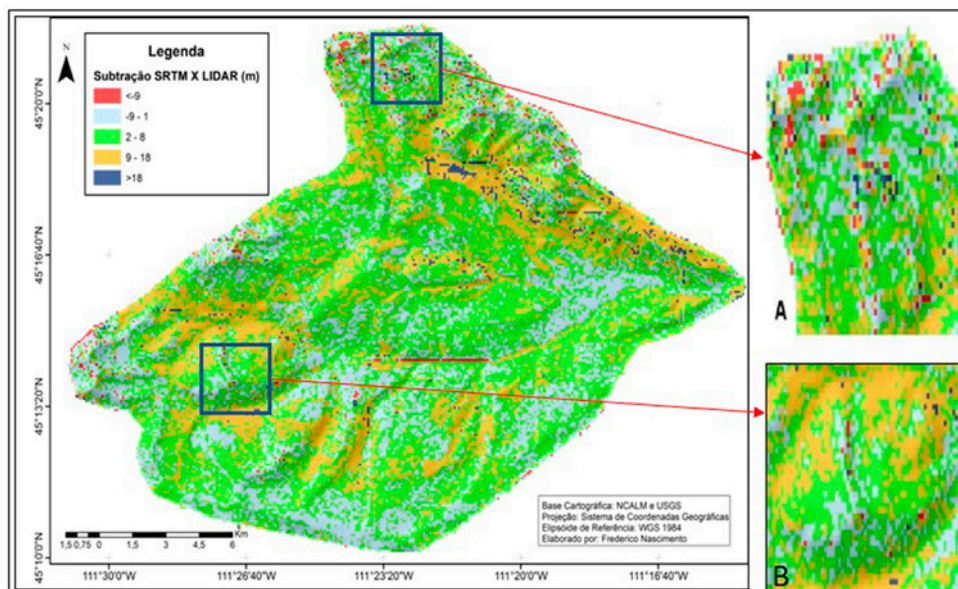


Fig. 9: Mapa de Subtração SRTM X LIDAR (média).

7. CONCLUSÕES

O modelo **LIDAR_1m** por conter amostras em grande quantidade demanda uma avançada infraestrutura para seu armazenamento, processamento, manipulação e análise de seus dados.

A comparação entre variáveis morfométricas extraídas a partir de um modelo mais generalista (**SRTM_90m**) e de um modelo mais robusto (**LIDAR_1m**) gerou resultados discrepantes. Tais resultados influenciam diretamente às distintas tomadas de decisão, muito embora representem a mesma bacia hidrográfica.

Com relação às comparações dos modelos **LIDAR_1m** e **SRTM_90m** entre as análises altimétricas e declividades, as distinções ficaram restritas à visualização do terreno e suas classificações perante a metodologia utilizada pela EMBRAPA.

De acordo com análises das feições lineares, o modelo **LIDAR_1m** apresentou maior detalhamento do delineamento, do quantitativo de canais de drenagem e extensão dos mesmos. Já o modelo **SRTM_90m** apresentou um conjunto de informações em menor quantidade e distribuição, distorcendo a realidade da bacia hidrográfica analisada.

Os registros altimétricos conferiram maiores discrepâncias em áreas mais elevadas e com maiores declividades, ou seja, áreas escarpadas. Tal fato ocorreu tanto para análises de amplitudes altimétricas do modelo **LIDAR_1m** inseridas em cada pixel SRTM, quanto para a diferença entre o valor médio **LIDAR_1m** para cada pixel SRTM e cada valor altimétrico do pixel **SRTM_90m**.

Insumos cartográficos são ferramentas essenciais para elaboração de planos de manejo e gestão de recursos naturais, nesse sentido quanto maior for a fidedignidade entre o modelo digital de elevação utilizado e o terreno a ser analisado, melhor será o planejamento ambiental.

A área teste possui relevo característico às localidades de relevo bastante acidentado, com alta influência de fatores geológicos e, nesse sentido, é possível dizer que tal comportamento do sensor LIDAR possa ocorrer em áreas como Serra do Mar, dentre outros Maciços Costeiros presentes em território brasileiro.

Recomenda-se avaliar modelos LIDAR analisando suas

distorções ao longo de diversas reamostragens, no intuito de compreender a partir de qual grandeza a imagem passa a apresentar distorções significativas de seu original.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL, Decreto-lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967.
- [2] CENTENO, J. A. S., MITISHITA, E. A. Laser Scanner Aerotransportado no Estudo de Áreas Urbanas. In: **Geoinformação em urbanismo: Cidade Real X Cidade Virtual**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007, 191-208p.
- [3] CHORLEY, R.J. **Introduction to Physical Hydrology**. Methuen. London. 1969. 211p.
- [4] CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda e EDUSP, 1999, 236p.
- [5] EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: **Reunião técnica de levantamentos de solos**, n. 10. 1979, Rio de Janeiro. Súmula. Rio de Janeiro, 1979. p 83. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).
- [6] FERREIRA, F. R. **Segmentação do espaço urbano por meio da tecnologia Lidar aerotransportado**. São Paulo, SP. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, 2014, 129p.
- [7] FLORENZANO, T.G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais** (org.). São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- [8] JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009, 598p.
- [9] LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013. 540p.
- [10] MENEZES, P. M. L., FERNANDES, M. C. **Roteiro de Cartografia**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. v. 1. 288p
- [12] NOGUEIRA, R. **Cartografia Representação, Comunicação e Visualização de dados espaciais**, 2009. 3ed. 327p.
- [14] PEREIRA, F. R. S. **Sensoriamento remoto LIDAR e óptico aplicados à estimativa de biomassa aérea de manguezais: estudo de caso na APA de Guapimirim, RJ**. São José dos Campos, SP. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017, 189 p.
- [15] O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D.M. **The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data**. Computer vision, Graphic and Image Processing. v 28. 323 – 344 p. 1984
- [16] STRAHLER, A. N. **Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography**. Geological Society of America Bulletin, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.
- [17] VIANNA, H. D. & CALLIARI, L. J. **Diversidade morfológica das dunas frontais no Litoral Norte do Rio Grande do Sul**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.20, n.02, 2019

Revisão de Métodos de Formação de Swarms Utilizando Morfogênese

André L. Braga*, Ronaldo R. Goldschmidt, Paulo F. F. Rosa

Instituto Militar de Engenharia (IME)
Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 22290-290
andre.luiz.braga@ime.eb.br

RESUMO: A Morfogênese é o processo de crescimento dos seres vivos a partir de células individuais. Ela tem sido bastante inspiradora para criação de algoritmos para o controle de coletividade de agentes. A Pesquisa nessa área começou com o primeiro modelo desenvolvido por Alan Turing em 1952 e seguiu diferentes caminhos até hoje. Uma das suas principais funções é como especificar uma formação para um conjunto de agentes de um enxame. Algumas formas são bem simples, como círculos, mas podem ser bastante complexas para uma área indefinida qualquer. Este trabalho apresenta uma revisão sobre os diferentes métodos de aplicação desse paradigma na formação de enxames de agentes, assim como uma perspectiva evolutiva histórica das abordagens.

PALAVRAS-CHAVE: Morfogênese, Enxames Robóticos, Formação de Enxames

ABSTRACT: The Morphogenesis is a living being growth process from individuals cells. It has been very inspirational to create algorithms that control agent's collectives. The research on this area has begun in the first model created by Alan Turing in 1952 and followed different directions until the present. One of the key question is specify any formation to a set of a swarm agents. Some shapes are very simple, such as circles or very complex to a undefined random area. This paper presents a review about different applications of this paradigm in the formation of swarm agents, as well as a historical evolutionary perspective of those approaches.

KEYWORDS: Morphogenesis, Robotic Swarms, Shape Formation

1. INTRODUÇÃO

A Morfogênese é um dos mais intrigantes processos biológicos na natureza. Ela descreve como células individuais, sem qualquer informação de posicionamento global, são capazes de se auto-organizar e construir, de forma robusta, uma determinada estrutura. A análise deste processo levanta várias possíveis soluções para controle de coletividade de agentes, tais como robôs terrestres e aéreos.

Além disso, ela pode trazer aos algoritmos as mesmas capacidades biológicas de robustez, precisão e independência de referências posicionais globais, de modo que, a mesma forma pode ser produzida em diferentes escalas transparentemente dependendo do número de agentes disponíveis [43].

Houve várias abordagens aplicando Morfogênese a *Swarm* de robôs desde a sua mais aceita modelagem matemática proposta por Alan Turing em 1952 [81]. Um dos problemas é que o paradigma vem sendo usado com diferentes perspectivas e em alguns casos por mera analogia e não explorando realmente o modelo. Porém, a questão que é menos exposta são os detalhes de como especificar a forma final desejada do *Swarm* e, na maioria das vezes, temos apenas simulações em softwares matemáticos como o MATLAB [51].

A terceira questão que restringe o avanço das pesquisas é a falta de um código aberto flexível e amigável para que se possa simular as múltiplas versões dos algoritmos. A maioria dos projetos foi abandonada ou descontinuada. Por último, não houve muitos

avanços em aplicar morfogênese especificamente em *Swarms* Aéreos Autônomos [53]. As abordagens mais próximas são formações em ambiente aquático [77, 79] ou Nano robótica [21], onde o modelo se adequa à forma mais próxima.

A fim de cobrir todas estas questões que levantamos, nosso primeiro passo será uma revisão histórica profunda de todas as abordagens para fazer uma especificação sólida para a formação de *Swarms* e também uma arquitetura padrão baseada em morfogênese para sistemas robóticos mais complexos.

Na próxima seção, descrevemos os conceitos básicos de morfogênese, como eles têm sido aplicados nas diversas áreas interdisciplinares e, na seção 3 a evolução histórica das suas abordagens em aplicações robóticas. A seção 4 apresenta uma revisão de todos os métodos para definição da formação dos *Swarms* com foco e inspiração no paradigma de morfogênese. Na seção 5 mostramos algumas propostas de arquitetura para o conter a implementação de algoritmos de formação utilizando morfogênese e finalmente, na seção 6 resumimos as contribuições desse trabalho e referências.

2. MORFOGÊNESE

2.1 Conceitos

A Morfogênese é o processo biológico [71, 81] a partir do qual células individuais se reproduzem criando macroestruturas

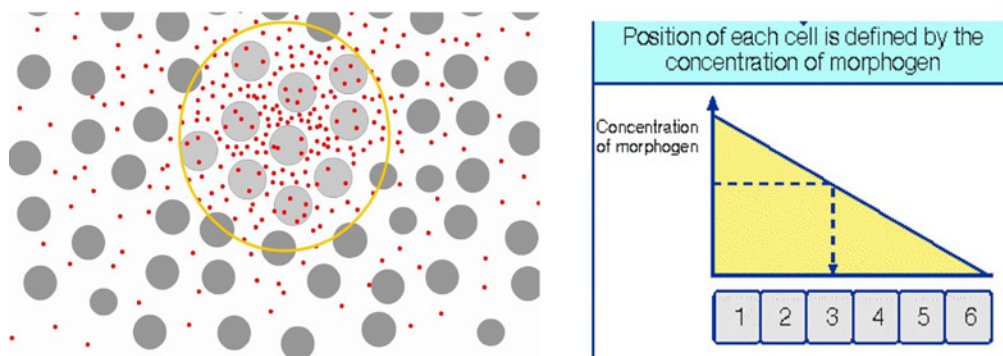


Fig. 1 - Informação posicional dada pelos Morfogêns

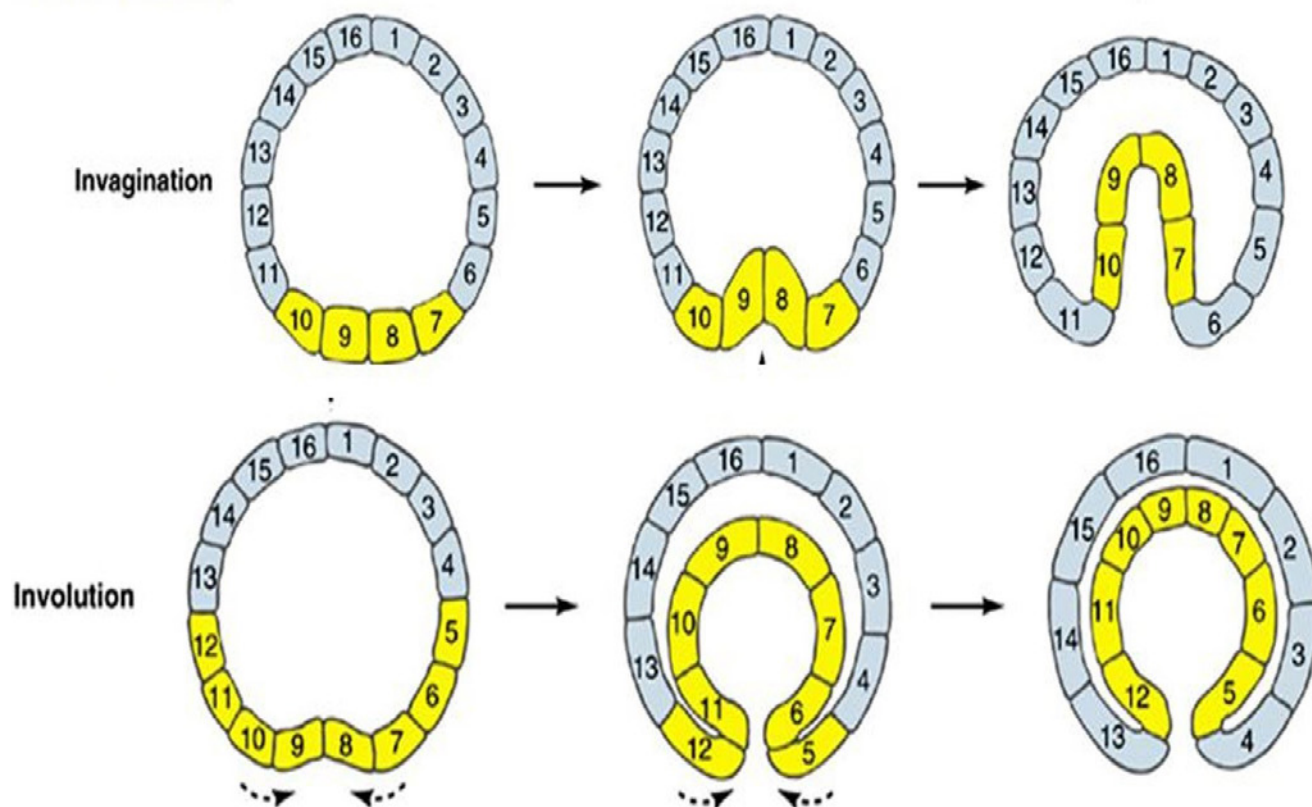


Fig. 2 - Modelo morfogênico posicional

[9] em organismos multicelulares [24] e seres vivos [37]. Desde o primeiro modelo de Turing em 1952, houve muitos estudos tanto para entender este processo quanto para usar seus princípios nas áreas de computação.

A explicação mais usual deste processo [17, 29, 39, 48] (Fig. 1) é a ideia que um certo elemento químico, no caso uma proteína (P), também chamada de *Morfogên*, se propaga a partir de algumas células para sua vizinhança e sua difusão de concentração de P, variando de valor a partir da fonte original, irá se traduzir na informação posicional.

Digamos, por exemplo, que alguma célula inicial tenha a concentração de $P=100$ (Fig. 3) e quando ela passa ao seu vizinho, o valor decresce para 90 e assim por diante. Se olharmos a taxa de declínio de P como o gradiente de P em alguma direção, digamos “X”, teremos um sistema de coordenadas relativas totalmente independente do mundo real. Nos sistemas biológicos isto é absolutamente necessário, uma vez que não existe nenhum meio de auto posicionamento global. Esta característica do paradigma é justamente o que nos permite criar algoritmos para *Swarms* capazes de posicionamento autônomo totalmente a parte de referências externas.

A Fig. 2 mostra um exemplo de como um embrião começa sua formação inicial. O código interno definido pelo DNA produz novas células de acordo com a posição relativa especificada pela concentração do seu Morfogên.

Este conceito é útil para o entendimento do princípio básico da morfogênese, ou seja, o posicionamento por gradiente, mas não suficiente se queremos construir um modelo funcional e algoritmos para controle de um *Swarm*.

Se estendermos a ideia de que tipos diferentes de Mor-

fogêns definem cada dimensão espacial, (ex. X), ainda teríamos um problema: Se cada célula não tem orientação espacial global, como ela saberia em que direção propagar cada Morfogên?

Este é o mesmo problema enfrentado por *Swarms* de agentes robóticos sem nenhum sistema de posicionamento global. Na verdade, um sistema de orientação principal de coordenadas deve ser criado. Os sistemas biológicos o criam implicitamente. A interação entre as células, quando propagando os Morfogêns, funciona através de oscilações realimentadas de reação e difusão. Basicamente, a proteína “P” que representa o Morfogên, propaga para sua vizinhança e estimula a criação de outro elemento “G” (que de fato corresponde aos RNAs) e que regula a produção da proteína “P” além da difusão propagada de volta para a célula original e suas vizinhas. A propagação de retorno inibe a continuação da produção e este efeito vai criando um padrão de oscilação de um ponto de vista macro celular que vai decaindo o valor dos Morfogêns em um processo denominado “Modelo de Reação-Difusão” [39].

Até este ponto temos um mecanismo estável que reforça o decaimento consistente do gradiente dos Morfogêns (através do domínio da frequência) com robustez na sua relação com o posicionamento, mas pode-se perceber que em tal modelo a propagação estaria constante em todas as direções, portanto eixos direcionais não seriam criados.

A Fig. 3 mostra como isso ocorre. As “Ondas” de propagação de Morfogêns são naturalmente suscetíveis a pequenas perturbações, já que no universo real, o decaimento do gradiente não são funções discretas. Uma dessas perturbações estimula uma maior propagação em certa direção e a partir dali o mecanismo de reação-

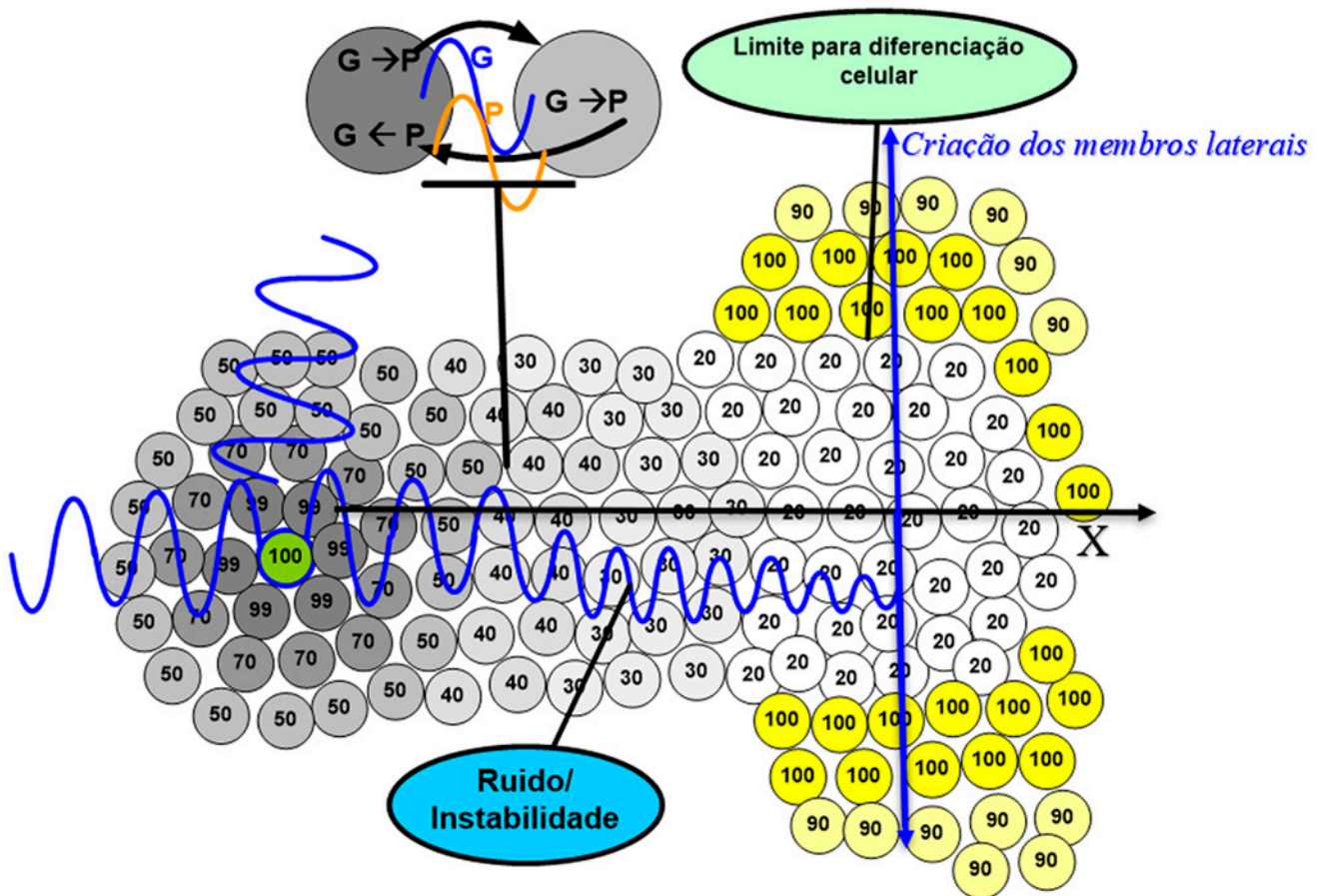


Fig. 3 - Conceito de reação-difusão de Morfogêns

difusão reforça o crescimento do conjunto naquela direção, criando um “eixo” que quebra o crescimento simétrico da “bolha” formando uma estrutura cilíndrica. A partir desse ponto, a diferenciação ou novos tipos de células são criadas além de “tentáculos” em outras direções de acordo com o nível de concentração dos Morfogêns. Na Fig. 3, podemos ver, por exemplo que ao atingir o limite mais baixo na extremidade, as células começam a se propagar ortogonalmente formando membros laterais. Contudo, como pode se observar, com a falta de um sistema global de controle, os membros se formam igualmente em cada lado, o que explica a constante bilateralidade ou simetria da maioria das estruturas biológicas. Podemos ver outros exemplos deste processo explicados em [11, 27, 71].

O modelo matemático e computacional da Morfogênese é bastante similar ao de autômatos celulares multidimensionais [3, 26, 85], onde, no nosso caso, o DNA age como a regra que troca o estado de cada célula dependendo do valor dos Morfogêns de seus vizinhos, neste caso é claro, de forma analógica. Não encontramos estudos nesta direção na área de Engenharia Morfogênica.

As equações (1) e (2) a seguir evoluíram do modelo original de Turing [81] expressando através de um sistema de equações diferenciais o processo oscilatório já descrito. A equação (3), ou seja H_s , expressa a forma desejada do *Swarm* regulando o decaimento do gradiente dos Morfogêns (G e P) de acordo com as coordenadas que eles representam e f_i é uma função sigmoide usada para normalização. Este modelo computacional assume um sistema de coordenadas fornecido o que em reais sistemas biológicos é formado em paralelo com o processo de Morfogênese.

$$\frac{dG_v}{dt} = mP_v - a \frac{\partial H_s(G)}{\partial G_v}, v = x, y, z \dots \quad (1)$$

$$\frac{dP_v}{dt} = -cP_v - k f_i \left(\frac{\partial H_s(G)}{\partial G_v} \right), v = x, y, z \dots \quad (2)$$

$$H_s(G) = H_s(G_x, G_y, G_z, \dots) \quad (3)$$

2.1 Abordagens

Modelos Biológicos – Os fundamentos desta área fornecem uma forte base para modelagem robótica de *Swarms* aéreos dado que sistemas biológicos crescem na maioria em ambientes líquidos onde nenhum sistema de posição global e muito pouca capacidade de sensoramento e comunicação.

Os modelos computacionais ainda se baseiam nas equações originais de reação e difusão [81] até chegar a implementações mais sólidas em 2012 [25, 71]. Este campo interdisciplinar foca em determinar os detalhes de como a informação posicional [37] se conecta com a topologia das formas criadas [24, 27, 43], diferenciação celular e simetria.

Existem algumas implementações [9] somente criadas com o propósito de revelar os mistérios do processo, mas o que torna o problema mais complexo é que muitos outros mecanismos heterogêneos operam em células reais [3] e muitos modelos tem sido propostos focando em diferentes níveis [42], desde o molecular até tecidos.

Vida Artificial – Os modelos computacionais não só nos ajudam a entender o processo da morfogênese, mas permite pesquisadores irem um passo à frente e analisar possíveis

novas morfologias através da manipulação dos parâmetros do sistema [11, 34, 68, 74]. Estes modelos podem explicar detalhes da evolução das espécies assim como criar sistemas autoreparáveis.

Robótica – A aplicação do paradigma de morfogênese em robótica se tornou tão popular que em 2011 surge o termo “Robótica Morfogênica” [12, 32, 46] e tem sido explorado em diversas perspectivas desde então [59], as quais nem sempre usam o conceito completo do paradigma, mas partes dele, e até considerado simplesmente quando uma coletividade de agentes robóticos autônomos tem a capacidade de se auto integrar em alguma macro estrutura [54]. Na próxima seção veremos a evolução histórica da morfogênese na robótica.

3. REVISÃO DA ROBÓTICA MORFOGENÉTICA

3.1 Perspectiva Histórica

O modelo matemático da Morfogênese [81] se tornou um paradigma muito interessante para o controle de agentes robóticos. Em 2011, surgiram os primeiros artigos com o nome “Robótica Morfogênica” [32] que mais tarde se consolidou como um campo da engenharia [12, 30]. A **Tabela 1** resume as principais abordagens nessa área, as quais evoluíram em objetivos paralelos. A primeira apenas se inspira em mode-

lagem e conceitos do paradigma, como por exemplo, a ideia de que coletividades de robôs podem construir formas ou mesmo montar macroestruturas através da união de robôs individuais, como blocos de construção. A abordagem destes artigos apresenta algoritmos ou modelos genéricos apenas para casos particulares.

A segunda abordagem usa o gradiente morfogênico como forma de definição de coordenadas e a partir das quais se aplicam algoritmos de geometria computacional conhecidos. As últimas duas abordagens focam no mecanismo de reação-difusão real, mas uma delas aplica a enxame de *Swarms* densos e a outra em agentes coletivos dispersos.

3.2 Direções da Pesquisa

Fundamentos – Apesar do trabalho fundamental em morfogênese ter começado em 1952[81], como observa-se na **Tabela 1**, apenas em Mamei 2004[48], vemos um trabalho mais sólido na aplicação do paradigma em *Swarms*. Ele levanta os seguintes importantes elementos:

- 1) Eleição de Líder – Necessário para definir o ponto de início para o sistema de coordenadas e propagação dos Morfogêns.
- 2) Seleção de Região – Define a região de propagação do Morfogên.

