



REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

Versão impressa: ISSN 0102-3543

Volume XXXIX - 2º Trimestre de 2022

ENGENHARIA MILITAR

Combatentes da Tecnologia,
Conjugando Saber e Valéria



Avaliação da trafegabilidade de viaturas militares em solos brasileiros – Pág 01

Redução de dimensionalidade por transformação linear adaptativa dependente de sinais aplicada a radares STAP – Pág 14

Análise comparativa de métricas topológicas em redes de coautoria para o problema de predição de links – Pág 21

Pontes e passarelas em pFRP: estudo comparativo e análise de processos de montagem – Pág 29

Gaseificação do eucalipto em leito fixo downdraft visando a obtenção de gás de síntese – Pág 47

Sistema de aeronaves remotamente pilotadas para detecção autônoma de entidades terrestres móveis em áreas restritas – Pág 62

Aplicação do método de solution blow spinning para a obtenção de nanofibras de polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) – Pág 79

Detecção de ataques cibernéticos utilizando aprendizado de máquina: uma revisão – Pág 89





REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

COMANDANTE DO EXÉRCITO:

Gen Ex Marco Antônio Freire Gomes

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA:

Gen Ex Guido Amin Naves

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO E CULTURA DO EXÉRCITO:

Gen Ex Flávio Marcus Lancia Barbosa

DIRETOR DA BIBLIOTECA DO EXÉRCITO:

Cel Art Eduardo Biserra Rocha

COMANDANTE DO INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA:

Gen Bda Juraci Ferreira Galdino

DIREÇÃO, IMPRESSÃO E DISTRIBUIÇÃO:

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

CORPO REDATORIAL:

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

EDITORES ASSOCIADOS EXTERNOS:

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

ADMINISTRAÇÃO, REVISÃO, PROGRAMAÇÃO E DIAGRAMAÇÃO:

- Coordenador: Rubenildo Pithon de Barros • Administração e OJS: José Welton Moreira • Revisores: Giana Elvira de Oliveira Marquês; Junielien de Oliveira Seipel; Diego Ribeiro Ferreira Serpa • Diagramador: Luiz Tadeu Carqueja Mota

PROJETO GRÁFICO, IMPRESSÃO E DISTRIBUIÇÃO:

BIBLIEEx

PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL



Desde 1949

"A Gráfica do Exército" - Compromisso com a Qualidade

Impresso na Gráfica do Exército

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

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

E-mail: divcmcl@graficadoexercito.eb.mil.br



**REVISTA MILITAR de
CIÊNCIA e TECNOLOGIA**

REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E

TECNOLOGIA - Volume XXIX

2º Trimestre de 2022

BIBLIOTECA DO EXÉRCITO

EDITORIA (BIBLIEEx)

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

3º andar - Ala Marcílio Dias

Centro - Rio de Janeiro-RJ

CEP 20.221-260

Tel.: (21) 2519-5707

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA - IME

Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha -

Rio de Janeiro-RJ - CEP 22.290-270 -

Tel.: (21) 2546-7115

Website: <http://rmct.ime.eb.br> - Email: rmct@ime.eb.br

ACESSE NOSSAS REVISTAS DIGITAIS



Nossa capa:

Homenagem ao Corpo de Engenheiros Militares



EDITORIAL



Caros leitores interessados na pesquisa e no desenvolvimento científico-tecnológico relacionados à Estratégia Nacional de Defesa, apresentamos a segunda edição do ano de 2022. Na edição do último trimestre, um novo patamar foi alcançado pela revista. Foi a primeira edição em que os artigos estão apresentados em português e inglês. Além disto, esses passaram a apresentar Digital Object Identifier (DOI), um sistema de identificação numérico para conteúdo digital. No ciclo anterior também brindamos o nosso público com dez artigos, que trataram de assuntos de cinco áreas do conhecimento: Engenharia civil, Engenharia Mecânica, Engenharia Mecatrônica, Engenharia de Computação e Engenharia Nuclear, com destaque para pesquisa sobre a criação de trajetórias de navios autônomos, em ambiente de simulação virtual.

Nessa edição, a pesquisa na área de Engenharia Civil apresentou uma avaliação da trafegabilidade de viaturas militares em solos brasileiros e realizou um estudo comparativo com análise de processos de montagem de pontes e passarelas em pFRP. No campo da Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações foi estudada a redução de dimensionalidade por transformação linear adaptativa dependente de sinais aplicada a radares STAP. A Engenharia Química nos brindou com um estudo sobre a gaseificação do eucalipto em leito fixo downdraft visando a obtenção de gás de síntese. Na pesquisa de materiais para Indústria de defesa foi apresentada uma aplicação do método de solution blow spinning para a obtenção de nanofibras de polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM). A área de Engenharia da Computação foi pesquisada através dos artigos: detecção de ataques cibernéticos utilizando aprendizado de máquina e análise comparativa de métricas topológicas em redes de coautoria para o problema de predição de links. Já a área de Mecatrônica e Inteligência Artificial foi desenvolvida no artigo sistema de aeronaves remotamente pilotadas para detecção autônoma de entidades terrestres móveis em áreas restritas.

A pesquisa científica proporciona a resolução de problemas relevantes para a sociedade e a Força Terrestre. Os resultados de um estudo, publicado em artigos, trazem novas metodologias e aplicações que trazem melhoria a diversos processos e produtos. Desta forma, o conteúdo de periódicos científicos pode propulsionar de forma direta o crescimento individual dos pesquisadores e de forma indireta o desenvolvimento nacional. Esperamos que nossos textos ajudem nesse caminho. Boa leitura!