Tabela 1: Perspectiva histórica das abordagens morfogênicas

Ano	Fundamentos	Geometria Computacional	Modelo de SWARM	Rede Regulatória de Genes
1952	(Turing, 1952)			
2004		(Mamei, Vasirani, & Zambonelli, 2004)		(Timothy Taylor, 2004)
2005			(Ostergaard et al., 2005)	(Stewart, Taylor, & Konidaris, 2005)
2007				(Tim Taylor, Ottery, & Hallam, 2007)
2008		(A. O'Grady & Dorigo, 2008)		(Sendhoff, 2008)
2009			(R. O'Grady, Christensen, & Dorigo, 2009)	(Guo, Meng, & Jin, 2009) (Jin, Guo, & Meng, 2009)
2010	(Kondo & Miura, 2010)	(Sayama, 2010)	(Sayama, 2010) (Yeom & Park, 2010)	(Guo, Meng, & Jin, 2010)
2011		(C. Barca & Sekercioglu, 2011)		(Guo, Meng, & Jin, 2011)
2012	(Setty, Cohen, & Harel, 2012)		(Doursat, Sánchez, Dordea, Fourquet, & Kowaliw, 2012)	(Guo, Jin, & Meng, 2012) (Meng & Guo, 2012)
2013	(Eiben et al., 2013)	(J. C. Barca, Lee, & Sekercioglu, 2013)		(Meng, Guo, & Jin, 2013) (Jin & Oh, 2013)
2014			(Ramezan Shirazi, Oh, & Jin, 2014)	(Oh & Jin, 2014a) (Oh & Jin, 2014b)
2015		(Yang, Ding, Jin, & Hao, 2015; Yu & Barca, 2015)		
2016	(Estepa, Erasso, & Avilés S, 2016)		(Jansson et al., 2015) (Oh, Shiraz, & Jin, 2016)	
2017	(Oh, Ramezan Shirazi, Sun, & Jin, 2017)	(Oh et al., 2017)	(Oh et al., 2017)	(Oh et al., 2017)

- 3) Sistema de Coordenadas – É necessário que os Morfogêns se ancorem em pontos de referência, como faróis para estabelecer um sistema ortogonal para cada dimensão de propagação.
- 4) Padronização – Criação de padrões baseados na definição da formação.
- 5) Comunicação – O gradiente dos Morfogêns pode ser usado para transmitir mensagens entre os agentes.
- 6) Morfogêns adaptativos – Os Morfogêns vão mudando ao longo de sua propagação mudando o comportamento dos agentes.

Geometria Computacional – O modo mais simples de especificar a formação de um *Swarm* é combinando algoritmos geométricos conhecidos e suas propriedades. Por exemplo, se desejarmos criar círculos, nós apenas precisamos inserir uma restrição de distância “R” que todos os agentes devem manter de um certo ponto. O primeiro algoritmo usando este paradigma [48] usa a ideia de posições relativas traduzidas para o gradiente dos Morfogêns. A Fig. 4 apresenta um dos vários algoritmos para formações circulares usando tipos diferentes de Morfogêns para focar a densidade do *Swarm* a um certo raio. Outras abordagens basicamente criam funções de manipulação geométrica [54, 55] deixando a especificação da forma para o projetista do sistema, como no trabalho de Barca et al, desde 2011[4–6, 86] pois eles simplesmente movem agentes líderes para os pontos alvos da forma desejada e agentes seguidores preenchem os espaços restantes. Apesar de pragmática, essa abordagem não é tão robusta. Mais tarde, em [84] a captura de alvos e a construção de sistemas de coordenadas através de diagramas de *Voronoi* é incorporada.

```

if particle == BARYCENTER
  injectGradient(CIRCLE)
end if
while(1)
  if getGradient(CIRCLE).value > R
    moveDownhill(CIRCLE)
  end if
end while

```

Fig. 4 - Algoritmo simplificado para criação de círculos [48]

Modelos de Swarm – Esta é uma linha que se aplica a sistemas com alto número de agentes com grande densidade. O paradigma de morfogênese foi originado naturalmente deste tipo de abordagem o que o torna mais adequado para o uso em *Swarms* robóticos [15]. Estes foram os primeiros modelos aplicados a sistemas robóticos subaquáticos [62, 74, 77] e as pesquisas nesta direção vêm utilizando *Swarms* para cooperação e montagem de macroestruturas [55]. A coesão do movimento dos *Swarms* [66] e as técnicas de autômatos celulares [85] são capazes de criar comportamentos autônomos complexos. A variação da densidade do *Swarm*, por exemplo, é capaz de criar uma referência global para todo o sistema [65]. O modelo formal do gradiente de difusão da morfogênese [11] é usado para manter o *Swarm* agregado enquanto se movimenta identificando bordas, desvio de obstáculos e captura de alvos.

A ideia básica é usar os Morfogêns como um “Token” que é passado através do *Swarm* e modificando seu valor dependendo das suas condições de vizinhança, por exemplo, se uma célula não recebe o mesmo “Token” de todos os vizinhos, então isso indicará a borda do *Swarm*. Até o momento, o paradigma só foi aplicado a sistemas robóticos terrestres [28, 60].

Redes Regulatórias de Genes (GRNx) – O conceito fundamental da morfogênese, além de traduzir posição real em gradiente dos Morfogêns, diferente das abordagens de Geometria Computacional, onde temos algoritmos geométricos explícitos, é o mecanismo de reação e difusão dos Morfogêns entre as células que é disparado pelo controle da célula (Ou seus Genes) que cria um sistema oscilatório que move as células ou agentes na direção da forma desejada, a qual é definida pelo gradiente da função que especifica a formação do *Swarm*. A rede que expressa o relacionamento entre os genes e a produção dos Morfogêns de cada célula foi denominada “Rede Regulatória de Genes” (Gene Regulatory Network == GRN) e é amplamente aplicado a *Swarms* [40, 56–58, 74, 79].

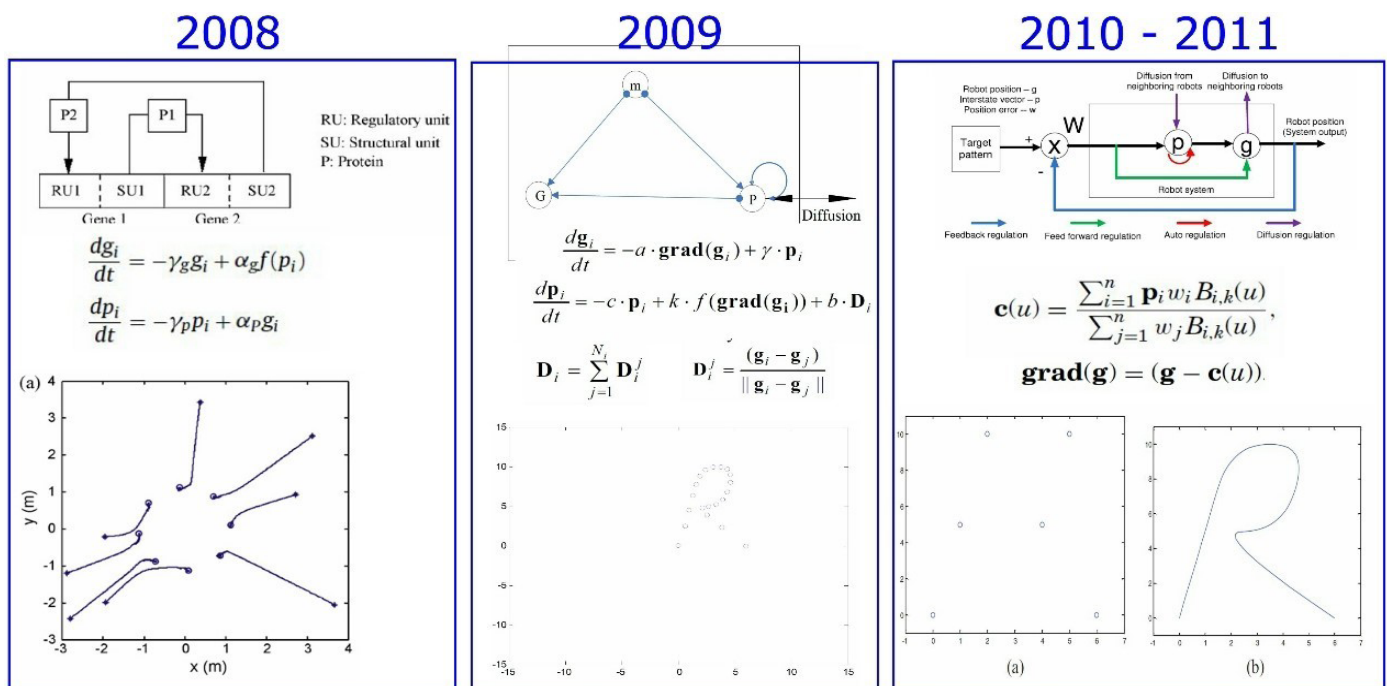


Fig. 5 - Evolução histórica da formulação matemática das abordagens em Redes Regulatória de Genes (1)

Um dos trabalhos mais bem sucedidos na área utiliza CAM¹ em conjunto com o modelo GRN [74, 77, 78], apesar do contato denso e alto número de agentes não ser realmente necessário, o grupo líder nessa área, iniciando em 2008 [74, 77, 78] (Fig. 5), demonstra várias simulações com formas padrão simples, tal como círculos e elipses [33] e outras formas que podem ser expressas em forma analítica.

As formas com formato livre podem ser expressas por uma combinação de múltiplas funções, mas este método não é muito prático e dificulta provas de convergência. A aplicação de NURBS [63] é uma solução para estas questões [17, 19, 20]. Neste modelo, o desvio de obstáculos pode inclusive ser incorporado ao algoritmo diretamente como um fator que aumenta ou diminui a velocidade dependendo da proximidade com outros agentes [18, 31]

Uma outra abordagem utiliza redes (chamadas “*motifs*”) de elementos para criar a função gradiente de reação-difusão. As primeiras tentativas, apenas em simulações, criam formas arbitrárias para se encaixar no ambiente (2012 na Fig. 6) [50] e recebendo informações de alvos a serem capturados pela forma [51]. Esta foi a primeira simulação tridimensional e real implementação em duas dimensões. Os trabalhos seguintes incluíram os dados dos obstáculos como entrada da rede e algoritmos genéticos treinamentos das redes [56, 57]. Esta abordagem cobre a maioria dos problemas, mas não constrói formas específicas, mas arbitrariamente de acordo com as necessidades de captura e desvio de obstáculos. Além disso, ainda não implementada em protótipos aéreos tridimensional [59]

4. MÉTODOS DE DEFINIÇÃO DE FORMA

4.1 Sistemas de Coordenadas

Sistemas de Coordenadas – A autolocalização dos sistemas biológicos se baseia em algumas características im-

plicitas que não existem nos sistemas robóticos em geral. A principal delas é o ambiente de interação físico entre as células. Agentes robóticos [38] não se “tocam”, como células biológicas ou nos modelos de Swarms [11, 19], portanto, este é um mecanismo fundamental que precisa ser simulado para que alguma forma de informação posicional seja inserida no sistema. Os GPSs² consomem muita energia e não funcionam em ambientes fechados.

Existem vários métodos para definir sistemas de coordenadas [10, 17, 19, 20, 35, 80, 83], a maioria deles requer a identificação de pontos de referência [11, 17, 19] dentro do *Swarm* e garantir que eles pertençam ou sejam relacionados à formação do *Swarm*. Eles são submetidos a processos de triangulação [10, 35, 73, 76] que irão definir as coordenadas para todos os agentes dentro de um sistema ortogonal.

4.2 Tipos de Formas

Formatos Geométricos Padrão - Existem várias abordagens para especificação de formatos padrão, como círculos ou linhas retas [5, 10, 69, 86], a mais usual é definir “pontos-alvos” dentro do formato e calcular as trajetórias ótimas até estes pontos [5, 10].

Os métodos mais complexos e gerais podem criar tanto os formatos padrão quanto os formatos livres, mas a um custo computacional mais alto e mais questões a serem observadas, como colisões, por outro lado, há métodos que criam formas através da combinação de um par de funções analíticas e algoritmos bastante simples.

Mamei et. al, 2004 [48] usam a ideia de Morfogên como um “token” que é espalhado pelo *Swarm* para criar círculos, anéis e lóbulos. Barca [4, 5] simplesmente identifica “Pontos Alvo” na formação desejada e move os agentes para estes pontos e os seguidores preenchem os espaços para completar a forma. As formas padrão também podem ser criadas através de “Redes Reguladoras Genéticas” (ou GRN) [18, 31, 33] através da especificação das funções analíticas no modelo GRN como explicaremos melhor adiante.

¹ Cohesion Adhesion Model (Modelo de Coesão-Adesão)

² Global Positioning Systems – Sistemas de Posicionamento Global

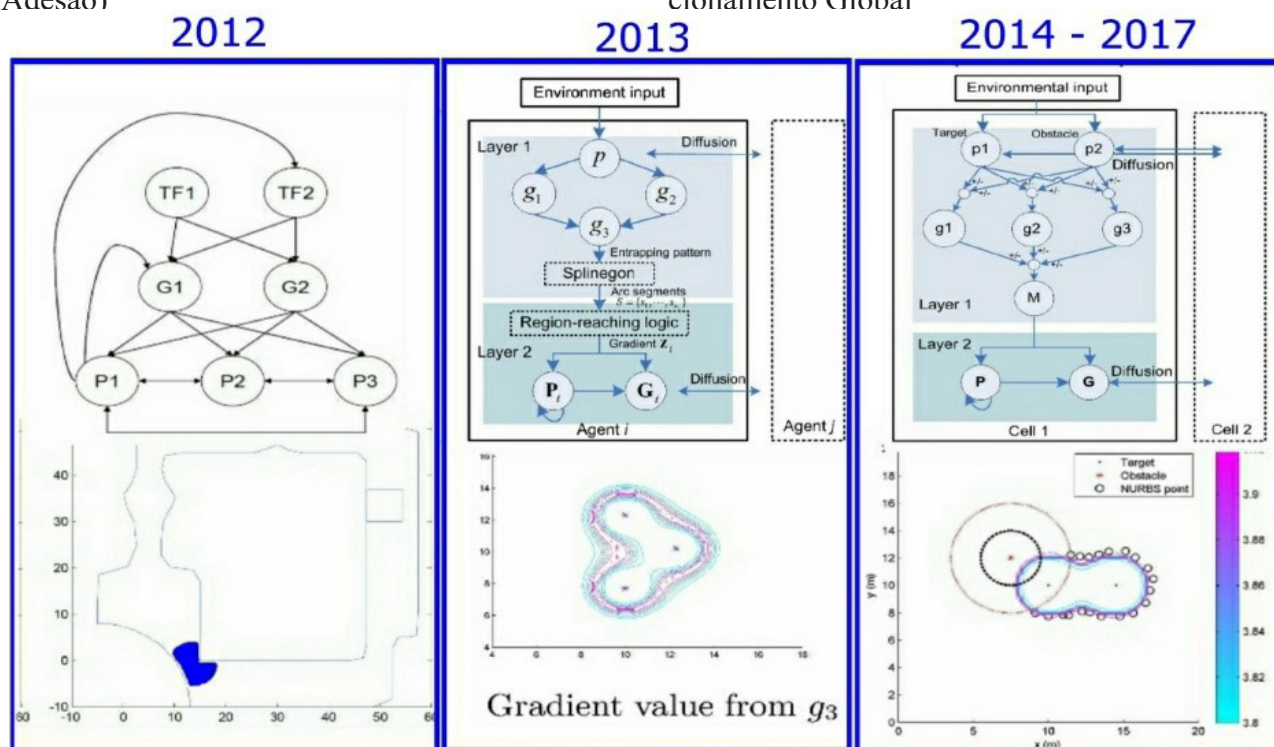


Fig. 6 - Evolução histórica da formulação matemática das abordagens em Redes Regulatória de Genes(2)

Formas Geométricas Não-Padronizadas – Existem algumas soluções especiais para formas não tão comuns, como polígonos através da criação de “lóbulos” como vértices em um *Swarm* [48] (Fig. 7), por outro lado a abordagem através de GRNs se torna simples se pudermos subdividir os polígonos em formas mais básicas [31, 33].

Formas Livres – A primeira das três abordagens mais comuns é definir o formato através de pontos alvo [5] para todos os agentes ou para um líder que será seguido. Isto é bastante simples e de baixo custo computacional, mas não muito eficiente e explora o potencial do *Swarm*. A segunda é basicamente construir um algoritmo geométrico Ad Hoc para a forma desejada [4, 36, 48, 52, 85, 86]. Esta não é uma boa solução geral e pode ser que não exista algoritmo determinístico para uma certa forma livre qualquer. A terceira abordagem exploraria completamente o paradigma de Morfogênese sendo capaz de criar qualquer forma, mesmo os “padrões” adicionando a função gradiente da forma analiticamente [18, 31, 33] ou em partes usando NURBS³[63]. A utilização de NURBS não é mandatória, mas permite simples prova de convergência do algoritmo. O trabalho de Yaochu Jin [17–20, 29, 31–33, 51, 56, 57, 59, 60, 65] tem evoluído basicamente nesta direção por muitos anos, mas não saindo muito dos limites das simulações matemáticas e sem uma explicação clara da reconciliação da implementação do algoritmo com a determinação do sistema de coordenadas.

4.3 Abordagem de Implementação

As GRNs, como mostradas nas equações (1), (2) e (3) e detalhadas no modelo geral em [47] seriam implementadas através dos seguintes passos:

1) Calcular o sistema de coordenadas e atribuir os valores

³ Non-Uniform Rational B-Splines

expressos pelo elemento G_v a cada dimensão do sistema de coordenadas $v = x, y, z, \dots$

2) Calcular a velocidade P_v para mover a célula robótica em cada dimensão v de acordo com a equação (4): A velocidade decai a cada iteração por $(1 - c.P_v)$ para cada dimensão, de tal forma que o sistema se estabilize. Da mesma forma a velocidade pode aumentar ou diminuir, dependendo do gradiente da função que representa a forma alvo, ou seja, se a célula está próxima da função definida por $H_s(G)$, o gradiente vai adicionar velocidade (ou diminuir, se em sentido oposto), de tal forma que tende a zero exatamente e na função da forma-alvo. Por fim, o fator $b.D_v t$ é responsável por evitar colisões entre os agentes alterando a velocidade no sentido que se aproxima de outros agentes.

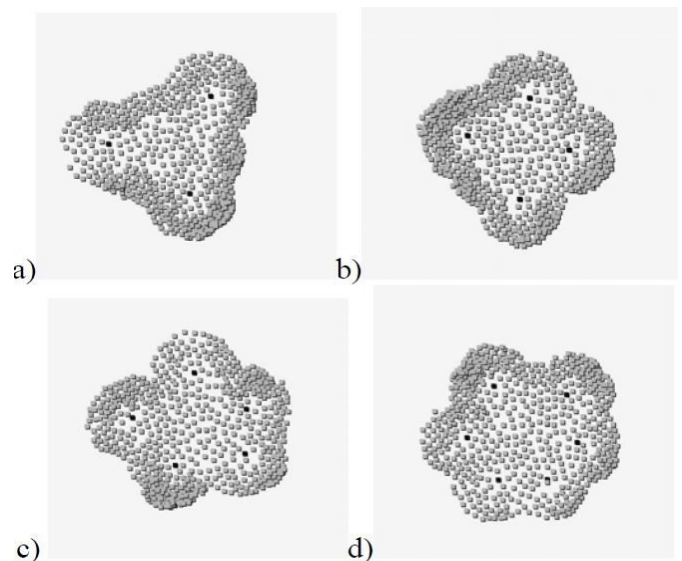


Fig. 7. Formação de polígonos através de lóbulos densos [48]

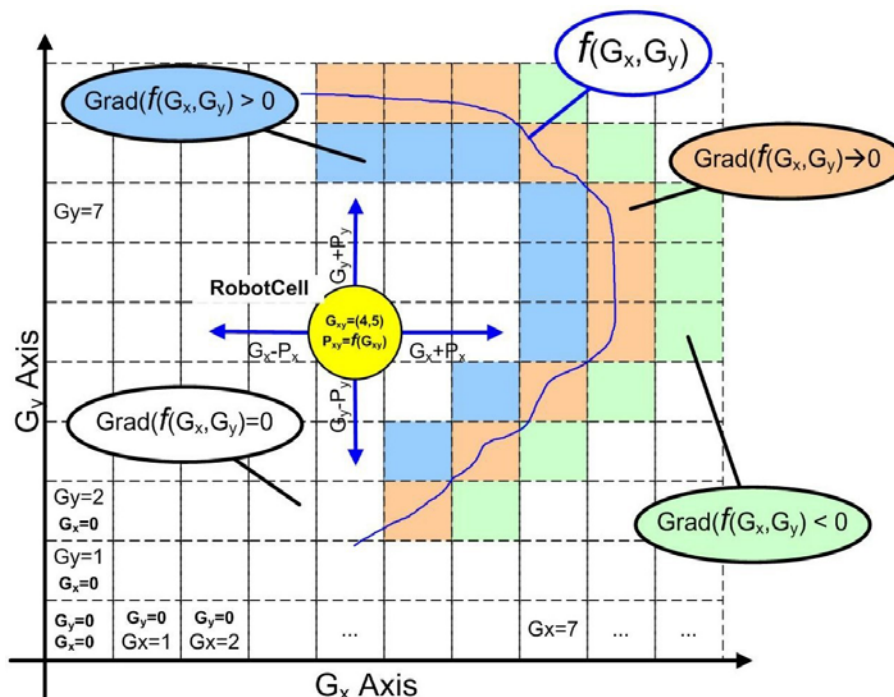


Fig. 8 - Movimento individual de agentes robóticos utilizando Redes Regulatórias de Genes

$$P_v(t+1) = -c \cdot P_v(t) - k \cdot f\left(\frac{\partial H_s(G(t))}{\partial G_v(t)}\right) + b \cdot D_v(t) \quad (4)$$

$$v = x, y, z \dots \quad (5)$$

Uma vez que a velocidade expressa por “P” tenha sido calculada (em passos ou outra unidade que expresse a posição em G_v), ela é adicionada à dimensão correspondente, como na equação (6)

$$G_v(t+1) = m \cdot P_v(t) - a \frac{\partial H_s(G(t))}{\partial G_v(t)} \quad (7)$$

Note que o gradiente também participa no ajuste à posição, sutilmente: Os lugares muito longes da função alvo não geram influência, dado que o gradiente é zero, mas quando chega próximo, ele aumenta, chega ao máximo e volta a zero exatamente sobre a função alvo.

A **Fig. 8** mostra o funcionamento dos passos acima para uma grade bi-dimensional onde cada coordenada sobreposição a posição relativa expressa por G_v e a velocidade P_v . “Grad($f(G_x, G_y)$)” representa o gradiente da função de forma H_s como mostrada na equação (6)

Formas Orientadas ao Ambiente – Estas formações podem ser padrão ou completamente livres, por exemplo, se um Swarm é requerido a passar entre um corredor estreito, ele irá optar pelo formato “linha reta”. As abordagens simplesmente usando geometria computacional iria detectar o Ambiente e invocar a formação necessária.

Por exemplo, se todo agente tiver um comando de estar a uma certa distância mínima das paredes ou obstáculos [64].

Isso pode ser feito por algoritmos de geometria computacional [5, 21, 69, 86] ou também incluídos no *Swarm* [60, 65, 66] ou algoritmos de GRNs [18, 50, 56, 57], onde o desvio de obstáculos é criado adicionando um fator de distância (Equação (4), as equações diferenciais de movimento.

Formação Orientada a Tarefas – As técnicas não são diferentes das usadas nas formas orientadas ao ambiente, mas podem depender da tarefa em questão. A tarefa mais usual dos *Swarms* é a vigilância, aonde o objetivo será o maior espalhamento possível para cobrir maior área [1]. Uma das outras é capturar alvos [2, 49], onde as formações são em geral círculos ou elipses em torno do alvo. Algoritmos de geometria computacional, tais como o exemplo [5] são mais comuns neste caso, mas GRNs também podem incorporar tarefas. Em [13], uma estrutura similar as redes neurais são proposta para geração de funções Ad Hoc para capturar alvos e evitar obstáculos ao mesmo tempo.

Estas redes são projetadas por GA⁴. Apesar de muitos problemas poderem ser simplesmente resolvidos por um par de algoritmos padrão, uma investigação mais profunda na construção de formas pode nos fornecer outros avanços em diferentes áreas, tal como autoconstrução e reparo de macroestruturas e possíveis correções de processos biológicos

5. PROPOSTAS DE ARQUITETURA PARA DEFINIÇÃO DE FORMAS EM SWARMS

Existem alguns poucos sistemas desenvolvidos para análise e teste de algoritmos inspirados em morfogênese, porém, há uma falta de sistemas de código aberto e flexível onde se possam testar e desenvolver variações e propostas de algoritmos e com uma GUI⁵ e extensões apropriadas para *Swarms* Robóticos. METAMorph [74] foi uma plataforma muito interessante, mas teve seu projeto cancelado, como outros [9, 55]. Os sistemas atualmente têm plataformas fechadas e focadas no lado biológico da Morfogênese e vida artificial [11, 76]. Acreditamos que uma plataforma mais adequada para simulações e teste de algoritmos deste paradigma poderia ser uma valorosa contribuição para a área.

6. CONCLUSÕES

A coletividade de agentes é um sistema mais poderoso, robusto e flexível para solucionar tarefas humanas do que agentes individuais. Sendo estes agentes virtuais de software ou agentes físicos robóticos [14], ainda assim, possuem mais vantagens como, por exemplo, a resistência à falhas individuais, distribuição de carga, etc. Um dos grandes desafios destes sistemas é como especificar a formação autônoma de uma coletividade de pequenos agentes. Não existe uma solução ideal única. Algumas cobrem o suficiente para as tarefas em questão e outras não são suficientemente robustas. Como regra geral, o mais eficiente é a combinação de várias técnicas.

Este trabalho apresenta uma revisão do estado da arte de todos estes métodos e sua evolução histórica. O paradigma de morfogênese é um dos mais robustos destes métodos e nós apresentamos uma sólida perspectiva de implementação dos trabalhos publicados até o momento, porém nos parece claro que alguns algoritmos computacionais básicos de formação poderiam ser muito úteis se trabalhassem em conjunto com os de morfogênese, tais quais o de desvio de obstáculos e captura de alvos. Existe uma falta de plataformas abertas padronizadas para avaliação e testes destes algoritmos. Portanto sugerir novas arquiteturas para atender a esta necessidade seria uma importante contribuição para a área.

O estado da arte da implementação de algoritmos de morfogênese não apresenta nenhuma proposta sólida para *Swarm* Aéreos Autônomos. Nós acreditamos que a análise apresentada neste trabalho possa permitir a extrapolação e implementação dos algoritmos para formação de modelos multidimensional de controle e formação de *Swarms*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Jose Joaquin Acevedo, Begonia C. Arrue, Ivan Maza, and Anibal Ollero. 2013. Distributed approach for coverage and patrolling missions with a team of heterogeneous aerial robots under communication constraints. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10 (2013), 1–13. <https://doi.org/10.5772/52765>
- [2] Yaniv Altshuler, Vladimir Yanovsky, Israel A. Wagner, and Alfred M. Bruckstein. 2008. Efficient cooperative search of smart targets using UAV Swarms. *Robotica* 26, 04 (2008). <https://doi.org/10.1017/S0263574708004141>

⁵ Graphical User Interface (Interface Gráfica com o Usuário)

⁴ Genetic Algorithms (Algoritmos Genéticos)

- [3] Pascal Ballet, Abdallah Zemirline, Lionel Marcé, Gilles Bernot, Franck Delaplace, Olivier Michel, Jean-marc Delosme, Patrick Amar, Roberto Incitti, Paul Bourguine, Christophe Godin, François Képès, Vic Norris, Janine Guespin, Demarty Camille Ripoll, Université Marne, La Vallée, and Crea Ecole Polytechnique. 2002. Course on Cellular Automata, Reaction -Diffusion and Multiagents Systems for Artificial Cell Modeling
- [4] C Barca and A Sekercioglu. 2011. Generating formations with a template based multi-robot system. In Australasian Conference on Robotics and Automation, Vol. 20. Monash University, Melbourne, Australia, 7–9.
- [5] Jan Carlo Barca, Eugene Eu-Juin Lee, and Y Ahmet Sekercioglu. 2013. Flexible Morphogenesis based Formation Control for Multi-Robot Systems. *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)* 2, 1 (2013), 31–38.
- [6] Jan Carlo Barca and Y. Ahmet Sekercioglu. 2013. Swarm robotics reviewed. *Robotica* 31, 03 (2013), 345–359. <https://doi.org/10.1017/S026357471200032X>
- [7] Levent BAYINDIR and Erol SAHIN. 2007. A Review of Studies in Swarm Robotics E. Z. Turk J Elec Engin 15, 2 (2007), 115–147. <https://doi.org/10.1.1.98.7821>
- [8] Randal W. Beard, Jonathan Lawton, and Fred Y. Hadaegh. 2001. A coordination architecture for spacecraft formation control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 9, 6 (2001), 777–790. <https://doi.org/10.1109/87.960341>
- [9] Arnab Bhattacharyya. 2006. Morphogenesis as an amorphous computation. In *Proceedings of the 3rd conference on Computing frontiers - CF '06*. ACM Press, 53. <https://doi.org/10.1145/1128022.1128032>
- [10] Vy-Long Dang, Binh-Son Le, Trong-Tu Bui, Huu-Thuan Huynh, and Cong-Kha Pham. 2016. A decentralized localization scheme for swarm robotics based on coordinate geometry and distributed gradient descent. *MATEC Web of Conferences* 54 (2016), 02002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165402002>
- [11] René Doursat, Carlos Sánchez, Razvan Dordea, David Fourquet, and Taras Kowaliw. 2012. Embryomorphic Engineering: Emergent Innovation Through Evolutionary Development. In *Morphogenetic Engineering: Toward Programmable Complex System*, René Doursat, Hiroki Sayama, and Olivier Michel (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 275–311.
- [12] René Doursat, Hiroki Sayama, and Olivier Michel. 2013. A review of morphogenetic engineering. *Natural Computing* 12, 4 (2013), 517–535. <https://doi.org/10.1007/s11047-013-9398-1>
- [13] Ricardo A C Estepa, Camilo A H Erasso, and Oscar F Avilés S. 2016. Comparison of Control Methods For Modular Robotic Systems. *International Journal of Applied Engineering Research* 11, 11 (2016).
- [14] Toshio Fukuda and Tsuyoshi Ueyama. 1994. Cellular Robotics and Micro Robotic Systems. Number vol. 10 in *World (Scientific) series in robotics and automated systems*. World Scientific, Singapore ; River Edge, N.J. 267 pages.
- [15] Paolo Gaudiano, Eric Bonabeau, and Ben Sharge. 2005. Evolving behaviors for a swarm of unmanned air vehicles. In *Proceedings - 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium, SIS 2005*, Vol. 2005. IEEE, 327–334. <https://doi.org/10.1109/SIS.2005.1501638>
- [16] Giovani Gracioli, Antônio Augusto Fröhlich, Rafael Pereira Pires, and Lucas Francisco Wanner. 2011.
- [17] Evaluation of an rssi-based location algorithm for wireless sensor networks. *IEEE Latin America Transactions* 9, 1 (2011), 96–101. <https://doi.org/10.1109/TLA.2011.5876427>
- [18] Hongliang Guo, Yaochu Jin, and Yan Meng. 2012. A morphogenetic framework for self-organized multirobot pattern formation and boundary coverage. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems* 7, 1 (2012), 1–23. <https://doi.org/10.1145/2168260.2168275>
- [19] Hongliang Guo, Yan Meng, and Yaochu Jin. 2009. A cellular mechanism for multi-robot construction via evolutionary multi-objective optimization of a gene regulatory network. *BioSystems* 98, 3 (2009), 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2009.05.003>
- [20] Hongliang Guo, Yan Meng, and Yaochu Jin. 2010. Analysis of local communication load in shape formation of a distributed morphogenetic swarm robotic system. In *2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, WCCI 2010 - 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2010*. IEEE, 1–8
- [21] Hongliang Guo, Yan Meng, and Yaochu Jin. 2011. Swarm robot pattern formation using a morphogenetic multi-cellular based self-organizing algorithm. In *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 3205–3210. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5979821/>
- [22] Khin Haymar, Saw Hla, Youngsik Choi, and Jong Sou Park. 2008. Obstacle Avoidance Algorithm for Collective Movement in Nanorobots. *Journal of Computer Science* 8, 11 (2008), 302–309.
- [23] Khin Haymar Saw Hla, YoungSik Choi, and Jong Sou Park. 2008. Obstacle Avoidance Algorithm for Collective Movement in Nanorobots. In *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 8 (11). 302–309.
- [24] Hyondong Oh, Seungkeun Kim, Hyo-sang Shin, and Antonios Tsourdos. 2015. Coordinated standoff tracking of moving target groups using multiple UAVs. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems* 51, 2(2015), 1501–1514
- [25] Dagmar Iber, Zahra Karimaddini, and Erkan Ünal. 2016. Image-based modelling of organogenesis. *Briefings in Bioinformatics* 17, 4 (2016), 616–627. <https://doi.org/10.1093/bib/bbv093>
- [26] Abir U Igamberdiev, Lev V Belousov, and Richard Gordon (Eds.). 2012. Editorial Board. *Biosystems* 109, 3 (2012), CO2. [https://doi.org/10.1016/S0303-2647\(12\)00138-4](https://doi.org/10.1016/S0303-2647(12)00138-4)
- [27] Andrew Ilchinski. 2003. *Cellular Automata ‐ A Discrete Universe*. Vol. 32. World Scientific, Singapore; River Edge, NJ.
- [28] Valeria V. Isaeva, Nickolay V. Kasyanov, and Eugene V. Presnov. 2012. Topological singularities and symmetry breaking in development. *BioSystems* 109, 3 (2012), 280–298.
- [29] Fredrik Jansson, Matthew Hartley, Martin Hirsch, Ivica Slavkov, Noemí Carranza, Tjelvar S. G. Olsson, Roland M. Dries, Johanna H. Grönqvist, Athanasius F. M. Marée, James Sharpe, Jaap A. Kaandorp, and Verônica A. Grieneisen. 2015. Kilombo: a Kilobot simulator to enable effective research in swarm robotics. *arXiv preprint arXiv:1511.04285 abs/1511.0* (2015). [arXiv:1511.04285](http://arxiv.org/abs/1511.04285)
- [30] Yaochu Jin. 2013. Morphogenetic Multi-Robot Pattern Formation Using Hierarchical Gene Regulatory Networks. In *FOCAS Workshop*. Taomina, Italia.
- [31] Yaochu Jin. 2015. Morphogenetic Robotics Home Page. (2015). <http://www.soft-computing.de/mr.html>
- [32] Yaochu Jin, Hongliang Guo, and Yan Meng. 2009. Robustness analysis and failure recovery of a bio-inspired self-organizing multi-robot system. In *SASO 2009 - 3rd IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*. IEEE, 154–164. <https://doi.org/10.1109/SASO.2009.19>
- [33] Yaochu Jin and Yan Meng. 2011. Morphogenetic robotics: An emerging new field in developmental robotics. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews* 41, 2 (2011), 145–160. <https://doi.org/10.1109/TS-MCC.2010.2057424>
- [34] Yaochu Jin and Bernhard Sendhoff. 2008. Evolving in silico bistable and oscillatory dynamics for gene regulatory network motifs. In *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2008*. IEEE, 386–391. <https://doi.org/10.1109/CEC.2008.4630826>
- [35] Michał Joachimczak, Taras Kowaliw, René Doursat, and Borys Wróbel. 2013. Evolutionary design of soft-bodied animats with decentralized control. *Artificial Life and Robotics* 18, 3-4 (2013), 152–160. <https://doi.org/10.1007/s10015-013-0121-1>
- [36] Tobias Kaiser. 2014. *Distributed Algorithms for Kilobots: Constructing a Global Coordinate System from Local Information*. Bachelor's {Thesis}. Institute for Pervasive Computing, ETH Zurich, Zurich.
- [37] Kar-Han Tan and M.A. Lewis. 1996. Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IROS '96, Vol. 1. IEEE, 132–139. <https://doi.org/10.1109/IROS.1996.570643>
- [38] Michel Kerszberg and Lewis Wolpert. 2007. Specifying Positional Information in the Embryo: Looking Beyond Morphogens. *Cell* 130, 2 (2007), 205–209. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.06.038>
- [39] Seungkeun Kim, Hyondong Oh, Jinyoung Suk, and Antonios Tsourdos. 2014. Coordinated trajectory planning for efficient communication relay using multiple UAVs. *Control Engineering Practice* 29, 19 (aug 2014), 42–49.
- [40] S. Kondo and T. Miura. 2010. Reaction-Diffusion Model as a Framework for Understanding Biological Pattern Formation. *Science* 329, 5999 (2010), 1616–1620.
- [41] George Konidaris, Tim Taylor, and John Hallam. 2007. *HydroGen: Automatically Generating Self-Assembly Code for Hydron*

- Units. In *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*, Rachid Alami, Raja Chatila, and Hajime Asama (Eds.). Springer Japan, Tokyo, 33–42.
- [43] Jahyoung Koo and Hojung Cha. 2011. Localizing WiFi access points using signal strength. *IEEE Communications Letters* 15, 2 (2011), 187–189.
- [44] Sanjeev Kumar and Peter Bentley. 2003. *On Growth, Form and Computers*. Elsevier, Amsterdam; Boston. 1–444 pages. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-428765-5.X5029-4>
- [45] Michael Levin. 2012. Morphogenetic fields in embryogenesis, regeneration, and cancer: Non-local control of complex patterning. *BioSystems* 109, 3 (2012), 243–261.
- [46] M. Anthony Lewis and Kar-Han Tan. 1997. High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures. *Autonomous Robots* 4, 4 (1997), 387–403.
- [47] Wenguo Liu and Alan F T Winfield. 2010. Autonomous Morphogenesis in Self-assembling Robots Using IR-Based Sensing and Local Communications. In *Swarm Intelligence*, David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M Kleinberg, Friedemann Mattern, John C Mitchell, Moni Naor, Oscar Nierstrasz, C Pandu Rangan, Bernhard Steffen, Madhu Sudan, Demetri Terzopoulos, Doug Tygar, Moshe Y Vardi, Gerhard Weikum, Marco Dorigo, Mauro Birattari, Gianni A Di Caro, René Doursat, Andries P Engelbrecht, Dario Floreano, Luca Maria Gambardella, Roderich Groß, Erol Ađahin, Hiroki Sayama, and Thomas Stützle (Eds.). Vol. 6234. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 107–118. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-15461-4>
- [48] Wenguo Liu and A. F. T. Winfield. 2012. Distributed autonomous morphogenesis in a self-assembling robotic system. In *Morphogenetic Engineering: Understanding Complex Systems*, René Doursat, Hiroki Sayama, and Olivier Michel (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Chapter 4, 89–113. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33902-8_4
- [49] Bruce J. MacLennan. 2014. Coordinating Massive Robot Swarms. *International Journal of Robotics Applications and Technologies* 2, 2 (2014), 1–19. <https://doi.org/10.4018/IJRAT.2014070101>
- [50] Marco Mamei, Matteo Vasirani, and Franco Zambonelli. 2004. Experiments of morphogenesis in swarms of simple mobile robots. *Applied Artificial Intelligence* 18, 9-10 (2004), 903–919.
- [51] Wei Meng, Zhirong He, Rodney Teo, Rong Su, Ahmad Reza Shehabinia, Liyong Lin, and Lihua Xie. 2014. Decentralized control of multi-uavs for target search, tasking and tracking. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 19, 3 (2014), 10048–10053
- [52] Yan Meng and Hongliang Guo. 2012. Evolving network motifs based morphogenetic approach for self-organizing robotic swarms. In *Proceedings of the fourteenth international conference on Genetic and evolutionary computation conference - GECCO '12*. ACM Press, 137. <https://doi.org/10.1145/2330163.2330183>
- [53] Yan Meng, Hongliang Guo, and Yaochu Jin. 2013. A morphogenetic approach to flexible and robust shape formation for swarm robotic systems. *Robotics and Autonomous Systems* 61, 1 (2013), 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2012.09.009>
- [54] Iñaki Navarro and Fernando Matia. 2013. A survey of collective movement of mobile robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10, 1 (2013), 73. <https://doi.org/10.5772/54600>
- [55] Nikhil Nigam. 2014. The Multiple Unmanned Air Vehicle Persistent Surveillance Problem: A Review. *Machines* 2, 1 (2014), 13–72. <https://doi.org/10.3390/machines2010013>
- [56] ALCR O'Grady and M Dorigo. 2008. Towards Adaptive Morphogenesis in Self-Assembling Robots. In *Iridia.Ulb.Ac.Be*. 1–4. <http://iridia.ulb.ac.be/>
- [57] Rehan O'Grady, A.L. Christensen, and Marco Dorigo. 2009. SWARMORPH: Multirobot Morphogenesis Using Directional Self-Assembly. *IEEE Transactions on Robotics* 25, 3 (jun 2009), 738–743. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.2012341>
- [58] Hyondong Oh and Yaochu Jin. 2014. Adaptive swarm robot region coverage using gene regulatory networks. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol. 8717 LNAI. 197–208. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10401-0_18
- [59] Hyondong Oh and Yaochu Jin. 2014. Evolving hierarchical gene regulatory networks for morphogenetic pattern formation of swarm robots. In *Proceedings of the 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2014*. IEEE, 776–783.
- [60] Hyondong Oh and Yaochu Jin. 2016. Evolving H-GRNs for Morphogenetic Adaptive Pattern Formation of Swarm Robots. In *Evolutionary Computation in Gene Regulatory Network Research*, Hitoshi Iba and Nasimul Noman (Eds.). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 327–361.
- [61] Hyondong Oh, Ataollah Ramezan Shirazi, Chaoli Sun, and Yaochu Jin. 2017. Bio-inspired selforganising multi-robot pattern formation: A review. *Robotics and Autonomous Systems* 91 (2017), 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.12.006>
- [62] Hyondong Oh, Ataollah R. Shiraz, and Yaochu Jin. 2016. Morphogen diffusion algorithms for tracking and herding using a swarm of kilobots. *Soft Computing* (2016), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2182-2>
- [63] Hyondong Oh, Dae Yeon Won, Sung Sik Huh, David Hyunchul Shim, Min Jea Tahk, and Antonios Tsourdos. 2011. Indoor UAV control using multi-camera visual feedback. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* 61, 1-4 (2011), 57–84. <https://doi.org/10.1007/s10846-010-9506-8>
- [64] Esben H Ostergaard, David J Christensen, Peter Eggenberger, Tim Taylor, Peter Ottery, and Henrik H Lund. 2005. HYDRA: From Cellular Biology to Shape-Changing Artefacts. In *Artificial Neural Networks: Biological Inspirations*, David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M Kleinberg, Friedemann Mattern, John C Mitchell, Moni Naor, Oscar Nierstrasz, C Pandu Rangan, Bernhard Steffen, Madhu Sudan, Demetri Terzopoulos, Dough Tygar, Moshe Y Vardi, Gerhard Weikum, Włodzisław Duch, Janusz Kacprzyk, Erkki Oja, and Sławomir Zadrony (Eds.). ICANN 2005, Vol. 3696. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 275–281.
- [65] Les Piegł and Wayne Tiller. 1996. *The NURBS Book* (2nd ed ed.). Monographs in visual communications, Vol. 28. Springer, Berlin ; New York. 665–666 pages. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(96\)86819-9](https://doi.org/10.1016/0010-4485(96)86819-9) arXiv:arXiv:1011.1669v3
- [66] Rethnaraj Rambabu, Muhammad Rijaluddin Bahiki, and Syaril Azrad Md Ali. 2015. Relative positionbased collision avoidance system for swarming UAVS using multi-sensor fusion. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences* 10, 21 (2015), 10012–10017.
- [67] Ataollah Ramezan Shirazi, Hyondong Oh, and Yaochu Jin. 2014. Morphogenetic self-organization of collective movement without directional sensing. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Michael Mistry, Aleš Leonardis, Mark Witkowski, and Chris Melhuish (Eds.). Vol. 8717 LNAI. Springer International Publishing, Cham, 139–150.
- [68] Hiroki Sayama. 2010. Robust morphogenesis of robotic swarms. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 5, 3 (2010), 43–49. <https://doi.org/10.1109/MCI.2010.937323>
- [69] D.P. Scharf, F.Y. Hadaegh, and S.R. Ploen. 2003. A survey of spacecraft formation flying guidance and control (part 1): guidance. In *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.*, Vol. 2. IEEE, 1733–1739.
- [70] Lisa Schramm and Bernhard Sendhoff. 2011. An Animat's Cell Doctrine. In *ECAL 2011: Proceedings of the Eleventh European Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, Tom Lenaerts, Mario Giacobini, Hugues Bersini, Paul Bourguine, Marco Dorigo, and René Doursat (Eds.). MIT Press, Cambridge, MA, 739–746.
- [71] Whye Leon Seng, Jan Carlo Barca, and Y. Ahmet Sekercioglu. 2013. Distributed formation control in cluttered environments. In *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Well-being, AIM 2013*. IEEE, 1387–1392. <https://doi.org/10.1109/AIM.2013.6584288>
- [72] Ilankaikone Senthoooran, Jan Carlo Barca, and Hoam Chung. 2017. A 3D line alignment method for loop closure and mutual localisation in limited resourced MAVs. In *2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2016*. IEEE, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2016.7838773>
- [73] Yaki Setty, Irun R. Cohen, and David Harel. 2012. Executable modeling of morphogenesis: A Turing-inspired approach. *Fundamenta Informaticae* 118, 4 (2012), 403–417. <https://doi.org/10.3233/FI-2012-722>
- [74] Pablo Ramon Soria, Andres Felipe Palomino, B.C. Arrue, and Anibal Ollero. 2017. Bluetooth network for micro-uavs for communication network and embedded range only localization. In *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, 747–752. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991464>

- [78] William M. Spears, Jerry C. Hamann, Paul M. Maxim, Thomas Kunkel, Rodney Heil, Dimitri Zarzhitsky, Diana F. Spears, and Christer Karlsson. 2007. Where Are You? In *swarm Robotics*, Erolahin, William M Spears, and Alan F T Winfield (Eds.). Vol. 4433. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 129–143. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71541-2_9
- [79] Finlay Stewart, Tim Taylor, and George Konidaris. 2005. META-Morph: Experimenting with Genetic Regulatory Networks for Artificial Development. In *Advances in Artificial Life*, David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M Kleinberg, Friedemann Mattern, John C Mitchell, Moni Naor, Oscar Nierstrasz, C Pandu Rangan, Bernhard Steffen, Madhu Sudan, Demetri Terzopoulos, Dough Tygar, Moshe Y Vardi, Gerhard Weikum, Mathieu S Cappare, Alex A Freitas, Peter J Bentley, Colin G Johnson, and Jon Timmis (Eds.). Vol. 3630. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 108–117
- [80] Klementyna Szwaykowska, Ira B. Schwartz, Luis Mier-Y-Teran Romero, Christoffer R. Heckman, Dan Mox, and M. Ani Hsieh. 2016. Collective motion patterns of swarms with delay coupling: Theory and experiment. *Physical Review E* 93, 3 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.032307> arXiv:1601.08134
- [81] Simon Tanaka. 2015. Simulation Frameworks for Morphogenetic Problems. *Computation* 3, 2 (2015), 197–221. <https://doi.org/10.3390/computation3020197>
- [82] Timothy Taylor. 2004. A Genetic Regulatory Network-Inspired Real-Time Controller for a Group of Underwater Robots. In *Proceedings of the Eighth Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-8)*.
- [83] Tim Taylor, Peter Ottery, and John Hallam. 2007. An approach to time-and space-differentiated pattern formation in multi-robot systems. *Proceedings of Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS 2007)* (2007), 160–167.
- [84] Tim Taylor, Peter Ottery, and John Hallam. 2007. Pattern formation for multi-robot applications: Robust, self-repairing systems inspired by genetic regulatory networks and cellular self-organisation Running title: Pattern formation for multi-robot applications. Technical Report EDI-INF-RR-0971. University of Edinburgh.
- [85] Pei-hsuan Tsai, Chun-lung Lin, Ching-yi Chen, and Jia-shung Wang. 2013. A Scalable Localization Scheme using Particle Swarm Approach for Sensor Networks. In *Int'l Conf. Sensor Technologies and Applications*. 21–26.
- [86] Alan M Turing. 1952. The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 237, 641 (1952), 37–72.
- [87] Atsushi Yamashita, Tamio Arai, Jun Ota, and Hajime Asama. 2003. Motion planning of multiple mobile robots for cooperative manipulation and transportation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19, 2 (2003), 223–237.
- [88] Daniel Yamins. 2005. Towards a Theory of “Local to Global” in Distributed Multi-Agent Systems (II). I (2005).
- [89] Bin Yang, Yongsheng Ding, Yaochu Jin, and Kuangrong Hao. 2015. Self-organized swarm robot for target search and trapping inspired by bacterial chemotaxis. *Robotics and Autonomous Systems* 72 (2015), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.05.001>
- [90] Kiwon Yeom and Ji Hyung Park. 2010. Artificial morphogenesis for arbitrary shape generation of swarms of multi agents. In *Proceedings 2010 IEEE 5th International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications, BIC-TA 2010*. IEEE, 509–513.
- [91] Shuang Yu and Jan Carlo Barca. 2015. Autonomous formation selection for ground moving multirobot systems. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Vol. 2015-Augus. IEEE, 54–59.
- [92] Mengfei Zhou, Jiang Lin, Shuo Liang, Wei Du, and Long Cheng. 2017. A UAV patrol system based on Bluetooth localization. In *2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*. IEEE, 205–209. <https://doi.org/10.1109/ACIRS.2017.7986094>

Escalonador multicritério para sistemas de mensagens militares em redes tolerantes a atrasos e desconexões

Guilherme C Sampaio¹, Gustavo C Sampaio¹, Ronaldo M Salles²

¹Centro Tecnológico do Exército
Av. das Américas, 28705. 23020-470
Rio de Janeiro, RJ

²Instituto Militar de Engenharia (IME)
Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 222290-290
nononno@ime.br

RESUMO: As redes militares possuem características como baixa largura de banda, alta mobilidade dos nós, alta latência e taxas de erros elevadas, cenário semelhante ao previsto em uma rede tolerante a atrasos e desconexões (DTN). Nos sistemas de Comando e Controle (C2) atuais, o escalonamento de mensagens é realizado com apenas a precedência da mensagem, de forma que mensagens com baixa precedência podem nunca ser entregues ao destinatário. O objetivo deste artigo é avaliar o emprego de escalonadores multicritérios para sistemas de mensagens militares em uma DTN, com o intuito de maximizar a probabilidade de entrega de mensagens. São propostos dois novos escalonadores de mensagens a serem utilizados em conjunto com os algoritmos de roteamento DTN, em substituição à abordagem de entrega direta de mensagens. Com esses escalonadores será possível a entrega de mensagens com baixa precedência em determinados cenários, mesmo que existam mensagens com precedência mais alta no sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Escalonador de Mensagens. DTN. Comando e Controle. Redes Militares.

ABSTRACT: MILITARY NETWORKS HAVE CHARACTERISTICS SUCH AS LOW Bandwidth, high node mobility, high latency and high error rates, a scenario similar to that predicted in a delay and disruption tolerant network (DTN). In current Command and Control (C2) systems, message scheduling is performed with only message precedence, so messages with low precedence can never be delivered to the recipient. The objective of this work is to evaluate the use of multicriteria schedulers for military message systems in a DTN, in order to maximize the probability of message delivery. Two new message schedulers are proposed to be used in conjunction with DTN routing algorithms to replace the direct message delivery approach. With these schedulers it will be possible to deliver messages with low precedence in certain scenarios, even though there are messages with higher precedence in the system.

KEYWORDS: Message Schedulers. DTN. Command and Control. Military Networks.

1. INTRODUÇÃO

O emprego de novas tecnologias no cenário de comunicações militares tem se intensificado nos últimos anos. A comunicação entre frações de uma tropa, antes restrita à transmissão de voz analógica, agora conta com transmissão digital, tanto para comunicação de dados como para comunicação de voz, formando, assim, redes de dados em ambiente operacional militar.

Em conformidade com essas novas tecnologias, as aplicações de comando e controle passam por um processo evolutivo onde novas ferramentas como transmissão de vídeo em tempo real, envio de informações geográficas e imageamento aéreo têm sido disponibilizadas para permitir uma melhor consciência situacional.

O protocolo IP, flexível e estável nas comunicações em redes de computadores, esbarra em problemas bem conhecidos quando utilizado em cenários de operações táticas: a alta mobilidade dos nós provoca frequentes desconexões [1], levando à indisponibilidade da rede, muitas vezes por períodos superiores a vários dias.

Além das frequentes desconexões, em [2] estes cenários são descritos como constituídos de rádios militares IP half-duplex funcionando na faixa de frequências de VHF, com baixa largura de banda. A dinâmica desses cenários sugere a utilização de redes MANET (mobile ad-hoc network), porém o Exército Brasileiro [2] não possui ainda equipamentos capazes de prover esse tipo de comunicação.

Com o intuito de permitir as comunicações de dados em cenários desprovidos de infraestrutura estável, foram de-

envolvidas as Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões (DTN), que possuem várias técnicas para permitir a integridade e entrega dos dados em ambientes inóspitos [3].

Em uma DTN são utilizados conceitos bem presentes nas redes MANET, como a mobilidade dos nós e a possibilidade de comunicação através de múltiplos saltos. A possibilidade de encaminhamento de mensagens através de múltiplos saltos aumenta a probabilidade de entrega das mensagens, algo que é fundamental em um ambiente operacional militar.

Neste ambiente, as mensagens a serem trafegadas possuem características distintas entre si, como o tempo de vida da mensagem (TTL), precedência da mensagem, que se dividem entre urgentíssima, urgente, preferencial e rotina, além do remetente e destinatário.

Tradicionalmente, as mensagens militares são escalonadas pelos sistemas de comando e controle, utilizando-se apenas o critério de precedência. Mensagens que possuem pouco tempo de vida e não tem precedência alta, serão preteridas no envio. Outra característica do modelo atual é que as mensagens são entregues diretamente ao destinatário. Se o remetente da mensagem não estabelecer conexão com o destinatário durante o período de validade da mensagem, ela nunca será entregue ao destinatário. Essa abordagem atual pode impactar no sucesso de uma operação militar.

Em virtude disso, faz-se necessário o estudo de outras técnicas de escalonamento, que levem em consideração as características distintas das mensagens no processo de tomada de decisão durante o envio da mesma, bem como o estudo das redes tolerantes a atrasos e desconexões e de

seus inúmeros algoritmos de roteamento, que permitem a passagem de custódia da mensagem para outro nó mais promissor na rede.

2. REDES TOLERANTES A ATRASOS E DESCONEXÕES

2.1 Histórico

Em 1998, VintCerf liderou um grupo de engenheiros e pesquisadores com um projeto de Internet interplanetária. Cerf trabalhava no laboratório de jatos propulsores (JPL) da agência espacial americana (NASA). Segundo [4], tal projeto tinha como principal objetivo conectar dois nós situados em planetas distintos presentes no nosso sistema solar. Cerf foi também co-projetista dos protocolos TCP/IP e da arquitetura da internet.

Em 2001 foi feita uma proposta de uma arquitetura para DTN[5]. Esta proposta fez com que os pesquisadores percebessem que os problemas encontrados neste desafio também estavam presentes em outros cenários de comunicações terrestres.

Um ano mais tarde, um grupo liderado novamente por Cerf disponibilizou um Internet Draft sobre a arquitetura DTN [6]. Nesse mesmo ano, Kevin Fall publicou um artigo sobre a arquitetura de redes desafiadoras e o Internet Research Task Force [7] criou o Delay-Tolerant Networking Research Group (DTNRG), um grupo de trabalho voltado exclusivamente para pesquisa em DTN.

Em 2003, Kevin Fall publicou o artigo intitulado Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets [8], um dos trabalhos mais importantes da área e que deu início, na comunidade científica, ao estudo das redes tolerantes a atrasos e desconexões (DTN).

2.2 Delay-Tolerant Network (DTN)

Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões ou Delay-Tolerant Network (DTN) são redes sem fio desprovidas de infraestrutura, onde uma camada de agregação é definida entre a camada de transporte e a camada de aplicação no modelo OSI, o que pode ser visto na Fig. 1.

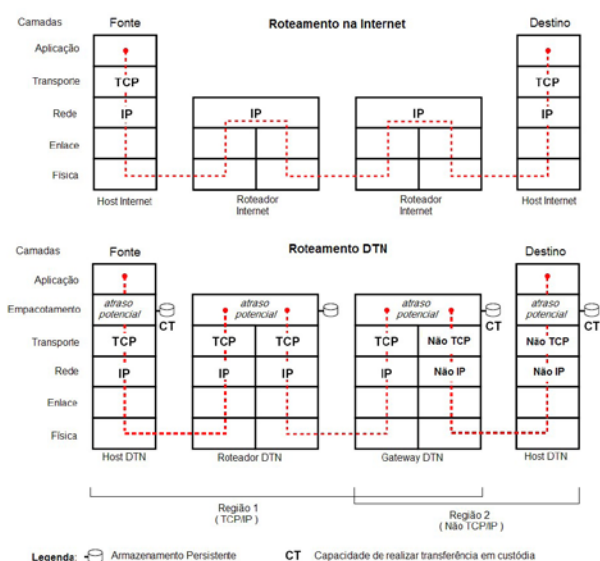


Fig. 1 – Roteamento na internet e Roteamento DTN. Fonte: [1]

Dentre os protocolos mais importantes na implantação de uma rede DTN, temos o bundle protocol. Tal protocolo im-

plementa o conceito de store and forward, onde os nós intermediários em uma comunicação têm a missão de encaminhar os pacotes ou armazenar em memória para posterior envio, quando não é possível transmitir essa informação para o próximo nó em determinado instante.

Uma rede DTN está inserida na classe das redes desafiadoras (Challenged Networks), que são redes onde a arquitetura TCP/IP, proposta para funcionar na internet, não pode ser adequadamente empregada. Essa classe de redes é prevista para operar em ambientes desafiadores, que podem ser exemplificados por nós operando com alta mobilidade em comunicação sem fio, nós operando em um campo de batalha, em ambientes com restrição de energia, etc.

- Segue abaixo algumas características dessas redes desafiadoras de acordo com [9]:
- Conectividade intermitente: dificuldade de estabelecer e/ou manter uma conexão entre o nó remetente e o nó destinatário. Essa intermitência na conexão pode ocorrer devido a vários fatores como interferências, regiões de sombra entre os nós, etc.
- Atrasos longos e/ou variáveis: quando o tempo de propagação de um pacote é considerado longo ou existe atrasos variáveis durante o processamento de um pacote. Isso prejudica as aplicações que dependem de um tempo de resposta específico para o correto funcionamento.

Alta taxa de erros: esses erros ocorrem principalmente por interferências presentes no canal de comunicação por onde trafegam os pacotes. Uma alta taxa de erros tem um impacto muito grande na rede, causando distorções nos dados trafegados, exigindo retransmissões e um gasto maior com processamento.

2.3 Algoritmos de Roteamento DTN

A escolha sobre como encaminhar e armazenar essas mensagens deu origem a vários algoritmos de roteamento, dentre os quais podemos destacar: Epidêmico, First Contact, Spray and Wait, MaxProp e Prophet. A seguir são apresentadas as características desses algoritmos.

2.3.1 Epidêmico

O algoritmo DTN epidêmico é muito utilizado na literatura por ser um protocolo bem simples. Tal algoritmo visa disseminar a mensagem para o maior número de nós presentes na rede até que ela chegue ao destinatário. Tal abordagem em muito se assemelha à disseminação de uma epidemia e foi amplamente estudada por [3].

Esse algoritmo funciona da seguinte forma: um nó responsável por entregar a mensagem e que não possui conectividade com o nó destinatário, encaminha esta mensagem para o maior número de nós possíveis, sempre que fizer contato com um nó na rede. Esse processo é repetido até que a mensagem chegue ao nó destinatário ou o tempo de vida da mensagem (TTL) se esgote.

Tal algoritmo, apesar de simples, pode causar um grande congestionamento na rede, uma vez que a mensagem poderá ser encaminhada para todos os nós. De acordo com [10], o excesso de tráfego na rede, ao utilizar o algoritmo epidêmico, tem sido uma das principais áreas de pesquisa em DTN.

Neste artigo foi realizada uma modificação no algoritmo, epidêmico implementado no simulador The ONE, de forma

a impedir que um determinado nó continue a disseminar uma mensagem caso ele consiga entregar a mensagem ao nó destinatário. Na versão original do algoritmo a disseminação continuava mesmo depois de entregar a mensagem ao destinatário final, finalizando apenas com a expiração da mensagem. Com a modificação, ao entregar a mensagem ao destinatário final, o nó que enviou a mensagem não manteve mais uma cópia desta mensagem no buffer. A abordagem original só se mostra interessante se o objetivo for de enviar uma mensagem para todos os nós na rede, ou seja, de forma broadcast.

2.3.2 FirstContact

O algoritmo FirstContact é um dos poucos protocolos de roteamento, em uma rede DTN, que não é baseado em inundação. Tal algoritmo não mantém cópias de uma mensagem armazenada em seu buffer, sendo caracterizado como um algoritmo de encaminhamento. Ao passar a custódia de uma mensagem para outro nó na rede, a mensagem é apagada de seu buffer, sendo o nó que acabou de receber a mensagem o único responsável por entregá-la.

O algoritmo funciona da seguinte forma: na primeira fase é escolhida uma mensagem do seu buffer para ser transmitida. Originalmente, tal escolha é feita de forma aleatória ou utilizando o algoritmo FIFO, onde a primeira mensagem que chega é a primeira a sair. Nesse artigo, foram implementadas várias formas de escalonamento das mensagens no buffer, com o objetivo de aumentar a probabilidade de entrega. Após a escolha da mensagem, é verificado se o nó de destino daquela mensagem está conectado a este nó. Caso positivo, a mensagem é transmitida e apagada do buffer. Caso contrário, o algoritmo passa para a segunda fase.

Na segunda fase, é verificado se existe conexão com outros nós na rede. Caso positivo, a custódia daquela mensagem é passada para um dos nós conectados, e agora ele será o único detentor daquela mensagem e responsável por entregá-la ao destinatário.

Como ponto positivo, esse algoritmo contribui para diminuir a probabilidade de congestionamento da rede. Tal congestionamento só se configura se houver um número muito grande de mensagens a serem trafegadas e as conexões existentes não forem capazes de dar vazão a todas as mensagens até que elas sejam entregues ao destinatário.

Como ponto negativo, por não existirem cópias da mensagem na rede, se um nó que possui uma ou mais mensagens não conseguir estabelecer conexão com outro nó, tais mensagens nunca chegarão ao destino. Alguns protocolos de roteamento como o Spray AndWait implementam um roteamento epidêmico controlado, visando disseminar mais de uma cópia da mensagem na rede, sem o intuito de causar um congestionamento.

2.3.3 Direct Delivery

O algoritmo Direct Delivery é um protocolo de roteamento que não se utiliza dos conceitos de uma DTN. Neste protocolo, não existe a passagem de custódia de uma mensagem para um nó intermediário. Todas as transmissões são realizadas diretamente para o nó de destino.

Esse roteamento é muito importante para este trabalho, pois ele funciona exatamente como previsto nas comunicações militares, com entrega direta de uma mensagem. Du-

rante as simulações este protocolo será comparado com os demais protocolos de roteamento DTN, com o objetivo de comprovar os benefícios de se implantar uma DTN em um ambiente operacional tático.

2.3.4 Spray andWait

O algoritmo Spray andWait foi proposto por [11]. De acordo com [12], este algoritmo procura obter os mesmos benefícios da taxa de entrega dos algoritmos baseados em replicação ou inundação, bem como utilizar poucos recursos computacionais, semelhante aos algoritmos baseados em encaminhamento.

Esse algoritmo possui duas fases bem definidas. Na primeira fase é definido como L o número máximo de cópias que uma mensagem pode ter na rede. O nó remetente envia, então, essa mensagem para L nós intermediários. Na segunda fase esses nós intermediários aguardam uma comunicação direta com o nó destinatário para, assim, entregar a mensagem. Tal algoritmo visa controlar a inundação da mensagem na rede, o que é muito presente no algoritmo epidêmico.

Existem duas variações principais deste algoritmo: vanilla e binária [13]. Na vanilla, o nó origem encaminha uma cópia da mensagem para L-1 nós e, em seguida, estes nós entram na segunda fase, a espera, até que encontrem o nó destinatário e entreguem a mensagem. Já na versão binária, o nó origem encaminha metade das mensagens para o primeiro nó que se comunicar, ficando com a outra metade armazenada em buffer. Em seguida, esses dois nós encaminham a metade de suas mensagens para os próximos nós que se comunicarem. Esse processo é repetido até que cada nó contenha apenas uma mensagem. Neste momento, o algoritmo entra em sua fase 2, onde o nó aguarda um possível contato com o nó destinatário para entregar a mensagem.

Desta forma, o protocolo Spray AndWait é considerado um roteamento com inundação controlada, pois existe um número finito de cópias das mensagens, diferente do que ocorre com o Epidêmico.

2.3.5 Maxprop

O algoritmo Maxprop foi proposto por [14] em 2006 e é baseado em inundação da rede. Ao estabelecer conexão com um nó, as mensagens que não estão presentes no outro nó terão a chance de serem copiadas, caso esse novo nó esteja na estimativa do menor caminho para a entrega dessa mensagem. A forma como é realizado esse cálculo é explicada a seguir.

A inteligência do algoritmo reside em estabelecer prioridades para as mensagens presentes no buffer, tanto na escolha de qual mensagem deve ser transmitida primeiro, quanto na escolha de qual mensagem deve ser descartada primeiro. O protocolo mantém uma fila de mensagens ordenadas de acordo com a probabilidade estimada do menor caminho para entregar a mensagem ao destinatário.

No início, cada nó possui um vetor com n-1 posições, onde n é o número de nós na rede. Cada posição desse vetor guarda a probabilidade desse nó encontrar um outro nó. A Eq. 1 representa essa probabilidade.

$$p = \frac{1}{|n|-1} \quad (1)$$

Desta forma, no início todos os nós possuem a mesma probabilidade de encontrar outro nó. Assim que um nó estabelece conexão com outro, a posição no vetor referente à probabilidade desse encontro é adicionada de 1, e, em seguida, todos os valores são normalizados. Durante a conexão, esses nós também trocam seus vetores, de forma que, na situação ideal, cada nó possui um vetor de probabilidades atualizado de cada nó na rede.

De posse dos vetores de probabilidades, antes de enviar uma mensagem, é possível calcular o menor caminho para entrega da mensagem ao destinatário. Essa mensagem é então enviada para o próximo nó contido no menor caminho estimado.

2.3.6 Prophet

Prophet, Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity é um protocolo de roteamento que se utiliza do histórico de encontros entre os nós para a tomada de decisão. Esse algoritmo estuda as conexões passadas entre os nós para estimar qual nó intermediário tem maior probabilidade de entregar a mensagem ao nó de destino no futuro. Esse algoritmo se baseia no fato de que os encontros entre os nós no mundo real não é algo aleatório.

Esse algoritmo utiliza o conceito de vizinhança, assumindo que determinado nó tem uma probabilidade maior de entregar a mensagem ao destinatário que outros, pois encontros passados entre esses nós voltarão a ocorrer em um futuro próximo.

Um algoritmo adaptativo calcula a previsibilidade de entrega de cada nó. Um nó A armazena a previsibilidade de entrega de cada nó na rede, representado por $P(A,B)$, onde B é o outro nó na rede. Inicialmente essa previsibilidade é igual a zero.

Assim que um encontro ocorre, a previsibilidade é atualizada de acordo com a Eq.2:

$$P(A,B)_{new} = P(A,B)_{old} + (1 - P(A,B)_{old}) \times \kappa \quad (2)$$

Na Eq. 2, κ é uma constante de inicialização, utilizada no cálculo de previsibilidade de contato direto, sendo por padrão igual a 0,75.

Da mesma forma, as previsibilidades dos demais nós que não se conectaram com o nó A são envelhecidas de acordo com a Eq.3:

$$P(A,C)_{new} = P(A,C)_{old} \times v_x \quad (3)$$

Na Eq.3, é uma constante de envelhecimento utilizada para diminuir o valor de previsibilidade de uma rota ao longo do tempo e é a quantidade de tempo que se passou desde o último encontro.

As previsibilidades são trocadas entre A e B e a propriedade transitiva de previsibilidade é usada para atualizar a previsibilidade dos destinos C para os quais B tem um valor de $P(B,C)$, na suposição de que A provavelmente encontrará B novamente. Isso pode ser visto na Eq.4:

Na Eq.4, é um fator de escala para a transitividade da previsibilidade, sendo recomendado o valor de 0,25.

3. ESCALONADOR TRADICIONAL

3.1 Introdução

De acordo com [17], os Sistemas de Comando e Controle (SC2) utilizam apenas um critério, a precedência, para a classificação do valor do conteúdo das mensagens que trafegam nos sistemas estratégicos e táticos.

A precedência é escolhida pelo remetente da mensagem, que estabelece o nível de prioridade que a mensagem deve ter de acordo com a urgência necessária à entrega da mesma. Uma mensagem com maior precedência sobre outra significa que apresenta uma relevância maior para o cenário de operações. Com as precedências estabelecidas, o escalonador de mensagens irá priorizar as mensagens que possuírem maior precedência.

Segundo [17], nas Forças Armadas Brasileiras são empregados 4 níveis de precedência, a saber:

- Urgentíssima: tem precedência sobre todas as demais, interrompendo o processamento e transmissão de outras mensagens;
- Urgente: tem precedência sobre as demais de precedência mais baixa;
- Preferencial ou Prioridade: tem precedência mais alta que se pode dar às mensagens administrativas;
- Rotina: inclui todas as mensagens que a importância não justifique precedência mais elevada.

Embora seja possível definir um tempo de vida para cada mensagem de acordo com o tempo máximo que ela deve ser entregue ao destinatário após a sua criação, [18] apresenta um prazo de validade para cada mensagem de acordo com sua precedência. As mensagens com precedência urgentíssima devem ser entregues em um prazo de até 10 minutos após a sua criação. Já as mensagens urgentes admitem um atraso de até 60 minutos em sua entrega. As mensagens com prioridade devem ser entregues em até 6 horas. Por fim, admite-se a entrega das mensagens de rotina em até 24 horas. Esses valores são empregados pela OTAN, pelas Forças Armadas Americanas e estão presentes também nos estudos científicos sobre redes militares.

3.2 Funcionamento do Algoritmo

O escalonador tradicional implementa 4 filas de prioridades, uma para cada nível de precedência existente. Assim que uma mensagem chega ao sistema, é verificado o seu nível de precedência e, então, ela é armazenada na fila correspondente. As mensagens são armazenadas na fila de acordo com a ordem de chegada, utilizando o algoritmo (FIFO, First In First Out), ou seja, a primeira mensagem a chegar também é a primeira a sair.

Assim que o sistema estabelece uma conexão de dados com outro nó na rede, é verificado na fila de mais alta precedência se existe uma mensagem para ser enviada. Caso positivo, a primeira mensagem da fila é selecionada para envio. Caso negativo, o escalonador procura na próxima fila, neste caso, a fila de mensagens urgentes. Esse processo é realizado toda vez que o canal de comunicações estiver disponível para enviar uma mensagem.

O algoritmo de escalonamento tradicional possui também uma regra de preempção. Quando uma nova mensagem chega ao sistema e o canal de transmissão está ocupado enviando uma mensagem de precedência menor que a nova mensagem, a transmissão dessa mensagem é interrompida e o canal de comunicações é disponibilizado para o envio da nova mensagem com mais alta precedência. A Fig. 2 apresenta um diagrama do escalonador tradicional.

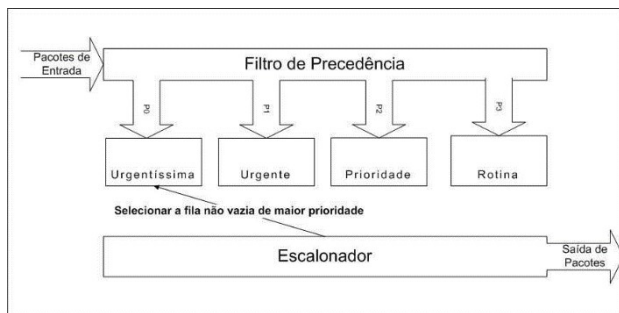


Fig. 2 – Escalonador Tradicional.

O Escalonador Tradicional não possui técnicas de gerenciamento de buffer. Assim que uma das filas de precedência atinge sua lotação máxima, a chegada de uma nova mensagem com a mesma precedência é tratada com o rejeite da mesma.

Segundo [17], alguns escalonadores já foram sugeridos com a finalidade de melhorar o atendimento das mensagens em uma rede baseada em precedência, mas nestes algoritmos é mantido o conceito das mensagens de maior precedência usurparem os recursos de comunicação existentes.

3.3 Problemas

O Escalonador Tradicional apresenta muitos problemas que o tornam ineficiente, de acordo com [19]. Tal escalonador pode apresentar muito atraso e até perda das mensagens que possuem precedência baixa, como as mensagens de rotina ou prioridade.

Em uma operação militar, se o fluxo de mensagens for superior à capacidade do canal [20], ocorrerá um congestionamento na fila de mensagens com prioridade baixa.

Apesar de não ter prioridade alta, uma mensagem com precedência de rotina ou prioridade pode conter informações relevantes para o sucesso de uma operação militar. A não entrega das mesmas pode ter um impacto relevante para as aplicações de C2 e, consequentemente, para a operação militar.

A falta de uma política de gerenciamento de buffer também é um ponto negativo do Escalonador Tradicional. Quando uma fila de precedência atinge seu limite, as novas mensagens com a mesma precedência são descartadas. O descarte excessivo de novas mensagens no sistema pode impactar o funcionamento das aplicações de Comando e Controle (C2).

Outro ponto negativo é a preempção de mensagens. Ao chegar uma nova mensagem no sistema, se uma mensagem com prioridade mais baixa está sendo transmitida no momento, essa transmissão é abortada e a nova mensagem tem sua transmissão priorizada. Tal técnica é muito prejudicial para o sistema. Todo o tempo gasto na seleção de uma mensagem, estabelecimento da conexão e transmissão é desperdiçado. Todo esse processo ocasiona também gastos desnecessários de energia, algo que é muito crítico no campo de batalha, mesmo se referindo a rádios veiculares, onde o gasto excessivo de energia impactará na autonomia da viatura militar.

O Escalonador Tradicional também não possui regras para tratar as mensagens que estão há muito tempo no buffer e cujos tempos de vida estão perto de expirar. Como exemplo, uma mensagem nível prioridade sempre terá precedência sobre uma mensagem rotina, mesmo que a mensagem de rotina tenha apenas 1 hora até a sua expiração e a mensagem prioridade tenha acabado de ser criada com 6 horas de vida. Um algoritmo de escalonamento de mensagens militares pre-

cisa levar em consideração o tempo de vida das mesmas, pois o tempo é algo preponderante para o sucesso de uma operação militar.

4. ESCALONADORES MULTICRITÉRIO

As mensagens militares são muito importantes para o sucesso de uma operação. O problema ocorre quando a disponibilidade do canal não é capaz de dar vazão ao alto fluxo de mensagens geradas pelas aplicações de comando e controle (C2). Em um ambiente operacional militar, o congestionamento de mensagens é muito frequente [20].

Com isso, faz-se necessário o estudo de técnicas de escalonamento de mensagens na fila de transmissão com o intuito de maximizar a probabilidade de entrega das mensagens, permitindo, inclusive, que mensagens de baixa prioridade tenham chances de serem entregues ao destinatário. No estudo de novos escalonadores de mensagens militares, faz-se necessário o emprego de novos critérios para a classificação eficiente das mensagens. Com esses critérios, será realizado o cálculo da Prioridade Final (PF) das mensagens de acordo com as regras do escalonador proposto.

Segundo [17], novos escalonadores de mensagens em ambiente operacional militar devem seguir o conceito da M-QoS (QoS militar), onde os fluxos de mensagens de menor prioridade devem ter seus níveis degradados ao invés de serem totalmente cortados pelo sistema. Com isso, mesmo que haja mensagens com prioridade alta no sistema, as mensagens de baixa prioridade devem ter chances de serem entregues, permitindo, assim, uma coexistência mais justa.

Nesses novos escalonadores é importante que exista uma política eficiente de gerenciamento de buffer, o que não existe na abordagem tradicional. Quando uma nova mensagem chega ao sistema e o buffer está cheio, essa mensagem é, então, descartada pelo escalonador tradicional. Esta nova política de escalonamento se propõe a avaliar a PF da mensagem nova e das mensagens armazenadas, descartando a mensagem com menor PF, que é a mensagem de menor relevância para o sistema.

Outra política importante no uso de novos escalonadores é a extinção do uso de preempção de mensagens.

4.1 Ordenação Multicritério

Vários métodos de decisão multicritério estão disponíveis na literatura. Este trabalho selecionou os métodos de ordenação lexicográfica [21] e função valor [22], os mesmos utilizados por [17] no estudo de escalonadores de mensagens militares em canais HF.

4.1.1 Ordenação Lexicográfica

O método de ordenação lexicográfica na matemática é a forma com que é ordenado o produto cartesiano de dois conjuntos A e B. A ordenação lexicográfica do produto cartesiano A X B é definida por:

- Se (a_1, b_1) e (a_2, b_2) pertencem a A X B, então $(a_1, b_1) < (a_2, b_2)$ se e somente se:
 - $a_1 < a_2$, ou
 - $a_1 = a_2$ e $b_1 < b_2$

Aplicando o mesmo método para dois conjuntos de n elementos cada, $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ e $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, $A < B$ se e somente se o primeiro elemento a_i for menor que b_i , para i variando de 1 a n.

Com a ordenação lexicográfica no escalonador multicritério, cada elemento a_i será associado a um critério estabelecido para uma mensagem militar.

4.1.2 Método Função Valor

O método da função valor foi proposto inicialmente por [22], onde o objetivo é fornecer uma fórmula matemática da função valor no qual $U: R_k \rightarrow R$ que represente sua preferência. Logo o problema da função valor é maximizar $U()$.

Para calcular a PF de uma mensagem, foi escolhida a função valor barreira, que é um método de penalidade muito utilizado para resolver problemas de desigualdade. Assim como em [17], foi escolhido a função barreira inversa para este trabalho, definida por:

$$x \in \mathbb{R}^n \rightarrow f(x) = \frac{k}{g(x)} \quad (5)$$

Essa função será aplicada com os critérios selecionados para obter o valor da PF de uma mensagem.

4.2 Critérios

Com o objetivo de calcular a prioridade final (PF) de uma mensagem, foram selecionados dois critérios: tempo de vida (T_i) e precedência da mensagem (P_i).

Seguindo a mesma abordagem de [17], o tempo de vida ou validade de uma mensagem foi selecionado como critério de valor militar de uma mensagem. Tal critério terá prioridade sobre o critério precedência, visto que o objetivo deste trabalho é minimizar a perda de mensagens, sendo o tempo o fator primordial.

O tempo de vida de uma mensagem será o definido por [18], por se tratar do mesmo tempo utilizado pela OTAN e pelas Forças Armadas Americanas.

4.3 Escalonador Lexicográfico

O primeiro escalonador proposto é o escalonador lexicográfico. Este escalonador ordenará o buffer de acordo com a PF de cada mensagem. A mensagem que obtiver a maior PF terá seu envio priorizado.

A PF de uma mensagem é calculada, realizando a ordenação lexicográfica para cada critério. A ordem dos critérios foi escolhida de acordo com sua importância no objetivo de maximizar a entrega das mensagens e pode ser vista abaixo:

- Tempo de vida da mensagem - (T_i);
- Precedência da mensagem - (P_i).

Primeiramente é escolhido o critério de tempo de vida de uma mensagem (T_i). As mensagens presentes no buffer são, então, ordenadas com prioridade para a que possuir menor tempo de vida (T_i). Após isso é escolhido o critério de precedência (P_i) como desempate para as mensagens que possuem o mesmo tempo de vida. Neste caso, quando uma mensagem i possui o mesmo tempo de vida de uma mensagem j , é comparada a precedência entre elas e a mensagem com maior precedência tem prioridade no buffer.

4.4 Escalonador Barreira

O segundo escalonador proposto é o escalonador barreira. Este escalonador também irá ordenar o buffer de acordo com a PF de cada mensagem, onde a maior PF será prioriza-

da no buffer.

A função foi definida como sendo o tempo de vida (T_i) de uma mensagem M , conforme apresentado na Eq. 6:

$$g(M_i) = T_i \quad (6)$$

A constante para uma mensagem i foi definida como sendo a precedência da mensagem (P_i), conforme apresentado na Eq. 7:

$$k = P_i \quad (7)$$

Logo, a prioridade final (PF) de uma mensagem i () é definida pela Eq. 8:

$$PF(M_i) = \frac{P_i}{T_i} \quad (8)$$

Com isso, a prioridade final (PF) cresce conforme a mensagem estiver perto de expirar e esse crescimento é mais acentuado para as mensagens que possuem maior precedência.

5. SIMULAÇÃO

O objetivo do presente trabalho é o estudo e análise de técnicas multicritério no escalonamento de mensagens em redes tolerantes a atrasos e desconexões e sua comparação com a abordagem atual.

Para isso, as estratégias a serem avaliadas são:

- uso do escalonador tradicional;
- uso do escalonador lexicográfico;
- uso do escalonador barreiras.

Foi avaliado o desempenho dos escalonadores de acordo com os seguintes aspectos:

- probabilidade total de mensagens entregues;
- probabilidade de mensagens entregues por nível de prioridade.

Foi avaliada a influência do alcance do enlace de comunicação. Foi analisado também em quais situações cada escalonador é mais indicado, assim como os benefícios de se implantar uma DTN em um ambiente operacional tático com passagem de custódia de mensagens frente à abordagem atual de entrega direta de mensagens. Para isso, será determinado o melhor algoritmo DTN para cada situação.

5.1 Ambiente de Simulação

Para a simulação dos escalonadores propostos e do escalonador tradicional em uma rede tolerante a atrasos e desconexões (DTN), foi escolhido o simulador The ONE.

O simulador The ONE foi desenvolvido com o apoio do Centro de Pesquisas da Nokia na Finlândia e teve sua primeira release em 2007. Atualmente o simulador encontra-se na versão 1.6.0 de 2015 e seu código encontra-se disponível em um repositório público no GitHub, onde é possível se tornar um colaborador do projeto desenvolvendo novas funcionalidades.

Para este trabalho foi escolhida a versão 1.5.1-RC2, uma versão anterior à atual versão e que apresenta mais estabilidade, assim como uma variedade maior de algoritmos de roteamento para simulação.

O The ONE permite o desenvolvimento e simulação de algoritmos DTN em linguagem de programação Java.

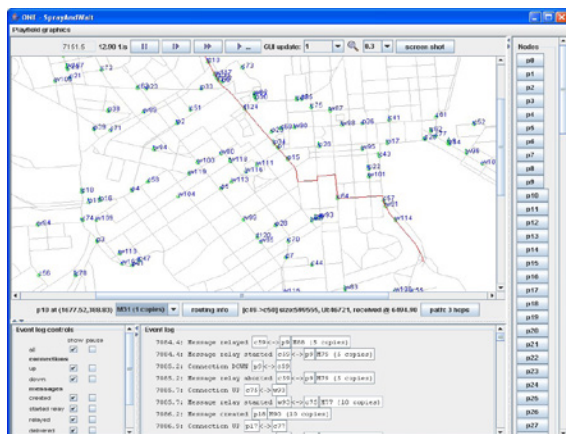


Fig. 3 – The ONE Simulator: ambiente gráfico.

5.2 Variáveis, algoritmos e configurações

Para a montagem dos cenários a serem simulados, serão detalhados a seguir as variáveis, os algoritmos e as configurações a serem utilizados com seus respectivos valores.

5.2.1 Algoritmo de Mobilidade

Para a mobilidade dos nós na rede foi utilizado o algoritmo de mobilidade Shortest Path Map Based Movement. Foi gerado uma carta vetorial da cidade do Rio de Janeiro com dimensões de 30km x 30km para ser utilizada no deslocamento das 9 viaturas do Pelotão de Cavalaria Mecanizado (Pel C Mec).

5.2.2 Infraestrutura de Comunicações

Foram implementadas no simulador as 3 redes de comunicação de dados do Pel C Mec, descritas em [23]. Cada rede é composta por um número específico de nós e as mensagens são trocadas dentro dessas redes. Os nós que participam de mais de uma rede podem funcionar como uma ponte na troca de mensagens entre uma rede e outra.

5.2.3 Escalonadores

Serão utilizados o escalonador tradicional das Forças Armadas Brasileiras e os escalonadores propostos neste trabalho, o Lexicográfico e o Barreira.

5.2.4 Protocolos de Roteamento

Para a simulação foram utilizados os 6 protocolos de roteamento explicados na Seção 2.3. De posse desses 6 protocolos de roteamento, foi realizada a implementação no simulador The ONE dos escalonadores tradicional, lexicográfico e barreira, dando origem a um total de 18 protocolos de roteamento que foram utilizados nas simulações.

5.2.5 Taxa de Transmissão

A taxa de transmissão foi baseada em uma das formas de onda em desenvolvimento no Projeto RDS-Defesa, que tem o objetivo de equipar as Forças Armadas Brasileiras com uma família de Rádios Definidos por Software. Foi utilizada

a forma de onda com taxa de transmissão de 16kbps.

5.2.6 Mensagens

Foi utilizado o software C2 em Combate do Exército Brasileiro para medição do tamanho das mensagens a serem trafegadas na rede. O software permite o envio de mensagens com até 5000 caracteres e anexos de até 30MB. As mensagens sem anexo variam entre 300 bytes a 1500 bytes. Como neste trabalho a taxa de transmissão é baixa, as mensagens sem anexo foram as escolhidas para esta simulação. Será implementado no simulador um algoritmo aleatório de forma a criar as mensagens com tamanhos que variam entre 300 bytes a 1500 bytes.

O intervalo de criação das mensagens foi definido no simulador como 1 mensagem nova a cada 5 segundos. Como são 9 nós na rede, em média cada nó recebe uma mensagem a cada 45 segundos. Durante a criação das mensagens, um algoritmo aleatório determina a precedência da mensagem entre os valores rotina, preferencial, urgente e urgentíssima.

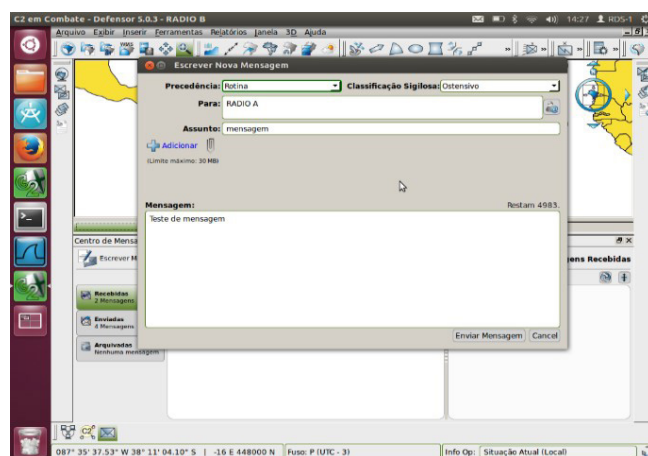


Fig. 4 – C2 em Combate: módulo de mensagens.

5.2.7 Duração da Operação

Como configuração do tempo de simulação, as operações tinham a duração de 2 dias. Esse tempo foi escolhido baseado no tempo de vida das mensagens. Como a mensagem com precedência de rotina tem a maior duração de 24 horas e é desejável, na simulação, que todas as mensagens tenham chances de expirar antes da entrega, a duração da simulação tem que ser maior que 24 horas. Logo, foi utilizado o valor de 2 dias de simulação.

5.2.8 Alcance do Rádio

O alcance do rádio foi variável e teve os seguintes valores: 500 metros, 1km, 2km, 5km e 8km.

O modelo de propagação do sinal eletromagnético levou em conta os efeitos de desvanecimento plano e lento. Isso foi considerado suficiente para a inserção do efeito do aumento da distância entre terminais sobre os enlaces.

O efeito do multipercursos não foi levado em consideração, devido às curtas distâncias envolvidas entre os nós, à largura de banda dos rádios considerados e ao fato de que se pode assumir que os esquemas de equalização, entrelaçamento e correção de erro poderão resolver os efeitos advindos de tal fenômeno.

5.3 Cenário de Simulação

O objetivo deste cenário foi avaliar os escalonadores

com os diversos algoritmos de roteamento DTN verificando a influência da variação do alcance na probabilidade de entrega de mensagens.

Tab1: Cenário de simulação

Parâmetros	Valores
Escalonadores	Tradicional, Lexicográfico e Barreira
Duração	2 dias
Buffer	300 KB
Tamanho da mensagem	300 Bytes a 1500 Bytes
Taxa de transmissão	16 kbps
Alcance	500m, 1km, 2km, 5km e 8km

O intervalo de confiança da simulação ficou em torno de 1% para os parâmetros avaliados com probabilidade entre 95% a 99%. Para atingir esse intervalo de confiança, foi necessário executar 1000 simulações no cenário proposto.

6. RESULTADOS

6.1 Probabilidade Total de Mensagens Entregues

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos nas simulações para o critério probabilidade total de mensagens entregues na rede.

O protocolo de roteamento MaxProp apresentou desempenho superior aos demais protocolos em todos os alcances simulados. Os escalonadores lexicográfico e barreira apresentaram resultados muito semelhantes no roteamento MaxProp. Esse mesmo protocolo no escalonador tradicional apresentou um desempenho quase 10% inferior aos escalonadores propostos para os alcances de 1km e 2km, conforme pode ser visto na Tabela 2. Já nos extremos do gráfico, tanto no alcance mínimo de 500 metros, quanto no alcance máximo de 8km, todos os escalonadores para o MaxProp apresentaram resultados bem próximos.

Essa proximidade dos resultados no alcance de 500 metros pode ser explicada pelo efeito que o alcance do rádio tem na probabilidade de entrega das mensagens. Com um alcance baixo de 500 metros, as estratégias de priorização de mensagens pelos escalonadores não foram suficientes o bastante para garantir a entrega das mensagens que possuíam uma precedência maior e tempo de vida baixos. Esses resultados se repetiram para quase todos os protocolos de roteamento, com exceção do SprayAndWait. Neste protocolo foi criadas 6 cópias para cada mensagem e, durante uma comunicação, metade das cópias foram transferidas para o outro nó. Como o SprayAndWait Tradicional não apresenta uma política eficiente de descarte de buffer, quando o buffer está próximo de encher, não é possível transferir todas essas cópias das mensagens e, com isso, a transferência é rejeitada integralmente.

Tab2: Probabilidade total de mensagens entregues

Probabilidade total de mensagens entregues (%)					
Algoritmos/alcance		500m	1km	2km	5km
FirstContact Lexicográfico Barreira	Tradicional	14,59	30,80	47,19	81,30
		17,39	37,07	56,10	83,08
		17,35	36,55	56,05	83,69
SprayAndWait Lexicográfico Barreira	Tradicional	4,86	9,56	16,31	26,48
		15,92	31,24	46,71	65,25
		10,05	24,52	39,61	51,69
Epidemic Lexicográfico Barreira	Tradicional	13,70	26,42	40,92	42,51
		16,99	35,09	53,59	68,54
		16,22	33,06	50,54	58,01
MaxProp Lexicográfico Barreira	Tradicional	15,12	32,74	58,53	95,10
		17,89	40,32	68,11	95,93
		17,74	39,68	67,86	95,97
Prophet Lexicográfico Barreira	Tradicional	13,80	26,84	42,86	48,89
		17,52	35,65	52,02	62,01
		16,12	30,22	44,46	46,04
Direct Delivery Lexicográfico Barreira	Tradicional	13,03	24,39	32,68	38,68
		16,64	32,51	42,83	51,42
		15,59	24,55	30,88	39,09

Já para o alcance de 8km, as probabilidades de entrega são bem distintas entre os algoritmos utilizados. Com um alcance de 8km, o MaxPropLexicográfico apresentou uma probabilidade de entrega de 98,19%, resultado bem superior aos 39,36% de entrega do algoritmo DirectDelivery Tradicional, que é o utilizado nos rádios militares das Forças Armadas Brasileiras. Somente com a implantação do escalonador lexicográfico no roteamento DirectDelivery já se eleva a probabilidade de entrega para 53,77%, conforme pode ser visto na Tabela 2 e na Fig. 5.

Os protocolos MaxProp e FirstContact foram os únicos algoritmos DTN que conseguiram uma taxa de entrega superior a 90% com alcance de 8km. Com exceção do DirectDelivery, o FirstContact é o único protocolo que não é baseado em inundação. Para as simulações foi verificado que a maioria dos algoritmos teve o buffer cheio com quase 11 horas de simulação. No caso do FirstContact, o buffer ficou abaixo de 12% de ocupação com o referido alcance. Essa folga no buffer e alcance alto permitiram uma boa vazão na entrega das mensagens na rede. Já o MaxProp, com sua estratégia de estimar o menor caminho para entrega de uma mensagem, conseguiu a melhor probabilidade de entrega da simulação e seu buffer chegou a 53% de ocupação no escalonador lexicográfico.

O escalonador lexicográfico foi superior em praticamente todos os algoritmos, seguido pelo escalonador barreira. A abordagem tradicional só foi superior com o alcance de 8km no roteamento FirstContact, porém a diferença para os demais escalonadores foi menor que 1%. Nas demais situações a abordagem tradicional foi muito inferior aos escalonadores propostos, chegando ao caso de mais de 45% de diferença na probabilidade de entrega de mensagens, comparando com a abordagem lexicográfica no protocolo SprayAndWait com o alcance de 8km.

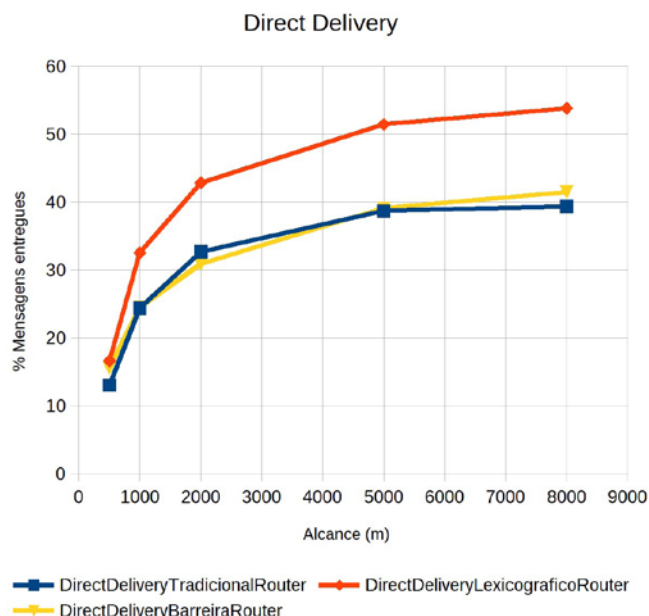


Fig. 5 – Algoritmo Direct Delivery.

6.2 Probabilidade Total de Mensagens Entregues por Nível de Precedência

6.2.1 Mensagens de Rotina

Da análise das entregas de mensagens com nível de precedência rotina na Tabela 3, é possível concluir que o escalonador barreira mostrou desempenho superior aos demais escalonadores. Tal desempenho foi mais notório quando o rádio possuía um alcance baixo, entre 500m e 2km. Isso mostra que o escalonador barreira é muito útil quando a rede for constituída, em sua maioria, por mensagens com precedência baixa, a exemplo de uma operação normal onde não existam conflitos.

Cabe ressaltar o baixo desempenho do escalonador tradicional para as mensagens de rotina. Como esse escalonador dá prioridade para as mensagens com precedência alta e não apresenta regras de escalonamento baseadas no tempo de vida da mensagem, as mensagens de rotina só terão chances de serem entregues se o protocolo de roteamento DTN conseguir dar vazão às mensagens de alta prioridade até chegar nas mensagens de rotina.

O protocolo MaxPropBarreira foi o melhor algoritmo de roteamento na entrega de mensagens de rotina, seguido pelo algoritmo FirstContactBarreira. Esses protocolos conseguiram dar uma vazão maior na entrega de mensagens, impedindo o esgotamento de espaço em buffer e perda de mensagens por expiração do tempo de vida. Suas respectivas versões com o escalonador lexicográfico também apresentaram desempenhos próximos ao escalonador barreira para alcances a partir de 2km.

Tab3: Entrega de mensagens de rotina

Entrega de Mensagens de Rotina (%)					
Algoritmos/alcance	500m	1km	2km	5km	
FirstContact	Tradicional	3,41	16,93	26,73	77,75
	Lexicográfico	15,51	44,25	64,23	92,24
	Barreira	25,48	49,48	66,06	94,44
SprayAndWait	Tradicional	0,68	0,96	0,87	0,84
	Lexicográfico	12,29	28,93	31,23	36,67
	Barreira	13,11	27,12	30,45	34,59

Entrega de Mensagens de Rotina (%)					
Epidemic	Tradicional	3,07	5,29	5,32	4,36
	Lexicográfico	11,82	26,77	36,52	32,67
	Barreira	23,16	31,99	36,77	30,87
MaxProp	Tradicional	3,95	15,74	40,87	98,61
	Lexicográfico	16,17	47,17	80,28	99,55
	Barreira	26,66	54,20	85,17	99,57
Prophet	Tradicional	3,06	5,38	5,89	5,55
	Lexicográfico	12,60	23,92	31,20	28,30
	Barreira	23,65	29,17	31,76	28,79
Direct Delivery	Tradicional	3,21	5,87	7,86	8,65
	Lexicográfico	12,06	22,59	29,34	37,85
	Barreira	24,74	31,73	31,85	35,64

6.2.2 Mensagens Preferenciais

Da análise das entregas de mensagens com nível de precedência preferencial, é possível concluir que o escalonador lexicográfico foi superior em quase todas as análises, com exceção do protocolo FirstContact para os alcances de 5km e 8km.

Tab 4: Entrega de mensagens Preferenciais

Entrega de Mensagens de Preferenciais (%)					
Algoritmos/alcance	500m	1km	2km	5km	
FirstContact	Tradicional	23,66	48,72	69,03	91,76
	Lexicográfico	29,73	53,28	71,87	94,27
	Barreira	24,74	48,51	71,39	95,11
SprayAndWait	Tradicional	0,64	1,06	1,02	0,76
	Lexicográfico	34,98	57,94	69,70	69,11
	Barreira	18,41	41,83	60,59	57,65
Epidemic	Tradicional	18,19	30,09	31,39	20,20
	Lexicográfico	30,58	54,96	66,85	59,81
	Barreira	23,92	48,08	63,81	54,24
MaxProp	Tradicional	24,74	51,61	75,81	99,03
	Lexicográfico	31,20	59,53	85,50	99,61
	Barreira	25,44	53,30	83,03	99,61
Prophet	Tradicional	18,39	30,27	31,90	25,45
	Lexicográfico	32,55	60,26	71,44	56,74
	Barreira	23,48	46,59	61,72	49,78
Direct Delivery	Tradicional	18,21	32,72	36,14	36,00
	Lexicográfico	30,05	53,26	55,71	56,70
	Barreira	22,26	32,16	35,67	40,44

Como as mensagens preferenciais possuem tempo de vida de 6 horas e a operação teve duração de 2 dias, a ordenação lexicográfica foi mais sensível ao tempo, já que o primeiro critério de escalonamento foi o critério de tempo de vida da mensagem.

Esse escalonador mostra-se importante quando as mensagens têm níveis de precedência e tempo de vida intermediários, em comparação com os demais níveis existentes.

Com um alcance baixo de 500 metros, O SprayAndWaitLexicográfico apresentou a maior probabilidade de entrega de 34,98%, seguido pelo MaxPropLexicográfico com 31,20% de entrega. Com 1km de alcance do rádio, o ProphetLexicográfico entregou 60,26% das mensagens, seguido

pelo MaxPropLexicográfico com 59,53%, SprayAndWaitLexicográfico com 57,94% e FirstContactLexicográfico com 53,28% de entrega. A partir dos 2km de alcance, é notório o desempenho superior do protocolo MaxPropLexicográfico chegando a 99,76% de entrega de mensagens preferenciais com alcance de 8km do rádio.

6.2.3 Mensagens Urgentes

Da análise das entregas de mensagens com nível de precedência urgente, pode-se concluir que o escalonador tradicional mostrou-se eficiente em quase todos os alcances simulados, com destaque para as simulações onde os rádios possuíam alcances baixos variando entre 500 metros e 2km. Com um alcance de 500 metros, o SprayAndWaitTradicional entregou 21,53% das mensagens, quase 8% superior ao escalonador lexicográfico.

Tab 5: Entrega de mensagens urgentes

Entrega de Mensagens Urgentes (%)					
Algoritmos/alcance		500m	1km	2km	5km
FirstContact	Tradicional	14,91	27,75	45,63	75,63
	Lexicográfico	12,05	26,01	44,80	72,41
	Barreira	9,55	23,74	43,08	72,32
SprayAndWait	Tradicional	21,53	43,76	69,93	69,74
	Lexicográfico	13,80	31,52	68,07	93,31
	Barreira	7,04	23,87	53,31	66,86
Epidemic	Tradicional	15,71	32,37	60,39	73,30
	Lexicográfico	12,60	29,50	55,13	91,15
	Barreira	8,68	25,40	49,29	73,13
MaxProp	Tradicional	14,83	31,55	57,94	91,06
	Lexicográfico	12,03	26,96	54,19	92,06
	Barreira	9,61	25,22	51,84	92,34
Prophet	Tradicional	16,60	35,11	65,67	83,27
	Lexicográfico	12,65	29,69	52,73	81,70
	Barreira	7,82	22,18	41,21	52,36
Direct Delivery	Tradicional	14,79	28,44	42,90	55,25
	Lexicográfico	12,20	27,71	43,06	55,22
	Barreira	7,86	16,97	28,25	39,89

À medida que os alcances dos rádios foram aumentando, o escalonador lexicográfico teve resultados bem próximos do escalonador tradicional, com exceção dos protocolos Epidêmico e SprayAndWait onde a abordagem lexicográfica foi muito superior à tradicional chegando a 95,85% de entrega no Epidêmico Lexicográfico frente aos 64,17% de entrega no Epidêmico Tradicional. Esses dois algoritmos de roteamento são muito sensíveis a espaço de armazenamento de mensagens, pois são baseados em inundação da rede. Com alcance alto, a estratégia de escalonamento lexicográfico onde o valor militar de uma mensagem está associado ao tempo de vida da mesma na qual mostrou-se mais eficaz.

Nesta simulação é notória a superioridade do protocolo SprayAndWait em entregar as mensagens urgentes. Tal protocolo dissemina 6 cópias de cada mensagem na rede de forma binária, passando, assim, a custódia de metade das cópias de uma mensagem para outro nó. Essa estratégia foi importante para entregar as mensagens urgentes no tempo necessário, já que possuem tempo de vida baixo de apenas 1 hora. O protocolo MaxProp só apresentou vantagens em relação ao SprayAndWait quando o alcance dos rádios chegou a 8km.

Todos os seus escalonadores apresentaram taxas de entrega semelhantes, com o MaxPropBarreira chegando a 96,66% de entrega de mensagens urgentes.

6.2.4 Mensagens Urgentíssimas

Da análise das entregas de mensagens com nível de precedência urgentíssima, conclui-se que o escalonamento tradicional foi novamente mais eficiente quando o alcance variou entre 500m e 2km, um desempenho parecido ao analisado na entrega de mensagens urgentes. A partir dos 5km de alcance, a abordagem lexicográfica obteve ligeira vantagem em relação a abordagem tradicional.

Tab 6: Entrega de mensagens urgentíssimas

Entrega de Mensagens de Urgentíssimas (%)					
Algoritmos/alcance		500m	1km	2km	5km
FirstContact	Tradicional	16,42	29,83	47,29	80,00
	Lexicográfico	12,28	24,71	43,85	73,17
	Barreira	9,58	24,59	43,49	72,92
SprayAndWait	Tradicional	4,44	8,19	20,41	70,79
	Lexicográfico	2,77	7,27	17,39	66,10
	Barreira	1,48	5,36	14,10	47,69
Epidemic	Tradicional	17,75	38,16	66,84	72,74
	Lexicográfico	12,67	28,94	55,75	91,03
	Barreira	9,24	27,20	52,21	74,57
MaxProp	Tradicional	16,67	31,95	59,63	91,75
	Lexicográfico	12,24	27,68	52,52	92,55
	Barreira	9,33	25,48	51,66	92,34
Prophet	Tradicional	17,31	36,76	68,29	82,85
	Lexicográfico	12,43	29,25	53,39	81,24
	Barreira	9,35	22,98	42,92	53,54
Direct Delivery	Tradicional	15,80	30,56	43,72	55,44
	Lexicográfico	12,39	26,63	43,01	55,98
	Barreira	7,96	17,24	27,71	40,31

Até 1km de alcance, o algoritmo Epidêmico, com sua abordagem tradicional, conseguiu entregar o maior número de mensagens urgentíssimas. Com 2km de alcance, temos uma ligeira vantagem no algoritmo ProphetTradicional. De 5km em diante, o protocolo MaxPropLexicográfico conseguiu uma ligeira vantagem em relação ao Epidêmico Lexicográfico, entregando o maior número de mensagens urgentíssimas com 96,92% de entrega com alcance de 8km.

Percebe-se que para mensagens urgentíssimas que possuem tempo de vida muito baixo de apenas 10 minutos, o protocolo Epidêmico, com sua disseminação semelhante a uma epidemia, é o mais indicado para entregar as mensagens no prazo requerido. O que diferencia é o alcance, no qual a abordagem tradicional funciona bem em alcances curtos e a abordagem lexicográfica apresenta resultados mais satisfatórios em alcances longos.

6. CONCLUSÃO

Neste artigo foi realizado um estudo com o objetivo de propor o emprego de escalonadores multicritérios para sistemas de mensagens militares em redes tolerantes a atrasos e

desconexões, comparando-os com o escalonador tradicional utilizado pelas Forças Armadas Brasileiras.

As redes tolerantes a atrasos e desconexões apresentam características muito semelhantes a uma rede operacional tática e seus principais algoritmos de roteamento foram comparados com o algoritmo de entrega direta de mensagens DirectDelivery utilizado nas comunicações militares.

Também foi proposto o emprego do critério tempo de vida da mensagem (TTL) de forma a calcular a prioridade final (PF) de uma mensagem, o qual foi definido como o valor militar de uma mensagem.

Para a simulação foi implantada a rede de comunicação de dados do Pel C Mec composta por 3 subredes onde poucos nós podem funcionar como uma ponte entre uma subrede e outra [23]. Os enlaces de comunicação entre os nós na rede são ponto a ponto.

O alcance máximo de 8km dos rádios foi definido de acordo com o previsto em [23] e a taxa de transmissão de 16kbps foi baseada em uma forma de onda de dados atualmente em desenvolvimento no Projeto RDS-Defesa.

Na simulação foram implantadas as 9 viaturas do Pel C Mec com suas velocidades de deslocamento, de acordo com o previsto em [23]. O deslocamento das tropas foi realizado em um mapa vetorial da cidade do Rio de Janeiro representando uma operação de GLO.

Trabalhando em um cenário de grande variação no alcance dos rádios, o escalonador lexicográfico é o mais adequado, principalmente se o buffer de mensagens for limitado e tiver problemas de armazenamento durante uma operação. A combinação do escalonador lexicográfico com o protocolo MaxProp mostrou-se a mais adequada.

O escalonador barreira, combinado com o roteamento MaxProp, foi o mais adequado para ser utilizado em uma operação militar no qual as mensagens de rotina são maioria na rede. Esse escalonador mostrou-se eficiente ao ser mais sensível na priorização de mensagens que estão há mais tempo no sistema e seus tempos de vida estão se esgotando.

O escalonador lexicográfico também apresentou um desempenho superior aos demais quando a operação possui uma carga maior de mensagens com precedência preferencial, sendo melhor empregado com o algoritmo SprayAndWait para cenários de alcance de 500 metros, considerado baixo para uma transmissão. Para alcances a partir de 1km o protocolo MaxProp é o mais recomendado de ser utilizado com o mesmo algoritmo de escalonamento.

O escalonador tradicional foi o mais adequado para utilização em cenários nos quais as mensagens urgentes são predominantes no sistema, tendo seu uso recomendado para enlaces com alcance de até 2km. Para enlaces maiores a abordagem lexicográfica foi a mais eficiente. Ambos os escalonadores apresentaram melhores resultados na entrega de mensagens urgentes quando combinados com o protocolo SprayAndWait.

Em cenários de operações críticas onde a carga de mensagens urgentíssimas no sistema é predominantemente maior, o escalonador tradicional novamente é o mais adequado para alcances de até 2km, sendo mais adequado de ser utilizado com o protocolo Epidêmico. A forma de disseminação das mensagens nesse protocolo, semelhante à uma epidemia, mostrou-se a mais recomendada para as mensagens urgentíssimas, cujo tempo de vida é de apenas 10 minutos.

Apesar do escalonador tradicional ser melhor empregado em operações críticas onde as mensagens urgentes e ur-

gentíssimas são mais frequentes, seu uso deve ser evitado quando o buffer do sistema estiver perto de atingir sua capacidade total. Isso ocorre devido ao fato do escalonamento tradicional não ter uma política de gerenciamento de buffer, rejeitando todas as mensagens novas criadas no sistema e as mensagens recebidas de outro nó na rede.

Foi verificado o baixo desempenho do algoritmo DirectDelivery com escalonamento tradicional, exatamente a mesma abordagem utilizada pelas Forças Armadas Brasileiras. Enquanto o escalonador lexicográfico apresentou taxas de entrega de até 98,19% com o roteamento MaxProp em alcance de 8km, o escalonador tradicional não passou dos 39,36% com o roteamento DirectDelivery. Com apenas a substituição do escalonador tradicional pelo lexicográfico no protocolo DirectDelivery, as taxas de entrega subiram para 53,77%.

Da análise dos resultados deste trabalho, ficaram evidentes os benefícios da implantação de uma rede DTN em cenários de emprego militar. Sugere-se, primeiramente, a substituição do escalonador tradicional pelo escalonador lexicográfico, que apresentou melhores resultados na maioria das situações avaliadas. A implementação do escalonador barreira também se mostra importante para operações do dia a dia onde as mensagens de rotina são mais frequentes e esse escalonador é mais apropriado para essa situação. Em segundo plano sugere-se o desenvolvimento de uma camada de custódia de mensagens entre a camada de transporte e camada de aplicação dos sistemas militares, bem como a implementação dos algoritmos DTN para uso conjunto com o escalonadores multicritério propostos neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fall, K. Disruption tolerant networking for heterogeneous ad-hoc networks. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), v. 4, p. 2195–2201, 2005.
- [2] Castro, T.; Senna, V. Estudo preliminar para definição dos softwares componentes da FAC2FFer. Brasília: DCT-EB, 2016. 47 p. (Relatório Técnico, 02/2016-DC2).
- [3] De Abreu, C. S.; Salles, R. M. Modeling message diffusion in epidemic dtn. Ad Hoc Networks, v. 16, n. 2, p. 197–209, 2014.
- [4] IPNSIG. InterPlanetary Networking Special Interest Group. Disponível em: <<http://ipnsig.org/>>. Acesso em: 26 ago. de 2016.
- [5] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, E. Travis, and H. Weiss. Interplanetary Internet (IPN): Architectural Definition. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/draft-irtf-ipnrg-arch-00>>. Acesso em: 23 jul. de 2018.
- [6] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, and H. Weiss. Delay-Tolerant Network Architecture: The Evolving Interplanetary Internet. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/draft-irtf-ipnrg-arch-01>>. Acesso em: 23 jul. de 2018.
- [7] IRTF. Internet Research Task Force. Disponível em: <<http://irtf.org/>>. Acesso em: 23 jul. de 2018.
- [8] Fall, K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. Berkeley: Intel Research, 2003. (Relatório Técnico, RB-TR-03-003).
- [9] F. Warthman. Delay-tolerant networks (dtns): A tutorial. Disponível em: <<http://www.warthman.com/projects-IRTF-Interplanetary-Internet-IPN-Delay-Tolerant-Networks-DTN-Tutorial.htm>>. Acesso em: 23 jul. de 2018.
- [10] Maurice J. Khabbaz, C. M. A.; Fawaz, W. F. Disruption tolerant networking: A comprehensive survey on recent developments and persisting challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 14, n. 2, p. 607–640, 2011.
- [11] ACM SIGCOMM CONFERENCE (ACM), 2005., 2005, Philadelphia. Proceedings... Philadelphia: ACM, 2005.
- [12] Roald Otnes, Michael Goetz, P. V. W.; Zorzi, M. Underwater Acoustic Networking Techniques. 1. ed. Alemanha: Springer, 2012. 83 p.
- [13] Athanasios V. Vasilakos, Y. Z.; Spyropoulos, T. Delay Tolerant Networks: Protocols and Applications. 1. ed. Flórida, EUA: CRC Press, 2011. 362 p.

- [14] IEEE Infocom 2006 (IEEE), 2016., 2006, Barcelona. Proceedings... Barcelona: IEEE, 2006.
- [15] DTNRG. IRTF Delay-Tolerant Networking Research Group. Disponível em: <<https://irtf.org/concluded/dtnrg>>. Acesso em: 23jul. de 2018.
- [16] A. Lindgren, A. Doria, E. Davies, and S. Grasic. Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/rfc6693>>. Acesso em: 23jul. de 2018.
- [17] Dos Santos Cardoso, S. Escalonador Multi-Critério Para Sistemas de Mensagens Militares em Redes Sem Fio de Baixo Desempenho. 2007. 134 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação)– Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.comp.ime.eb.br/pos/arquivos/publicacoes/dissertacoes/2007/2007-Sergio.pdf>>. Acesso em: 23jul. de 2018.
- [18] Kingston, J. Dynamic precedence for military ip networks. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), v. 1, p. 5, 2000.
- [19] Xiao, H.; Beard, C. Support for high priority traffic using preemption. University of Missouri, v. 1, p. 8, 2001.
- [20] Pitt, K.; Devens, W. Information value information based resource management of the defense information systems network. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), v. 1, p. 5, 1999.
- [21] Zikina, A. V. A lexicographic optimization algorithm. Omsk State Technical University, v. 65, p. 363–368, 2003.
- [22] Miettinen, K. M. Nonlinear multiobjective optimization. Kluwer's International Series, v. 1, p. 298, 1998.
- [23] Regimento de Cavalaria Mecanizado. Manual de Campanha. 2. ed. Brasília: Estado-Maior do Exército, 2002. 432 p.

Atualização cartográfica de área urbana com o uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) quadrotor

Elias N N Elias^{*a}, Vivian O Fernandes^b, Mirele V Silva^b, Elaine G V Jesus^b

^a Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba,
Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 210 – Jardim das Américas

Caixa Postal 19001, 81.531-990
Curitiba, Paraná, Brasil

^b Universidade Federal da Bahia. Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia,
Rua Augusto Viana, s/n - Palácio da Reitoria, Canela, CEP: 40110-909

Salvador, Brasil

elias_naim2008@hotmail.com

RESUMO: O objetivo desse trabalho consistiu na atualização cartográfica da área que contempla os campi de Ondina Federação e São Lázaro da Universidade Federal da Bahia utilizando dados provenientes de um aerolevantamento por meio de um VANT quadrotor. A metodologia empregada neste trabalho previu a análise e interpretação dos elementos presentes na área de estudo, planejamento dos voos correspondentes aos locais nos quais houve mudanças, aquisição das fotografias aéreas, calibração da câmera, identificação de feições homologas entre os dados obtidos e o terreno, e coleta de coordenadas por meio de rastreamento GNSS. Ao final pôde-se gerar o mapa atualizado a partir das ortofotos, classificá-lo de acordo com Padrão de Exatidão Cartográfica (Classe B na escala 1:2.000) e descrever as dificuldades encontradas a partir desta técnica.

PALAVRAS-CHAVE: Atualização Cartográfica, Controle de Qualidade, VANT quadrotor.

ABSTRACT: The objective of this work was to update the cartography of the area that includes the campuses of Ondina Federação and São Lázaro of the Federal University of Bahia using a VANT quadrotor aerial survey data. The methodology employed in this work included the analysis and interpretation of the elements present in the study area, flight planning corresponding to locations where changes were made, acquisition of aerial photographs, camera calibration, identification of homologous features between the obtained data and the terrain and gathering of coordinates through GNSS tracing. At the end it was possible to bring forth an updated map from the orthophotos, classify it according to the Cartographic Correlation Standard (Class B in the scale 1: 2000) and describe difficulties encountered from this technique.

KEYWORDS: Cartographic update, quality control, quadrotor UAV.

1. INTRODUÇÃO

Cartografia é a ciência que trata da organização, apresentação, comunicação e utilização da geoinformação, sob uma forma que pode ser visual, numérica ou tátil, incluindo todos os processos de elaboração, após a preparação dos dados, bem como o estudo e utilização dos mapas ou meios de representação, em todas as suas formas [1].

Profissionais que atuam nos segmentos de Sensoriamento Remoto, Fotogrametria e Computação de Imagens têm realizado pesquisas no intuito de melhorar os processos de detecção de mudanças utilizando imagens multitemporais [2].

De acordo com [3] e [4], pesquisas nesta vertente tem o objetivo de identificar mudanças físicas em objetos, a partir de imagens aéreas obtidas ao longo do tempo. Neste sentido, muitas técnicas têm sido desenvolvidas e aplicadas por pesquisadores, relacionadas principalmente com o processamento digital de imagens.

Em linhas gerais, o conceito de atualização está voltado à alteração de elementos, sem que o dado anterior seja perdido. Dessa forma, os dados atuais são agregados ao Banco de Dados existente [2].

[5], em seu trabalho aplicou técnicas fotogramétricas, utilizando câmeras convencionais e de pequeno formato no intuito de detectar e medir variações geométricas.

[6] abordam a viabilidade na utilização de imagens de Satélite QuickBird em atualizações de mapeamentos em escalas grandes, de acordo com as técnicas e os procedimentos utilizados na ortorretificação. Dessa forma, resultados de pesquisas revelam que estas imagens podem ser utilizadas na atualização de mapeamentos até a escala de 1:3000 a partir de um modelo digital de terreno obtido em restituição fotogramétrica na escala de 1:5000.

No que diz respeito ao Brasil, as crescentes mudanças no

cenário geográfico ocasionadas por fatores socioeconômicos e pela urbanização requerem que sejam realizadas atualizações nos mapeamentos locais em curtos períodos de tempo, a fim de que se possam analisar tais mudanças. Tratando-se de mapeamento em escala grande, a criação de novas metodologias para a atualização cartográfica é de fundamental importância, uma vez que, são inerentes às mudanças nos aspectos urbanos em períodos de tempo cada vez menores, como a construção de novas áreas edificadas, mudanças no sistema viário, mudanças na vegetação, etc.

Diante das metodologias relacionadas a atualização cartográfica a partir de imagens aéreas e orbitas citadas, este trabalho objetivou realizar a atualização cartográfica com o uso do VANT quadrotor nos campi de Ondina, Federação e São Lázaro Universidade Federal da Bahia (UFBA), identificando a sua viabilidade e limitações para projetos de mapeamento em escala grande, aplicando o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) a partir de uma base cartográfica digital vetorial.

É válido ressaltar que o equipamento utilizado permite a obtenção de imagens aéreas em pequenas áreas em um menor período de tempo e custo quando comparadas as outras técnicas tradicionais (Fotogrametria, Levantamento Topográfico, Levantamento GNSS, etc.)

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Base cartográfica digital de referência

Com o advento de novas tecnologias as bases cartográficas, que antes eram elaboradas por meio de processos analógico passaram a ser elaboradas em meio digital, permitindo avanços e melhorias no manuseio e disseminação das infor-

mações. [7] define uma base cartográfica digital como sendo o conjunto de documentos e registros cartográficos em formato digital, onde os elementos representam os componentes de um determinado local delimitado a partir de uma área de estudo.

A elaboração de documentos cartográficos, que proporcionam dados que definem uma base cartográfica, são realizados através de processos complexos. Devem ser gerados a partir de padrões e especificações técnicas únicas que garantam a comunicação cartográfica entre os elementos que a constituem e permitam o seu compartilhamento, interoperabilidade e distribuição, viabilizando e facilitando o nível de utilidade no uso da informação nos mais diversos parâmetros socioeconômicos definidos, seja no setor público governamental ou no setor privado [8].

No Brasil, as produções de dados cartográficos oficiais do mapeamento sistemático em nível nacional, com escala inferior a 1:25.000, estão a cargo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Diretoria do Serviço Geográfico (DSG). A DSG disponibiliza cartas topográficas matriciais e vetoriais, ortoimagens e modelos digitais de superfície, nas escalas de 1:25.000 a 1:250.000. O IBGE disponibiliza folhas em formato matricial ou raster em diversas escalas e ainda permite o acesso a bases contínuas do Brasil, produzidas nas escalas de 1:1.000.000 e 1:250.000 [9].

Em 2006 a CONCAR constituiu o Comitê Especializado para a Estruturação da Mapoteca Nacional Digital (CEMND) desenvolvendo a Estrutura de Dados Geoespaciais Vetoriais (EDGV). A Especificação Técnica para a Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV) editorada pela DSG e homologada pela CONCAR em 2010, apresenta a estruturação do Mapeamento Sistemático Terrestre da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) para viabilizar o compartilhamento de dados, a interoperabilidade e a racionalização dos recursos em relação aos produtores e usuários [10].

A EDGV apresenta instâncias para a categorização de dados geoespaciais, representando classes como: Hidrografia, Relevo, Vegetação, Sistema de Transporte, Energia e Comunicações, Abastecimento de Água e Saneamento Básico, Educação e Cultura, Estrutura Econômica, Localidades, Pontos de Referência, Limites, Administração Pública e Saúde e Serviço Social [10].

2.2 Atualização Cartográfica

Atualmente as técnicas e métodos utilizados para mapeamento e atualização cartográfica tem sido cada vez mais estudados devido às intensas mudanças no cenário geográfico, principalmente tratando-se de variações urbanas, onde a ocupação, cada vez mais expressiva, desencadeia variações em períodos de tempo cada vez menores. Uma das principais dificuldades no processo de atualização cartográfica está relacionada aos níveis de detalhamento estabelecidos por meio da escala utilizada e a demanda de informações nos dados já disponíveis.

No Brasil, a desatualização de produtos cartográficos tornou prioritária a busca por métodos alternativos para realizar a atualização cartográfica. Esta permite obter uma base cartográfica sólida para realizar o planejamento urbano e o gerenciamento do território nacional [11].

[12] constataram que o Brasil só possui cobertura completa de mapeamento oficial nas escalas de 1:100.000 e 1:250.000. Produtos cartográficos que sejam utilizados para fins de planejamento e ordenamento de áreas do espaço geográfico,

requerem que sejam desenvolvidos mapeamentos em escalas maiores, que possuam um menor grau de generalização, permitindo identificar determinados elementos que servem de subsídios para a ordenação e elaboração de uma base cartográfica.

[13] atribui as seguintes análises que são realizadas no desenvolvimento de mapeamentos em escala grande:

- Escala de 1:10000 - Utilizada para mapeamento de áreas urbanas e rurais;
- Escala de 1:2000 e 1:10000 – Utilizada para mapeamento e identificação de feições referentes a áreas urbanizadas.

Para implantação de uma atualização sistemática contínua é necessário que o fluxo de informações seja permanente, viabilizando a dinâmica do trabalho e permitindo que seja desenvolvido o processo de atualização cartográfica. Dessa forma, as informações que são indispensáveis para a atualização de um mapeamento na escala de 1:2000 são decorrentes da ação humana [13].

Para fins de atualização cartográfica a partir de imagens, além dos trabalhos realizados por [5] e [6], podem ser citados o de [11], que utilizaram técnicas de Processamento Digital de Imagens a partir de uma Morfologia Matemática para analisar imagens dos satélites LANDSAT/TM e IKONOS e o de [14] que aplicou a técnica *Radiometric Rotation Controlled by Nonchangeaxis* (RCEN) para a detecção de alterações em imagens orbitais da mesma banda obtidas em diferentes épocas.

Outra forma de atualização cartográfica diz respeito a realização de um projeto de aerolevantamento, com a tomada e processamento de fotografias da área a ser mapeada. Apesar da eficiência desse método e garantia de boa qualidade posicional, principalmente para mapeamentos em escala grande, quando utilizado para projetos de atualização nota-se que não é tão viável financeiramente.

Este ponto foi discutido por [13] que afirma que o ideal, para fins de atualização em escala grande seria a realização de um recobrimento fotogramétrico anual de um determinado local.

Os avanços tecnológicos têm permitido a implementação de técnicas atreladas ao desenvolvimento da cartografia digital e juntamente com isso o desenvolvimento dos Veículos Aéreos Não Tripulados – VANTs. Estes possibilitam obter fotografias aéreas a partir de programas específicos para processamento digital de imagens e por meio destas é possível realizar o planejamento de pequenas cidades e em alguns casos realizar projetos de atualização em cidades médias, inserindo em outros produtos cartográficos os recortes espaciais.

2.3 Mapeamento com VANT quadrotor

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) têm sido utilizados para as mais diversas aplicabilidades civis, desde análises ambientais até o desenvolvimento de projetos de mapeamento. Tais equipamentos quando acoplados a câmeras digitais de qualidade, permitem a aquisição de fotos aéreas e a aplicação de técnicas de fotogrametria [15].

Além das câmeras digitais, os VANTs possuem um GNSS acoplado e são utilizados para as mais diversas aplicações, servindo como foco de investigação em vários aspectos da superfície terrestre. A tomada de fotografias ocorre a partir de uma dada sobreposição que, a partir do conceito de estereoscopia, permite gerar Modelos Digitais de Elevação (MDE)

e Modelo Digitais de Superfície (MDS) para realizar análises específicas, como estudos de expansão da ocupação urbana, identificação de áreas suscetíveis a desastres naturais, etc.

[16] afirma que a navegação autônoma do VANT é realizada por meio do uso de sistema GNSS através do uso de tecnologia inercial de medição e uso de outros sensores. Para permitir que seja realizado um trabalho fotogramétrico com o uso de VANTs é necessário que o mesmo seja programável, possibilitando o desenvolvimento da sistemática de mapeamento da região de interesse.

Os avanços relacionados às técnicas de engenharia e ciências dos materiais permitiu o desenvolvimento de pequenos VANTs quadrotóres, também chamados de microdrones, que podem ser equipados com câmeras e outros sensores, podendo estes ser operados a partir de uma estação de controle no solo. No que diz respeito a fins de uso civil, tais equipamentos podem ser utilizados para as mais diversas aplicações, onde, de acordo com [17] destacam-se:

- Imagens aéreas convencionais;
- Imagens aéreas convencionais em tempo real;
- Imagens de infravermelho;
- Modelos estereoscópicos para a fotogrametria.

O mesmo autor ainda ressalta o uso dos VANTs quadrotóres devido a sua simplicidade mecânica e as facilidades com a qual podem ser executadas manobras ao fazer uso do mesmo, tornando-se aplicável nas mais diversas pesquisas desenvolvidas. A facilidade e operacionalidade permitida ao executar um determinado voo utilizando tal equipamento, viabiliza a obtenção de informações que antes não eram possíveis, uma vez que são atribuídas tecnologias que possibilitam a decolagem vertical, voo pairado, facilidade de aterrissagem em pouco espaço, sensores inerciais e presença de obstáculos. Além disso, permite-se obter uma ampla visão sobre variações no espaço territorial, no que diz respeito a monitoramento ambiental, gestão de desastres e processos de urbanização.

De acordo com [18], a expressão VANT não diz respeito unicamente para a aeronave como sendo um equipamento físico, mas está relacionada também com outros elementos que são parte deste. Sendo assim, além da aeronave, compreende a estação de controle, o sistema de lançamento e de pouso e demais componentes operacionais. Dessa forma, é caracterizado por todos os elementos configuráveis que viabilizem, não só a execução do voo, mas também o objetivo a ser alcançado.

No que tange a regulamentação dos voos, nenhum VANT civil tem a permissão de operar em território nacional sem a autorização da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), do departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e determinados órgãos regulares, sendo um deles referente ao Ministério da Defesa.

A legislação referente ao uso de VANTs no Brasil foi estabelecida a partir da portaria da defesa normativa nº 606, de 2004 apresenta diretrizes para a obtenção de veículos aéreos não tripulados e as suas providências. Quanto a regulamentação do uso de VANTs no Brasil, até o ano de 2017, os documentos vigentes eram:

Circular de Informações Aeronáuticas – AIC nº 21/10 – DECEA Setembro/2010: tal circular tem como finalidade estabelecer as informações necessárias para o uso de veículos

aéreos não tripulados no Brasil;

- Decisão nº 127 – ANAC, Novembro/2011: autorização para operação aérea de Aeronave Remotamente Pilotada do Departamento de Polícia Federal;
- Instrução Suplementar nº 21-002 - Revisão A - ANAC, Outubro/2012: Orienta aplicação da seção 21.191 do RBAC 21 (Regulamento Brasileiro de Aviação Civil) para emissão de CAVE (Certificado de Autorização para Voo Experimental) para SISVANT de uso experimental (pesquisa e desenvolvimento, treinamento de tripulações e pesquisa de mercado).

No ano de 2017 a ANAC procedeu com a regulamentação dos VANTs, estabelecendo regras para o uso civil destes e estabelecer os requisitos mínimos para realizar operações com o mesmo a partir dos métodos de pilotagens.

O subitem 2.4 aborda características recentes ao algoritmo *Structure from Motion* (SfM), é um dos principais algoritmos utilizados nos softwares de equipamentos VANT.

2.4 Structure from Motion (SfM)

De acordo com [19] o SfM permite realizar a extração de feições tridimensionais (3D) a partir de imagens estáticas obtidas em duas dimensões (2D). Dessa forma, a partir de um conjunto de fotografias de uma determinada área, processadas por meio de um software específico, é possível obter uma estrutura 3D dos alvos capturados.

Os mesmos autores ainda afirmam que a aplicação desta técnica surgiu da simplicidade do seu uso e o baixo custo em relação aos equipamentos utilizados para a sua obtenção, quando comparado em relação a outros métodos.

O SfM faz a reconstrução da posição das câmeras por meio da detecção de pontos de interesse em determinadas imagens resultando numa nuvem esparsa de pontos [20].

A detecção de elementos em SfM é caracterizada pela detecção de keypoints que apresentam tais características: textura inconfundível em relação a seus vizinhos, alta repetibilidade, invariância na iluminação, ruídos na imagem e transformações geométricas básicas como escala, translação e rotação [21]. Para a identificação de pontos homólogos nas imagens, utiliza-se o algoritmo Scale Invariant Feature Transform (SIFT) que permite determinar regiões comuns nas fotografias [22].

De acordo com [21], os algoritmos SfM, permitem que ocorra a reconstrução da cena de captura de forma tridimensional e do movimento da câmera, por meio de uma série de imagens bidimensionais obtidas ao realizar movimentações em torno da cena, permitindo que as imagens sejam alinhadas.

[23] afirmam que, a diferença característica relacionada ao uso do algoritmo SfM em relação a Fotogrametria clássica, diz respeito ao fato deste não necessitar de uma especificação inicial de uma série de dados de coordenadas 3D conhecidas em relação a cena capturada, posição das câmeras e as suas orientações. Sendo assim, estes dados são resolvidos de forma simultânea, por meio de um processo iterativo, com alta redundância de ajuste de conjunto que se fundamenta em uma base de dados extraída automaticamente a partir de imagens sobrepostas.

[24] apresentam um método que explicita a reconstrução

3D, sendo dividida de acordo com as etapas a seguir:

1. Determinação de inúmeras feições características em cada imagem;
2. Identificação dos emparelhamentos (matching) das feições correspondentes;
3. Determinação de uma estimativa inicial da estrutura da cena e a movimentação relativa da câmera;
4. Calibração da câmera;
5. Adensamento da nuvem de pontos (dense cloud);
6. Geração do modelo tridimensional por meio de rede triangular.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo utilizada para a realização deste trabalho compreende a Universidade Federal da Bahia, nas dimensões que correspondem aos campi de Ondina, Federação e São Lázaro. A escolha deste local para a realização das atividades ocorreu devido às mudanças nos últimos anos, em relação a equipamentos como: edificações, praças, vias e áreas verdes.

De acordo com o Plano diretor de desenvolvimento físico e ambiental da [25], tal universidade é uma instituição pública de ensino, pesquisa e extensão, sendo a maior do estado da Bahia, com a sua sede localizada no município de Salvador- BA.

Tal instituição é caracterizada por possuir 112 cursos diferentes, sendo 94 destes correspondentes a cursos de graduação na sede de Salvador, seis nos campi de Vitória da Conquista e doze nos campi de Barreiras.

Os campi da UFBA em que foram desenvolvidos este trabalho contemplam as áreas correspondentes ao campus de Ondina, Federação e São Lázaro, possuindo uma área aproximada de 300.000m², com extensões que partem do bairro da Federação ao norte e pela Avenida Ademar de Barros ao sul. O plano diretor da UFBA, realizado em 2008, divide estes campi em cinco zonas diferentes, sendo estas caracterizadas como:

- Zona I – Ondina/Federação: Ciências e Tecnologias;
- Zona II – Ondina Centro: Artes / Comunicação / Letras / Informação;
- Zona III – Ondina Sul: Saúde Animal/Biodiversidade;
- Zona IV – Ondina/São Lázaro: Ciências Humanas e Sociais;
- Zona V – Ondina/Orla: Educação /Educação Física, Esporte e Lazer.

A figura 1 exibe o mapa de localização da área de estudo.

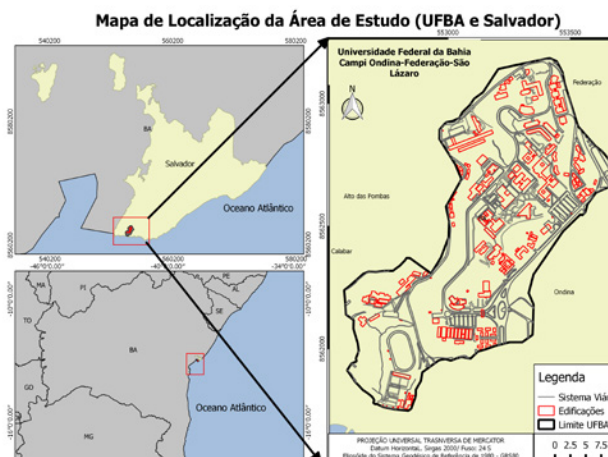


Fig. 1 – Mapa de Localização. Fonte: Autoria própria (2019).

4. METODOLOGIA

O trabalho realizado consiste na atualização cartográfica da área que compreende os *campi* da Universidade Federal da Bahia (UFBA), a partir dos elementos que compõem a base cartográfica do Sistema Cartográfico e Cadastral do Município do Salvador (SICAD), elaborada no ano de 2006, vigente até a presente data (2019).

Para a sua elaboração, o projeto foi dividido em cinco etapas principais. A primeira etapa consistiu na avaliação e identificação das principais mudanças na área de estudo e a elaboração dos planos de voos para estes locais. A segunda etapa constituiu nas atividades de campo realizadas, referentes a calibração manual câmera, tomada das fotografias com o uso de VANT quadrotor e a coleta das coordenadas de feições homólogas entre as fotografias obtidas e da base cartográfica do SICAD em relação às identificáveis na área de estudo. A terceira etapa diz respeito às atividades realizadas em laboratório, caracterizadas pelo processamento das imagens. A quarta etapa caracteriza-se pela sobreposição das ortofotos geradas na base cartográfica e vetorização das feições modificadas. A quinta e última etapa consiste na finalização do projeto, permitindo a elaboração do mapa atualizado e determinação da acurácia posicional do mesmo.

4.1 Identificação das regiões onde houve mudanças

Para a identificação das regiões que foram atualizadas, primeiramente houve a necessidade em avaliar regiões na UFBA em que ocorreram mudanças em relação à Base Cartográfica do SICAD. A análise prévia dos elementos modificados foi realizada a partir de imagens do *Google Earth* 2017 (Satélite *Astrium CNES*), uma vez que, a constante atualização das imagens que alimentam a sua base de dados, torna possível obter o cenário atual dos campi da UFBA em relação às feições existentes no local.

Primeiramente foi realizado um recorte das imagens do *Google Earth* em relação aos limites que contemplam a área de estudo. A imagem recortada foi georreferenciada com base nos arquivos vetoriais que alimentam o SICAD, com o auxílio do *software* QGIS 2.8.4. Com isso, foi possível obter a sobreposição da imagem com os arquivos vetoriais, viabilizando a análise visual e identificação de regiões nos campi que sofreram mudanças.

A partir da análise das mudanças ocorridas na área de estudo, foram localizadas alterações nas camadas que correspondem às áreas edificadas, vias e densidade vegetativa, utilizando as imagens do *Google Earth*. Dessa forma, foram realizadas visitas de campo no intuito de verificar as características das feições modificadas e a veracidade das análises.

No que diz respeito às vias e a vegetação, as análises em campo foram, em sua totalidade, visuais, ou seja, foram observados e avaliados estes elementos localizados na área de estudo e comparados em relação às análises feitas a partir da sobreposição dos arquivos vetoriais do SICAD em relação às imagens do *Google Earth*. Todavia, no que diz respeito às edificações, os métodos de verificação ocorreram de forma diferente, uma vez que, além da análise visual das mudanças ocorridas, houve a necessidade de consultar técnicos e funcionários dos locais sobre as características e tipos das edificações construídas ou demolidas. Dessa forma, foram consultados: Nomenclatura, estado acerca da edificação (edificações construídas ou demolidas), a operacionalidade e a funcionalidade.

4.2 Planejamento de voo

A partir da localização espacial das áreas onde ocorreram as mudanças, com o auxílio do *software* QGIS 2.8.4 foi realizada a vetorização prévia destas regiões, a fim de construir um esboço das áreas a serem sobrevoadas, permitindo estabelecer a localização geográfica e dimensões dos planos de voos criados.

No que diz respeito à etapa de elaboração dos planos de voo, a sua realização ocorreu com o auxílio do *software* *pix4d capture*, instalado no *Tablet Samsung GT - N8000* que permitiu delimitar as faixas de voo de acordo com os parâmetros previamente determinados. Dessa forma, os parâmetros principais que foram levados em consideração dizem respeito à altura de voo utilizada, quantidade de faixas, sobreposição lateral e longitudinal, a verticalidade do eixo da câmera e a escala de voo do imageamento gerado. A altura de voo utilizada para este trabalho foi de 60 metros e as sobreposições laterais e longitudinais foram, respectivamente, 80% e 60% entre as fotografias e a verticalidade do eixo da câmera foi definida como sendo 90°.

O uso deste *software* permitiu que tomadas das fotografias nas faixas de voo pudessem ser executadas de forma automática. A partir da delimitação da área a ser sobrevoada, o equipamento utilizado realiza o percurso de forma automática, retornando para local de origem após o término da execução do plano de voo. O cálculo da escala de voo em imagens digitais correspondeu a obtenção do GSD (Ground Sample Distance).

4.3 Calibração manual da câmera

A câmera utilizada para obtenção das fotografias corresponde a do quadrotor DJI Phantom 2 FC200, de até 14 Megapixels. De acordo com [1] esta câmera opera com 1 CCD (*Charge Coupled Device*), possui comprimento (w) de 5,714 mm e altura (h) de 4,286. A máxima resolução desta câmera é 4384 x 3288 (w x h).

Para a calibração da câmera utilizou-se o *software Photomodeler Pro*. Neste processo de calibração da câmera, a grade de calibração foi posicionada no chão e foram tomadas imagens da mesma em quatro posições diferentes. Foram tiradas três imagens com ângulos variando de -90° a 90° em cada uma das posições, totalizando doze imagens.

A figura 2 exibe, o posicionamento do VANT quadrotor e do alvo de calibração utilizados durante a realização do processo.

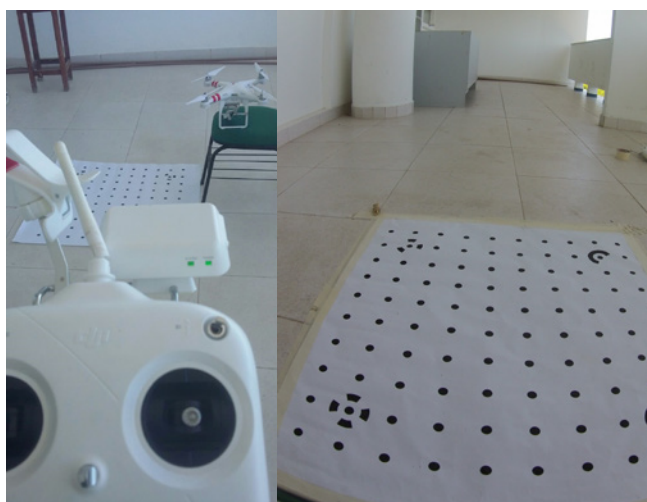


Fig. 2 – Calibração da câmera. Fonte: Autoria própria (2018).

4.4 Aquisição de imagens através do VANT quadrotor DJI Phantom 2

A partir da identificação das regiões onde ocorreram mudanças e o planejamento de voo nestas áreas, viabilizou-se a execução das atividades no intuito de adquirir as imagens das áreas especificadas.

Para a aquisição das imagens foi utilizado o VANT quadrotor Phantom 2. Este equipamento possui quatro motores elétricos *brushless*, onde a velocidade de cada rotor determina a forma como será sucedido o voo. É equipado com recursos de segurança *go home* que permite que o equipamento retorne ao local de origem caso ocorra algum problema técnico ou perda de sinal.

O VANT quadrotor DJI Phantom 2 foi utilizado neste trabalho, uma vez que, em sua funcionalidade é permitido que sejam atribuídas características referentes a fotogrametria tradicional, sendo estas: estabilidade de voo por sensores inerciais e GNSS; altura constante; informações de toda a rota de voo; georreferenciamento de imagens e facilidade na programação e planejamento dos voos.

Além destas aplicabilidades, em sua programação o equipamento possui a liberdade da realização dos voos de forma autônoma ou manual, ou seja, o operador pode executar uma rota de voo automática, já definida por programas em laboratório ou realizá-las de forma manual, utilizando o controlador do equipamento.

O VANT quadrotor DJI Phantom 2 possui as seguintes características: câmera não-métrica FC200 integrada 14MP com gravação de vídeo HD 1080p em um cartão micro SD; sistema a FPV embutido, que transfere vídeo no seu smartphone (iOS / Android) através de Wi-fi (300m); extensor Wi-fi incluído capaz de capturar até 980 pés acima; gimbal motorizado - permite controlar o ângulo de inclinação da câmera, manualmente controlável através do aplicativo Vision; tempo de voo até 25 minutos com uma única carga usando a bateria LiPo 5.200 mAh que contém um circuito inteligente e um indicador de carga restante embutido. A figura 3 exibe uma fotografia do equipamento.



Fig. 3 – VANT quadrotor DJI Phantom 2. [26]

A câmera utilizada pelo VANT quadrotor DJi Pantom 2 é uma câmera não-métrica denominada de *Viewfinder*, comercialmente denominada *Action Cams* (Câmeras de ação) grande angular, a qual foi desenvolvida para filmagens e fotos. Por ela ter um ângulo de abertura grande 140°, apresenta grande distorção nas imagens. Possibilita enquadrar áreas maiores, apresentando muitas vezes fotos com aspecto arredondado.

4.5 Coleta das coordenadas dos pontos de controle

Para realização desta etapa do trabalho, foram realizadas análises em campo a fim de avaliar feições que fossem fa-

cilmente identificadas nos produtos obtidos até então. Dessa forma, foram avaliadas feições homólogas no terreno em relação às fotografias e a base cartográfica do SICAD, ou seja, elementos da área de estudo facilmente identificados nestes produtos. Os pontos de controle escolhidos correspondem a feições como vértices de estacionamentos e esquinas, interseções entre vias e meio-fios, etc.

Antes de dar início à coleta das coordenadas destes pontos, foram realizadas pesquisas na plataforma online do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na sessão que corresponde ao Banco de Dados Geodésicos, com o intuito de obter coordenadas dos vértices de referência pertencentes à Rede Geodésica Brasileira (RGB) localizados nas proximidades da área de estudo. Foram localizadas duas estações de referência do IBGE, sendo estas denominadas como: Salvador – INCRA (SAVO) e Salvador – Capitania dos Portos (SSA1) suas coordenadas estão referenciadas no Sistema de Referência SIRGAS 2000.

A partir destas estações de referência, foram determinadas as coordenadas dos pontos de controle que viabilizaram as demais análises neste trabalho.

Para isto foi utilizada técnica de posicionamento relativo estático por meio do receptor GNSS *Promark 220*, utilizando a frequência L1 das ondas portadoras, máscara de elevação de 15° e taxa de gravação de 1 segundo. O tempo de rastreamento dos pontos de controle foi definido como sendo 20 minutos em cada ponto, em função do comprimento da linha de base, garantindo a eliminação dos erros de ambiguidade e solução fixa para os mesmos, uma vez que a distância média das estações de referência SAVO e SSA até os vértices de apoio é de, respectivamente, 10 Km e 3 Km. O *software* utilizado para o processamento e ajustamento destas coordenadas foi *GNSS Solutions*.

A obtenção das coordenadas foi realizada com dois intuitos, sendo estes:

- a) Determinação dos pontos de controle para o processamento e geração das ortofotos digitais;
- b) Determinação da acurácia posicional do mapa atualizado.

Foram coletados 40 pontos de controle neste trabalho que serviram de subsídio para a execução das atividades. [27] criaram uma base de dados com coordenadas de pontos notáveis de feições coletadas na mesma região que contempla a área de estudo, sendo assim, foram aproveitadas 14 destas coordenadas a fim de garantir que existam dados suficientes para a execução das duas atividades. Dessa forma, para a área de estudo, em sua totalidade, foram utilizados 54 pontos de controle.

4.6 Processamento das imagens

Para o processamento e geração das ortofotos digitais por meio das imagens geradas, foi utilizado o *software Agisoft PhotoScan 1.3.0*.

Antes da inserção das imagens no *software*, primeiramente foi realizada uma primeira etapa que diz respeito a seleção e filtragem destas fotografias. Esse processo foi realizado manualmente. Foram excluídas as imagens que apresentaram problemas de qualidade relacionados a inclinação da aeronave no momento do imageamento, variação da altitude de voo em tomadas consecutivas e o arrasto provocado por ventos que alteraram o percurso do mesmo.

Após esta seleção, as imagens foram inseridas no *sof-*

ware Agisoft PhotoScan 1.3.0 e realizadas as etapas correspondentes ao processamento pelo *software*. As etapas foram realizadas, ordenadamente, da seguinte forma: alinhamento das fotografias tomadas; otimização do alinhamento; inserção dos pontos de controle; construção da nuvem de pontos densa; construção de modelos poligonais

de interpolação; edição da geometria; construção do modelo digital de elevação; texturação; construção das ortofotos.

Na etapa de alinhamento das fotografias foram detectados os pontos homólogos nas regiões de sobreposição entre as imagens, permitindo criar uma nuvem espaçada de pontos e estimar a posição de cada fotografia em relação ao recobrimento geral das áreas. Os parâmetros utilizados nesta etapa dizem respeito ao grau de acurácia na definição dos pontos homólogos, modo de seleção dos pares e a quantidade limite de pontos utilizados para a ligação de faixas. Estes pontos limites indicam o quão fina é a varredura na imagem para determinar os pontos individualizados que serão utilizados para representar os pontos homólogos e entre as faixas de recobrimento.

A construção da nuvem densa de pontos corresponde a etapa de densificação dos pontos fotogramétricos onde permite-se o refinamento dos parâmetros da posição da câmera no instante em que as fotografias são obtidas. A partir da nuvem espaçada de pontos é criada uma nuvem densa dos mesmos. Nesta etapa foram inseridas as coordenadas dos pontos de controle coletados em campo nos respectivos elementos no terreno para que auxiliassem no georreferenciamento da área recoberta. Estes pontos também foram usados na identificação dos parâmetros referentes aos padrões do algoritmo utilizado para geração das ortofotos digitais.

A formação do modelo de interpolação TIN (Rede Irregular Triangular) corresponde a etapa que constrói a geometria da superfície baseada na construção de faces obtidas a partir da nuvem densa de pontos.

A partir da interpolação TIN foi gerado o Modelo Digital de Superfície (MDS), onde são apresentadas as elevações de todos os elementos da área (relevo e topo de construções).

[28] afirma que a característica de um terreno referenciado, diz respeito ao relevo que pode ser estimado de acordo com a sua cota ou altitude. Dessa forma, a expressão referente a Modelo Digital de Elevação (MDE), refere-se aos modelos que consideram como característica do terreno, aspectos referentes a elevação em relação ao relevo.

O MDS se caracteriza por ser uma descrição que envolve a cota superior dos objetos acima da superfície, além do terreno [29]. Em seguida foram geradas as ortofotos derivadas da ortorretificação do recobrimento do bloco.

Segundo [30], as fotografias em seu estado bruto, não conseguem substituir determinados tipos de produtos oriundos de projetos de mapeamento, uma vez que a tomada da fotografia representa uma realidade gerada a partir de uma projeção cônica central, diferentemente de uma projeção ortogonal a superfície mapeada.

[28] afirma que o princípio básico relacionado à produção de uma ortofoto digital consiste no processo de eliminação dos deslocamentos devido a inclinação e ao relevo, das fotografias em perspectiva que forma uma imagem única. Dessa forma, na ortofoto gerada, podem ocorrer variações na posição planimétrica dos elementos que compõem a área mapeada, como é o caso de edificações, camadas de relevo, densidade vegetativa, etc. E em escala também podem ocorrer

rer estas variações nos pontos que formam a ortofoto.

O modelo tridimensional foi gerado a partir de algoritmos do *Structure from Motion* (SfM), utilizado pelo *software Agisoft PhotoScan 1.3.0*, a partir das fotografias 2D obtidas para área de estudo.

A sobreposição das camadas vetoriais selecionadas da base cartográfica do SICAD em relação às ortofotos, permitiu identificar as regiões atualizadas e iniciar o processo de representação destas mudanças por meio da vetorização destes elementos. No *software QGIS 2.8.4* foram criadas três novas camadas vetoriais, referenciadas em SIRGAS 2000 e nomeadas de meio-fio, edificações e vegetação. No processo de vetorização da base cartográfica do SICAD identificou-se que foi utilizada a primitiva gráfica do tipo linha para as três camadas.

Na atualização cartográfica realizada neste trabalho, para que o processo de vetorização coincidissem com a primitiva gráfica das feições representadas para as camadas de edificações e vegetação, utilizou-se a primitiva gráfica de polígono e para a camada de meio-fio foi mantida a de linha. Dessa forma, o processo de vetorização foi realizado utilizando duas aplicações principais, sendo estas:

- a) Vetorização dos elementos novos a partir da visualização e interpretação das ortofotos obtidas;
- b) Exclusão das feições nas camadas vetoriais da base cartográfica do SICAD que não são mais evidentes nas regiões da área de estudo.

No que diz respeito às edificações, o processo de vetorização destas camadas foi realizado diretamente no *software Agisoft PhotoScan 1.3.0* e exportadas para o *software QGIS 2.8.4*. Este processo foi necessário, uma vez que, as distorções geradas nas fotos fazem com que o topo das edificações não coincida com a base das ortofotos geradas, tendo em vista que estas são produzidas através do MDT (elevação do relevo), que corrige o relevo e não o topo destes elementos, alterando a qualidade posicional dos mesmos. A vetorização no *software Agisoft PhotoScan 1.3.0* permitiu realizar a vetorização diretamente no modelo tridimensional gerado e vetorizar as edificações diretamente em suas bases, eliminando este problema. Este processo permitiu obter as camadas vetoriais de meio-fio, edificação e vegetação atualizadas da área de estudo e gerar o mapa da mesma atualizado, avaliando as mudanças decorrentes nos últimos onze anos.

4.8 Controle de Qualidade Posicional

Com a elaboração do mapa atualizado referente a região que contempla a área de estudo, a próxima etapa constituiu na determinação da acurácia posicional do mapa atualizado, onde foram escolhidas feições no terreno bem evidentes para a obtenção destas coordenadas. A realização desta etapa foi feita através da obtenção de dados por meio de parâmetros estatísticos que viabilizassem a sua execução. Então, os passos realizados foram relacionados a obtenção da quantidade necessária de amostras para a referida área de estudo, identificação e obtenção destas coordenadas no local em relação ao produto cartográfico, cálculo das discrepâncias das coordenadas obtidas entre as coordenadas coletadas no terreno e seus homólogos no mapa atualizado, cálculo da média e desvio padrão destas discrepâncias, análises estatísticas de

tendências e de precisão.

Para avaliação de dados cartográficos obtidos de acordo com as características e padrões de qualidade pré-determinados foi criado o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC pelo [31] visando, assim, classificar os aspectos de determinado produto cartográfico de acordo com os fatores e métodos utilizados em sua obtenção.

O [31] atesta que a discrepância máxima que pode ser encontrada referente à disposição dos pontos em um produto cartográfico gerado, no que diz respeito à acurácia das feições representadas é de que 90% dos pontos utilizados para esta análise não deverão apresentar discrepâncias superiores aos estabelecidos pelo PEC, tanto os referentes a altimetria quanto a planimetria. O Erro Padrão é determinado de acordo com as análises realizadas no produto cartográfico e de acordo com os métodos estatísticos utilizados em sua elaboração, onde a probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão. O Erro Padrão Isolado, seja por um ponto ou feição do projeto cartográfico, não deve ultrapassar 60,8% do PEC estabelecido.

Sendo assim, o Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico onde a partir do gráfico probabilístico de distribuição normal pode ser representado com uma probabilidade de 90% de acordo com a dispersão estatística considerada.

A ET-EDGV tinha o objetivo de atualizar os padrões vistos no [31], uma vez que a mesma já não atendia as necessidades atuais aplicadas em meio digital. Então, passou-se a considerar que os avanços tecnológicos eliminaram os erros gerados pelos processos realizados antigamente e inserindo os erros caracterizados pelos processos atuais.

Embora, tais especificações abordem parâmetros de classificação de produtos cartográficos de acordo com o PEC, até o ano de 2016 ainda existiam metodologias padrões o cálculo do mesmo. No referido ano foi estabelecida a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de dados Geoespaciais Vetoriais (ET-CQDG), contudo na época em que este trabalho foi realizado, ela ainda não havia sido homologada pela CONCAR. Dessa forma, os próximos itens abordam os métodos utilizados para a análise descrita.

4.8.1 Determinação do número de amostras

Embora seja de extrema importância determinar o tamanho da amostra para fins de análises cartográficas, a maioria dos métodos para controle de qualidade geométrica não apresenta recomendações para cálculo de amostra [32].

Conforme as características da referida área de estudo utilizada neste trabalho, o tamanho mínimo de amostras a serem utilizadas foi calculado a partir da expressão (1) onde determinou-se, por meio de uma população finita, com estimação da média populacional e erro máximo admissível e um nível de confiança) em que se deseja determinar os parâmetros.

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2 N}{(N - 1) \epsilon^2 + Z^2 \sigma^2} \quad (1)$$

Onde:

n = Tamanho da amostra;
Z = Intervalo de Confiança;
N = Tamanho da população;

- = desvio padrão amostral;
- = Erro Amostral Relativo.

De acordo com [33], a análise estatística para a determinação da acurácia posicional planimétrica é composta por duas fases, sendo elas: análise de tendência e análise de precisão.

4.8.2 Análise de Tendência

De acordo com [32], em um determinado produto cartográfico, a análise de tendência dos seus elementos consiste nas análises estatísticas entre as coordenadas de referência do mundo real de determinadas feições obtidas por algum método de levantamento em relação as coordenadas da carta a ser avaliada. O principal intuito dessa análise é verificar a existência de tendência de erros em alguma direção da carta avaliando se as discrepâncias obtidas podem ser consideradas estatisticamente iguais a zero.

A partir da obtenção das coordenadas dos pontos de controle, inicialmente foram calculadas as discrepâncias entre estas coordenadas conforme a equação 2.

$$\Delta X_i = X_i - X_{ic} \quad (2)$$

É válido ressaltar que as discrepâncias entre as coordenadas e as análises estatísticas foram obtidas em relação aos dois elementos que formam o par (Latitude e Longitude) viabilizando assim a determinação da direção do erro na carta observada.

A partir do cálculo das discrepâncias entre as coordenadas, bem como a determinação do tamanho da amostra utilizada para as análises estatísticas, foram calculados a média e o desvio padrão das mesmas a fim de que sejam parâmetros para determinar a tendência decorrente no mapa gerado.

Para que seja realizado o teste de tendência foram utilizadas as seguintes hipóteses:

$$H_0: \overline{\Delta X} = 0 \quad (3)$$

$$H_1: \overline{\Delta X} \neq 0 \quad (4)$$

Conhecendo as hipóteses a serem identificadas, foi realizado o cálculo da estatística amostral “t” com o intuito de verificar se o resultado está no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula, ou seja, se a média das discrepâncias pode ser considerada estatisticamente igual a zero.

O valor de “t” amostral é obtido da seguinte maneira:

$$t_x = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta x}} \sqrt{n} \quad (5)$$

Onde é o número de amostras utilizadas.

Para a análise do valor encontrado para “t”, este foi associado a um valor tabelado verificando, assim, a análise inicial de rejeitar ou não a hipótese nula. Dessa maneira, foi feita a análise *t student*, associada ao número de amostras (n) e ao nível de significância utilizado. O intervalo de confiança referente ao teste *t student* é dado da seguinte maneira:

$$|t_x| < t_{(n-1; \frac{\alpha}{2})} \quad (6)$$

Onde o valor de *t student* tabelado possui (n - 1) graus de liberdade um nível de significância.

Dessa maneira, caso o módulo calculado para o “t” amostral tenha sido menor que o valor de “t” tabelado aceita-se a hipótese nula ($\overline{\Delta X} = 0$), ou seja, o produto cartográfico obtido pode ser considerado livre de tendências significativas, contrariamente, caso a desigualdade não seja satisfeita, rejeita-se a hipótese nula ($\overline{\Delta X} \neq 0$) e significa que este apresentou erros significativos para um determinado nível de confiança. Uma vez que o PEC-PCD corresponde a um indicador estatístico com probabilidade 90% de confiança, o valor de “t” foi calculado considerando este nível de confiança.

Segundo [21] o fato de haver tendência indica possíveis erros em uma determinada direção sendo decorrentes por uma série de fatores. Contudo, conhecidas as discrepâncias e a direção das falhas, o seu efeito pode ser minimizado realizando o procedimento de subtração do seu valor em cada coordenada em análise da carta.

4.8.3 Análise de Precisão

De acordo com [32], a análise de precisão consiste na comparação da variância encontrada a partir das discrepâncias entre as coordenadas levantadas e as coordenadas da carta com o Erro Padrão (EP) avaliado pelo Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC em relação a classe em que se deseja avaliar a precisão da carta.

Desta forma, o teste de hipóteses formulado para análise da precisão foi dado da seguinte forma:

$$H_0: S^2_{\Delta x} = \sigma^2_x \quad (7)$$

$$H_1: S^2_{\Delta x} \neq \sigma^2_x \quad (8)$$

Onde corresponde ao desvio padrão ou erro padrão espadado de acordo com a classe do produto cartográfico analisado. Assumindo o valor da resultante gerada como sendo Erro Padrão e considerando ser equivalente nas componentes horizontais determinadas, tem-se que:

$$\sigma_x = EP / \sqrt{2} \quad (9)$$

Com estes parâmetros iniciais foi aplicado o teste Qui-quadrado amostral a fim de verificar se o desvio padrão das discrepâncias obtidas pode ser considerado, estatisticamente, igual ou menor que o Erro Padrão assumido para uma determinada classe do PEC-PCD.

O teste Qui-quadrado amostral foi dado da seguinte forma:

$$X_x = (n - 1) S^2_{\Delta x} / \sigma^2_x \quad (10)$$

A partir deste cálculo, foi realizada a análise do enunciado que diz respeito ao teste de hipótese onde utiliza-se o valor de qui-quadrado tabelado de acordo com a seguinte condição:

$$X^2_x \leq X^2_{(n-1; \alpha)} \quad (11)$$

Onde o valor de Qui-Quadrado tabelado possui (n - 1) graus de liberdade e um intervalo de confiança.

Desta maneira, utilizando um indicador estatístico de dispersão referente a 90%, verificou-se se a expressão da

equação 11 foi satisfeita para este nível de confiança, permitindo avaliar a aceitação ou rejeição da hipótese nula das discrepâncias obtidas (equação 2), verificando, assim, se o mapa atualizado atende à classe estabelecida de acordo com a precisão e sua escala.

4.8.4 Aplicação do PEC-PCD

Para a classificação do produto cartográfico determinou-se a qualidade estabelecida a partir da escolha e análise dos pontos de controle. Tais classificações estão diretamente relacionadas a escala em que este está representado.

De acordo com [31], determinação das amostras coletas (pontos de referência) deve ocorrer a partir de métodos em que o erro não seja superior a 1/3 do erro padrão esperado para a classe da carta em análise.

A Tabela 1 exibe a classificação do Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) planimétrico estabelecida na ET-EDGV.

Tab. 1– PEC-PCD

PEC (1984)	PEC-PCD (2011)	PEC Planimétrico	Erro Padrão Planimétrico
	A	0,28 mm X Fator de Escala	0,17 mm X Fator de Escala
A	B	0,5 mm X Fator de Escala	0,3 mm X Fator de Escala
B	C	0,8 mm X Fator de Escala	0,5 mm X Fator de Escala
C	D	1,0 mm X Fator de Escala	0,6 mm X Fator de Escala

5. RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Análises em campo das áreas modificadas

A identificação nas imagens do *Google Earth* dos locais onde ocorreram mudanças e as atividades em campo que validaram tais mudanças permitiram identificar que a categoria que mais sofreu alterações foi a categoria das edificações dos campi, conforme o quadro 1.

Quadro 1: Mudanças identificadas na área de Estudo

Tipo de Edificação	Mudança Ocorrida	Operacionalidade
Pavilhão de Aulas - Engenharias	Construção do novo prédio	Em andamento
Restaurante Universitário	Construção do novo prédio	Concluído
Pavilhão de Aulas - Ciências Humanas	Ampliação do pavilhão de aulas	Concluído
Pavilhão de Aulas - Escola de Música	Reconstrução do prédio	Em andamento
Pavilhão de Aulas - Escola de Dança	Ampliação do prédio	Em andamento
Pavilhão de Aulas - IHAC (Dois Prédios)	Construção de novos prédios	Em andamento
Escola de Medicina Veterinária	Ampliação dos prédios existentes	Concluído
Pavilhão de Aulas da Federação V (PAF V)	Construção do novo prédio	Concluído
Pavilhão de Aulas da Federação IV (PAF IV)	Construção do novo prédio	Concluído
Pavilhão de Aulas da Federação III (PAF III)	Construção do novo prédio	Concluído

Tipo de Edificação	Mudança Ocorrida	Operacionalidade
Instituto de Letras	Ampliação do prédio	Concluído
Faculdade de Comunicação	Ampliação do prédio	Concluído
Faculdade de Ciências da Computação	Construção do novo prédio	Em andamento
Instituto de Biologia	Ampliação do prédio	Concluído
Restaurante Universitário	Construção do novo prédio	Concluído
Anexos - Laboratórios de Pesquisa em Química (Dois Prédios)	Construção de novos prédios	Concluído
Laboratório de Físico-química	Construção do novo prédio	Em andamento
Biblioteca de Exatas	Construção do novo prédio	Concluído
Pavilhões de Aulas (Dois Prédios)	Demolição	Concluído
Pavilhões de Aulas (Dois Prédios)	Construção de novos prédios	Concluído

Além das novas edificações foram identificadas duas mudanças significativas, referentes a criação da Praça das Artes, localizada no Pavilhão de Aulas da Federação (PAF) e a ampliação da quadra de esportes da UFBA, localizada no instituto de Educação Física.

5.2 Calibração manual da Câmera

Para esta etapa da atividade, houve dificuldades relacionadas ao processo, uma vez que não foi possível remover a câmera do equipamento para acoplar a mesma em um tripé para que os alvos de calibração pudessem ser fotografados com os mesmos ângulos de inclinação e as mesmas distâncias. Além disso, as fotografias não podiam ser diretamente tomadas da própria câmera, sendo obtidas de forma indireta por meio do Tablet Samsung GT - N8000. Foram realizadas sete tentativas no intuito de encontrar os resultados esperados, contudo, percebeu-se, a partir da quarta tentativa, que os resultados obtidos não seriam satisfatórios, ou seja, o valor residual (Overall Residual RMS) não seria menor que 6 pixels utilizando a técnica desta forma. Este resíduo não é considerado ideal, uma vez que não viabilizou a determinação dos parâmetros de distorção descentrada, ou seja, o valor do RMS obtido foi muito alto. Então, para este trabalho foram utilizados os parâmetros de calibração obtidos de forma automática (autocalibração) pelo próprio *software Agisoft PhotoScan 1.3.0* para cada ortofoto digital gerada no processamento das imagens.

Apesar das falhas descritas, tal processo de calibração, permitiu constatar que a distância focal fornecida no manual da câmera não-métrica estava com alterações, uma vez que esta apresentava um valor de 5mm e os valores obtidos nas tentativas de calibração estavam, em média, correspondendo a 3,5mm. A figura 4 exibe os resultados obtidos na calibração em laboratório.

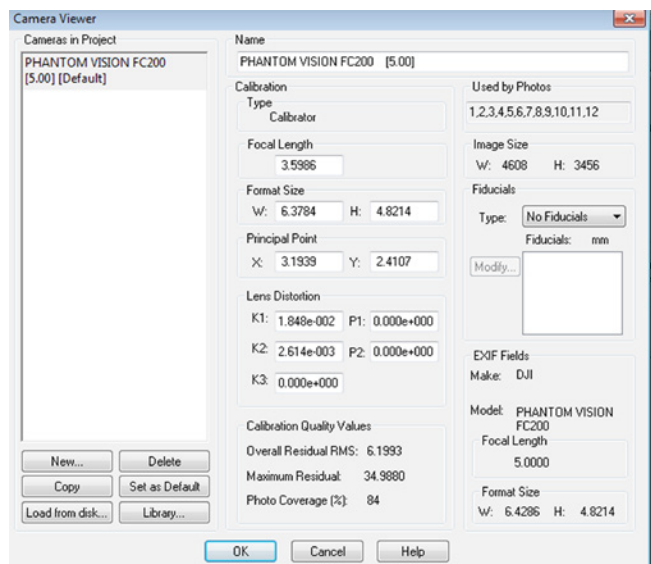


Fig. 4 – Parâmetros obtidos na calibração em laboratório

5.3 Planejamento, execução do voo para obtenção de fotografias e coleta dos pontos de controle

A partir da identificação das áreas onde ocorreram mudanças, foram elaborados os planos de voos destes locais. Foram realizados 20 planos de voos que estão expressos na tabela 2 que apresenta os aspectos referente a quantidade de faixas, número de fotografias tomadas e dimensões de cada voo. Na figura 5 é exibido um dos planos de voo elaborados para este trabalho a partir do *software pix4d*.

Tab 2: Especificações dos planos de vôos criados

Área sobrevoada	Quantidade de faixas de voo (unit.)	Dimensões do quadro de voo (m)
Escola Politécnica	4	79 x 61
São Lázaro - Restaurante Universitário	4	71 x 60
São Lázaro - Voo 1	4	114 x 77
São Lázaro - Voo 2	4	121 x 75
Portão Principal	5	174 x 105
Pav. Aulas (IHAC)	4	74 x 78
PAF V e Escola de Medicina Veterinária	5	101 x 91
PAF IV	4	91 x 61
PAF III	4	57 x 63
Ampliação do Instituto de Letras	5	63 x 86
Faculdade de Comunicação	6	63 x 145
Instituto de Biologia	5	67 x 84
Praça das Artes	7	110 x 156
Laboratório de Química (Anexos PAF I)	5	56 x 103
Lab. Química e Inst. Farmácia	7	126 x 151
Biblioteca de exatas	4	67 x 87
Fac. Arquitetura	5	100 x 100
Inst. Geociências (Voo 1)	5	100 x 94
Inst. Geociências (Voo 2)	5	89 x 89
Quadra - UFBA	6	87 x 140

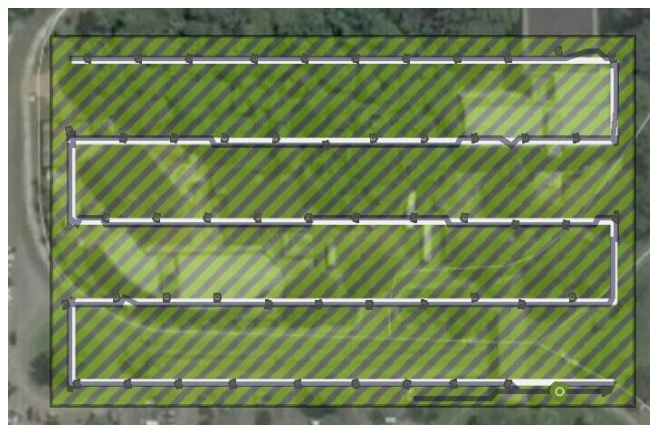


Fig. 5 - Plano de voo do Portão principal: Reconstrução do Instituto de Música e ampliação do Instituto de Dança. Fonte: Autoria própria (2018)

No momento da tomada das fotografias a dificuldade maior foi relacionada com a perda de sinal em algumas áreas. A perda de sinal impediu que algumas faixas de voo fossem executadas por completo, necessitando realizar a tentativa mais de uma vez, até obter as fotografias de acordo com o planejamento dos voos. Os locais onde ocorreram as perdas de sinais foram relacionados ao Pavilhão de Aulas da Federação, nas áreas que correspondem ao IHAC, PAF III, PAF IV e do Laboratório de Físico-química. Presumiu-se que a perda de sinal caracterizou-se pela existência de antenas na região e a existência de edificações no entorno da Universidade, com comprimento maior que a altura de voo utilizada.

Percebeu-se que houve uma boa nitidez dos elementos identificáveis nas fotografias. O horário e as condições climáticas favoráveis presentes no momento da execução dos planos de voos auxiliaram na obtenção de fotografias com melhor resolução radiométrica, uma vez que houve luminosidade suficiente na tomada destas. Contudo, percebeu-se também, que as telhas que revestem as edificações apresentaram-se nítidas nas imagens, com a presença de linhas arredondadas, verificado na figura 6. O formato arredondado em algumas imagens diz respeito a característica da câmera não-métrica ser grande angular no intuito obter grandes extensões no momento da tomada das fotografias.



Fig. 6 – Fotografia tomada do PAF III e do PAF IV

Apartir do levantamento de campo realizado a partir de rastreamento utilizando receptores GNSS, foram utilizadas as coordenadas de 30 pontos de controle para o processamento das fotografias e geração das ortofotos. É válido ressaltar que esta quantidade de pontos de controle equivale a quantidade total utilizada em todos os processamentos realizados.

5.4 Processamento das imagens

Para a geração das ortofotos digitais foi utilizado o *software Agisoft PhotoScan 1.3.0* e, a partir das fotografias obtidas, foram geradas sete ortofotos, cada uma delas refere-se às regiões onde ocorreram as tomadas de voos na área de estudo. Durante o momento do processamento das fotografias houve falhas relacionadas à obtenção das ortofotos digitais bem como seus respectivos modelos tridimensionais. Primeiramente, o processamento das fotografias foi realizado para cada plano de voo executado. Contudo, principalmente na região que diz respeito ao Pavilhão de Aulas da Federação, notou-se que nas ortofotos geradas referentes a área que contempla a Biblioteca de Exatas, os prédios anexos do PAF I e do instituto de farmácia obtiveram-se discrepâncias na faixa de dois metros das coordenadas das suas feições em relação às coordenadas homólogas dos pontos de controle coletadas em campo. Na tentativa de corrigir tais falhas, houve um reprocesamento das fotografias correspondentes ao pavilhão de aulas da Federação de forma conjunta, ou seja, para esta área foi gerada uma única ortofoto. Com isso, conseguiu-se solucionar as falhas relacionadas às discrepâncias obtidas para as áreas específicas, uma vez que o processamento permitiu a inserção de todos os pontos de controle coletados para esta área e, conseqüentemente, uma melhor distribuição dos mesmos.

Apesar do cálculo do GSD ser avaliado na etapa de planejamento de voo, nos resultados obtidos na etapa de calibração manual, conforme descrito no item 5.2, percebeu-se que o valor fornecido no manual do equipamento para a distância focal de 5mm estava incoerente com os valores obtidos na calibração de câmera em laboratório e, também, na autocalibração realizada no *software Agisoft Photoscan 1.3.0*, uma vez que, para as sete ortofotos geradas, obteve-se uma média de 3,2 mm de distância focal e, considerando uma altura de voo de 60m, o GSD obtido foi, em média, 0,025m.

É válido ressaltar que dos 30 pontos utilizados para o processamento, foram utilizados três em cada um deles, com exceção da área que contempla o Pavilhão de aulas da Federação em que foram utilizados 12 pontos de controle.

As figuras 7 e 8 exibem respectivamente o modelo tridimen-

sional e a ortofoto obtida para uma das regiões da área de estudo. A tabela 3 exibe os parâmetros obtidos no processamento das ortofotos no Photoscan.



Fig. 7 - Modelo Tridimensional: Portão Principal. Fonte: Autoria própria (2018)

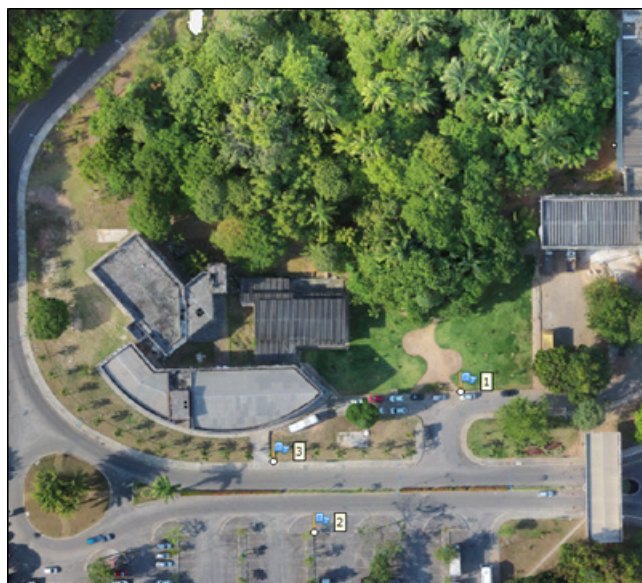


Fig. 8 - Ortofoto digital do Portão Principal. Fonte: Autoria própria (2018)

Ortofoto	Distorção Radial			Distorção Descentrada		Distância Focal (mm)	Posição da coordenada central	
	K1	K2	K3	P1	P2		Cx	Cy
Escola Politécnica	-0,569	0,377	-0,120	-0,001	0,00715	3727,59	38,819	-91,426
São Lázaro – Restaurante Universitário	-0,669	0,587	-0,341	-0,001	-0,0015	3727,59	18,1589	39,6892
São Lázaro - Pavilhão de Aulas	-0,702	0,612	-0,338	0,0002	0,0011758	3727,59	-5,4996	7,28132
Portão Principal	-0,369	0,174	-0,054	9,75E-07	-9,47E-05	2663,58	2,35613	19,2896
Pavilhão de Aulas da Federação	-0,357	0,157	-0,045	-7,23E-05	-8,83E-05	2586,92	1,38198	23,5861
Faculdade de Arquitetura e IGEO	-0,329	0,123	-0,028	-0,00016	-0,000249	2472,59	3,58938	34,9261
Quadra - UFBA	-0,714	0,622	-0,338	-0,00023	0,000521	3727,59	1,96	11,0666

Tab 3: Parâmetros obtidos no Photoscan

5.5 Verificação de Feições desatualizadas e a sua atualização

A geração do mapa atualizado foi compreendida pela mudança no Sistema Geodésico de Referência da base cartográfica do SICAD de SAD 69 para SIRGAS 2000 e, em seguida, a sobreposição das ortofotos geradas em relação a mesma realizando a vetorização e obtenção do mapa atualizado dos *campi*.

Em relação às mudanças identificadas na área de estudo, notou-se que ocorreram alterações das vias (meio-fio), vegetação e as edificações. Houve uma visualização e análise maior destas três camadas, uma vez que são as mais evidentes na área de estudo, em detrimento das outras que não possuem representação vetorial nesta região. Observou-se, também, que a construção e demolição de edificações foi a atualização mais pertinente do local, pois, além das mudanças na quantidade de edificações construídas, estas também interferiram diretamente nos outros elementos que compõem a área. Assim, a construção de novas edificações fez com que surtissem passeios e houvesse redução da densidade vegetativa de determinados locais e, de forma análoga, a demolição das mesmas ocasionaram mudanças nas áreas que compõem meio-fio e passeios.

A figura 9 exibe a planta atualizada correspondente a área de estudo dos *campi* da UFBA



Fig. 9 - Planta da UFBA atualizada. Fonte: Autoria própria (2018)

5.6 Controle de Qualidade Posicional

Neste item são apresentados os resultados obtidos para os testes estatísticos realizados em relação a classificação do produto cartográfico atualizado, conforme descrito no item 4.8.

Para a realização do cálculo do número de amostras,

considerou-se um intervalo de confiança (Z) de 99,5% e o erro amostral relativo (ϵ) como sendo 1/5 do desvio padrão amostral (σ).

O cálculo da população amostral utilizando o *software Dxf2xyz v.2.0* permitiu obter um valor de aproximadamente 24000 amostras. Neste software foram inseridos todos os arquivos vetoriais da base SICAD relacionados a área de estudo e extraído este valor. A substituição deste valor na equação 1 fez com que fosse obtido o valor mínimo de 24 amostras para área que caracteriza as delimitações da área de estudo dos *campi* da UFBA, utilizada neste trabalho. A avaliação do PEC-PCD foi fornecida no produto cartográfico atualizado (Figura 9)

A partir dos cálculos realizados, as tabelas 4 e 5 exibem, respectivamente, os valores das médias e desvios padrão encontrados para as discrepâncias em relação a N e E .

Quanto à análise de tendência, observou-se que a hipótese nula do teste *t student* (tabela 6) foi apenas aceita para a componente E do par de coordenadas planimétricas (N , E). Então, considerando 90% de confiabilidade, não existe a tendência de erros sistemáticos para esta direção, em detrimento da componente N , em que foi apresentada tendência de erros.

Tab 4: Média das discrepâncias

Média das Discrepâncias (m)	
ΔN	0,147
ΔE	-0,0876

Tab. 5: Desvio padrão das discrepâncias

Desvio Padrão das discrepâncias (m)	
$S^2_{\Delta N}$	0,308
$S^2_{\Delta E}$	0,266

Tab 6: Teste T Student

T-student	
$t_{(23;0,05)}$	1,714
N	2,34
E	-1,613

Em relação a análise de precisão (tabela 7), os resultados encontrados apresentam erro padrão esperado e o teste qui-quadrado realizado para uma escala de 1:2.000 abordado. Este produto foi aceito apenas para a classe B do Padrão de Exatidão Cartográfica.

Tab 7: Classificação do produto cartográfico

Teste Qui-Quadrado (23; 0,10) - 32,007		
PEC-PCD (1:2000)	Delta (E)	Delta (N)
A	37,88	28,15
B	12,17	9,04
C	4,38	3,32
D	3,04	2,26

5.7 Considerações finais

Uma vez que os resultados apresentados neste trabalho são relacionados com a obtenção da qualidade cartográfica do mapeamento gerado no que diz respeito ao processo de atualização destas áreas com VANT quadrotor, os principais aspectos considerados nesta pesquisa para a qualidade do produto final e a precisão dos dados estão relacionados a: quantidade e distribuição dos pontos de controle, tanto para o processamento dos dados quanto para a acurácia posicional do produto final, qualidade dos sensores embarcados, calibração da câmera, estabilidade da plataforma e processamento utilizando ferramenta computacional.

Notou-se que um dos aspectos que contribui para inexistência obtida no produto final está relacionado à baixa precisão do sensor embarcado, uma vez que o alto custo de sensores mais precisos aliados a instabilidade da plataforma e os riscos operacionais com os quais estas operam impossibilitam o seu uso.

Neste trabalho foram apresentados os resultados obtidos em relação a aplicação do VANT quadrotor DJI Phantom 2 para a obtenção de ortofotos em diferentes regiões de uma área de estudo que contempla elementos inerentes à zona urbana para fins de atualização cartográfica. Conclui-se que os métodos utilizados são satisfatórios, contudo, o sobrevoo de vinte áreas diferentes permitiu analisar que, à medida que mais regiões foram sobrevoadas, passaram a surgir dificuldades inerentes ao processo, evidenciando que o uso do equipamento se torna dificultoso a medida que a área de estudo aumenta. Dificuldades estas relacionadas às variações atmosféricas que provocam instabilidade da plataforma, inclinação da verticalidade da câmera no momento da tomada das fotografias e a inserção dos pontos de controle para o processamento, que em algumas regiões foi mais numeroso em relação a outras.

No que diz respeito à qualidade das câmeras digitais aliadas à melhoria das resoluções e um custo acessível no mercado, estes equipamentos são viáveis para a fotogrametria digital, contudo, as dificuldades ocasionadas no processo de calibração da câmera em laboratório impediram que fossem corrigidas todas as distorções radio-cêntricas provocadas, ou seja, quanto mais distante do centro, maiores distorções foram verificadas. Dessa forma, tal situação implicou diretamente na qualidade dos produtos finais obtidos para atualização dos elementos da base cartográfica do SICAD na escala de 1:2.000.

A etapa de acurácia posicional calculada para o produto final atualizado foi determinada para a escala de 1:2.000, estabelecendo uma compatibilidade entre a vetorização das ortofotos geradas e os elementos da base cartográfica do SICAD. O novo produto gerado apresentou resultados satisfatórios de acordo com as limitações e as dificuldades geradas inerentes ao processo. A viabilidade do método está relacionada às questões técnicas dos resultados obtidos a partir da acurácia posicional calculada do produto final gerado. Contudo, no que diz respeito a questões econômicas, as análises quanto ao uso do método em determinadas etapas, para fins de atualização cartográfica, demandaram o uso de atividades que arcariam custos elevados caso fossem aplicadas em demais áreas urbanas para estes fins. Dessa forma, caso uma determinada prefeitura demandasse um projeto de atualização

cartográfica para o seu município ou uma determinada área deste utilizando os métodos descritos neste trabalho, além dos gastos com a equipe técnica e equipamentos, poderão ser gerados gastos relacionados as repetidas idas a campo para a execução dos planejamentos de voos em áreas onde houve falhas relacionadas a perda de sinal e erros de arraste nas fotografias, coleta dos pontos de controle e obtenção dos resultados na etapa de processamento dos dados a fim de gerar resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho. Estas demandas poderão inviabilizar o uso desta técnica uma vez que o custo-benefício no que diz respeito aos prazos para entrega dos finais e os demais gastos na execução do projeto poderiam tornar a aplicação destes métodos não vantajosos para determinados órgãos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TAYLOR, D. R. F. A conceptual basis for cartography: new directions for the information era. The Cartographic Journal, London, v. 28, n.2, p.213-216, 199
- [2] Amorim, A.; Malaman, S. C.; Sass, G. G. A modernização dos processos de Atualização Cadastral e as Análises Temporais. Revista Brasileira de Cartografia, N; 65/2, p. 375-382. 2013.
- [3] AMORIM, A., SOUZA, G. H. B., SOUZA, G. G. B. DE Detecção de alterações aplicada à atualização do cadastro imobiliário. In: XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia, 2007, Rio de Janeiro. SBC. Rio de Janeiro: SBC, 2007. v.1. p.1 – 12.
- [4] SOUZA, G. H. B. DE; AMORIM, A.; HASEGAWA, J. K. Otimização de processos de detecção de alterações aplicados ao Cadastro Imobiliário. Revista Brasileira de Cartografia. Rio de Janeiro, V.64, n. 2, p. 149-158. 2012.
- [5] AMORIM, A., Utilização de modelos estereoscópicos híbridos na atualização cartográfica. (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo USP. São Carlos SP. 2000. 120p.
- [6] PINTO, M. S. ; AMORIM, A. Ortorectificação de imagem QuickBird com diferentes modelos digitais de terreno: análise da qualidade geométrica. Revista Brasileira de Cartografia. Rio de Janeiro, V.63, Ed. Especial dos 40 Anos da SBC, p. 65-74. 2011.
- [7] PAULINO, L. A.; CARNEIRO, A. F. T. Base de dados gráficos para Sistemas de Informações Geográficas (SIG's). Anais do Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário – COBRAC 98. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 1998.
- [8] VIEIRA, M. S.. Base cartográfica contínua do estado do Amapá. In: Revista Digital Simonsen. Rio de Janeiro, n.3, Nov. 2015. Disponível em: <www.simonsen.br/revistasimonsen> Acessado em 25 de setembro de 2018.
- [9] SAMPAIO, T. V. M.; BRANDALIZE, M. C. B. Cartografia Geral, Digital e Temática. Série Geotecnologias: teoria e prática; v. 1 - Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2018.
- [10] COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR-EB). Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV). Estrutura de Dados Geoespaciais Vetoriais (EDGV). Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Diretoria de Serviço Geográfico (DSG). 2010.
- [11] Rodrigues, D. A., & Silva, E. A. (2005) Extração de Feições em Imagens de Média e Alta Resolução. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005. 1229-1236.
- [12] Sluter, C. R., Camboim, S. P., Iescheck, A. L., Pereira, L. B., Castro, M. C., Yamada, M. M., & Araújo, V. S. (2018). A Proposal for Topographic Map Symbols for Large-Scale Maps of Urban Areas in Brazil. The Cartographic Journal, 55(4), 362-377.
- [13] ROSA, F. S. Viabilidade da atualização cartográfica. Departamento de Geografia. FFLCH-USP. Revista USP. V.8. 1994. Universidade de São Paulo.
- [14] CALDEIRA, C. R. T.; GALO, M.; IMAI, N. N.; GALO, M. DE L. B. T.; HASEGAWA, J. K.; AMORIM, A.; SHIMABUKURO, M. H.; PINTO, M. S. Detecção de mudanças de forma automática no entorno de reservatórios:

- estudo de caso - Canoas I. Revista Brasileira de Cartografia, v. 70, n. 4, p. 1348-1377, 15 dez. 2018.
- [15] TEDESCO, A. N. D. S.; ACCO, I. R. B.; SOUZA, J. C.. Estudo da geometria de imagens obtidas por VANT em faixa de duto, a partir de pontos de apoio GPS. Instituto Federal do Espírito Santo. Coordenadoria de Geomática. Curso Técnico em Geoprocessamento. 8p. 2013.
- [16] PEGORARO, A. J.. Estudo do potencial de um veículo aéreo não tripulado/ quadrotor, como plataforma na obtenção de dados cadastrais. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil). Pós-Graduação em Engenharia Civil. 217p. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2013.
- [17] QUARITSCH, M.; STOJANOVSKI, E.; BETTSTETTER, C.; FRIEDRICH, G.; HELLWAGNER, H.; RINNER, B. Collaborative microdrones: Applications and Research Challenges. Turim, Itália, 2008.
- [18] LAGE, M.O.; JUNIOR, L.A.; JULIÃO, R.P.; FILHO, L.E.; HO, L.L.; SIMÕES, A.J.M.; QUINTANILHA, J.A. Modelagem de parâmetros de um VANT equipado com LIDAR em aplicações de monitoramento de linhas de transmissão de energia elétrica. Revista Brasileira de Cartografia, N. 69/6, p. 1101-1115, 2017.
- [19] LAGE, M.O.; JUNIOR, L.A.; JULIÃO, R.P.; FILHO, L.E.; HO, L.L.; SIMÕES, A.J.M.; QUINTANILHA, J.A. Modelagem de parâmetros de um VANT equipado com LIDAR em aplicações de monitoramento de linhas de transmissão de energia elétrica. Revista Brasileira de Cartografia, N. 69/6, p. 1101-1115, 2017.
- [20] FONSTAD, Mark A. et al. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. Earth Surface Processes and Landforms, v. 38, n. 4, p. 421-430, 2013.
- [21] SZELISKI, R. Computer Vision: algorithms and Applications. London: Springer, 2010. 812 p.
- [22] LOWE, D. G. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features 1. Introduction. In: Proc., Corfu, Grecia. Anais... In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION. Corfu, Grecia: 1999.
- [23] WESTOBY M.J., BRASINGTON J., GLASSERN.F., HAMBREY M.J., REYNOLDS J.M. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications Geomorphology, 179: 300-314.
- [24] PAOLI, B. L.; TRINDADE, C. A.. Boas práticas do uso da técnica de Structure from Motion. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.
- [25] Plano Diretor de Desenvolvimento Físico e Ambiental da Universidade Federal da Bahia – Termo de Referência de 28 de abril de 2008. Disponível em: <https://www.ufba.br/sites/devportal.ufba.br/files/univers_nova.pdf> Acesso em janeiro de 2018. [12] F. Ekman, Mobility models for mobile ad hoc network simulations, Master's thesis, Helsinki University of Technology, May 2008.
- [26] ALMEIDA, I. C. Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife. 2014.
- [27] ELIAS, E. N. N.; MIRANDA, P. C. A.; CUNHA, A. A.; FERNANDES, V. O. Criação de uma Base de dados Geodésicas da Universidade Federal da Bahia (UFBA) disponível na web para auxílio em atividades de ensino e pesquisa. In: VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.
- [28] LUZ, C. C. Avaliação da exatidão absoluta de ortofoto obtida por meio de dados brutos oriundos de Veículos Aéreos Não Tripulados (SISVANT). Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Curitiba. Programa Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 2015, Paraná. 118p.
- [29] BOTELHO, M. F.; CENTENO, J. A. S. Reconstrução tridimensional de edificações utilizando dados LASER scanner aerotransportado. Boletim de Ciências Geodésicas
- [30] LIMA, E. M.; THOMAZ, T. A. M.; SEVERO, T. C. Mapeamento aerofotogramétrico digital utilizando fotografias de médio formato. Monografia (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.
- [31] BRASIL. Decreto Lei nº 89.817 de 1984. Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Brasil, 1984.
- [32] NOGUEIRA JR., J. B. Controle de qualidade de produtos cartográficos: uma proposta metodológica. Presidente Prudente. 2003, 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Cartográfica) - UNESP, Campus Presidente Prudente.
- [33] MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In: Technical Congress on Surveying and Mapping. Proceedings. v. 1, 1982.



BIBLIOTHECA DO EXERCITO

Missão

**Contribuir para o provimento,
a edição e a difusão de
meios bibliográficos
e informações necessárias
ao desenvolvimento e ao
aperfeiçoamento da cultura
profissional-militar e geral
dos públicos interno e externo.**

Visão do futuro

**Ser referência nacional e
internacional pela excelência
na publicação de acervos
bibliográficos que sejam
instrumentos de promoção
de cultura e de cidadania
para públicos interno e externo**

Princípios, crenças e valores

**Culto aos valores e às tradições
militares;**

**Competência técnico-profissional;
Confiabilidade; Planejamento.**