Marcelo de Miranda Reis

SUMÁRIO

01

- Avaliação da trafegabilidade de viaturas militares em solos brasileiros

William Rubbioli Cordeiro, Maria Esther S Marques, Álvaro Vieira

14

- Redução de dimensionalidade por transformação linear adaptativa dependente de sinais aplicada a radares STAP

Carlos Cypriano Vallim Junior, Felipe Aurélio Caetano de Bastos, José Antonio Apolinário Junior

21

- Análise comparativa de métricas topológicas em redes de coautoria para o problema de predição de links

Mariana Magalhães de Mattos Coelho, Claudia Marcela Justel

29

- Pontes e passarelas em pFRP: estudo comparativo e análise de processos de montagem

Marcos Vasconcelos Diniz, Ana Maria Abreu Jorge Teixeira, Michèle Schubert Pfeil

47

- Gaseificação do eucalipto em leito fixo downdraft visando a obtenção de gás de sínteses

Tikinet Edição; Roberto Canuto Paiva, Luiz Eduardo Pizarro Borges, Fábio Bellot Noronha

62

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

Ricardo Maroquio Bernardo, Luis Claudio Batista da Silva, Paulo Fernando Ferreira Rosa

79

- Aplicação do método de solution blow spinning para a obtenção de nanofibras de polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM)

Karollyne G. C. Monsores, Anderson O. da Silva, Ricardo P. Weber, Marcos L. Dias

89

- Detecção de ataques cibernéticos utilizando aprendizado de máquina: uma revisão

Ricardo da Silveira Lopes, Julio Cesar Duarte, Ronaldo Ribeiro Goldschmidt

Avaliação da trafegabilidade de viaturas militares em solos brasileiros

*William Rubbioli Cordeiro, Maria Esther S Marques, Álvaro Vieira

Instituto Militar de Engenharia

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

*rubbioli987@yahoo.com.br

RESUMO: A trafegabilidade de solos é definida, resumidamente, como a capacidade de um veículo passar por um mesmo terreno um determinado número de vezes. Atualmente, no Exército as estimativas de trafegabilidade de solos são embasadas no tirocínio dos motoristas, o qual nem sempre alcança o evento almejado. Este artigo apresenta um método de avaliação da trafegabilidade, procurando avaliar os corredores de mobilidade que possam ser utilizados em manobras militares. Possui como premissas a verificação da resistência do solo, comparando-a com os tipos de veículos que transitarão pelo terreno. Apresenta resultados das pesquisas desenvolvidas em campos experimentais da Academia Militar das Agulhas Negras e do Centro de Avaliação do Exército. Propõe um protocolo para a verificação do índice de cone da viatura, assim como sugere ferramentas para a elaboração de mapas de trafegabilidade. Por fim, evidencia a necessidade da continuidade da pesquisa, aclamando a validação das propostas apresentadas.

PALAVRAS-CHAVE: Trafegabilidade de solos. Método de avaliação

ABSTRACT: Soil trafficability is briefly defined as the ability of a vehicle to traverse the same terrain a certain number of times. Currently, in the Army, estimates of soil trafficability are based on drivers training, which does not always reach the desired event. This work presents a method of evaluation of trafficability, trying to evaluate the mobility corridors that can be used in military maneuvers. It has as premise the verification of the soil resistance, comparing it with the types of vehicles that will traverse the terrain. It presents results of the research carried out in experimental fields of Military Academy and Army Assessment Center. It proposes a protocol for the verification of the cone index of the vehicle, and suggests tools for the elaboration of trafficability maps. Finally, it highlights the need for the continuity of the research, acclaiming the validation of the proposals presented.

KEYWORDS: Soil trafficability. Evaluation method.

1. Introdução

Para a movimentação das tropas no teatro de operações, as forças de combate necessitam de “corredores de mobilidade” (vias de acesso) que lhes assegurem o deslocamento de seus meios até atingirem seus objetivos. Os corredores de mobilidade variam com o tipo da tropa empregada na operação e formam vias de acesso para os diversos elementos de manobra de um determinado escalão (pelotão, batalhão ou brigada militar).

O sucesso de uma operação militar depende, entre diversos aspectos, da análise e da interação entre o terreno e as condições meteorológicas, visando à mobilidade das tropas. O resultado dessas análises é uma variável importante nas batalhas, distinguindo-se, por exemplo, entre uma região “trafegável” de outra

“não trafegável” para os veículos. São informações importantes para os estudos de situação elaborados pelo comandante da tropa e pelo seu Estado-Maior. Em determinados relatos históricos, algumas manobras de guerra tiveram dificuldades de alcançar êxito diante da falta de trafegabilidade das viaturas.

A trafegabilidade de veículos é definida como a capacidade dos solos de suportar a passagem de um veículo, pelo mesmo local, um determinado número de vezes [1].

A avaliação da trafegabilidade possui como premissa o estudo do veículo e a sua interação com o terreno. Nessa técnica, o equipamento para ensaio de campo, penetrômetro de cone, possui um papel importante nas análises. Os resultados desses ensaios são considerados conjuntamente com os testes dos veículos em pistas experimentais [2].

O manual de campanha do Exército Brasileiro (EB) C5-38 [3] apresenta um método de análise de trafegabilidade. Aquele foi elaborado pelo exército dos Estados Unidos da América (EUA) por meio de ensaios de campo no país ao longo de mais de cinco décadas. Ou seja, os modelos de análises têm por base as pesquisas em solos de regiões de clima temperado e características peculiares dos seus campos de testes.

Nos estudos conduzidos por Vieira [1], obteve-se a conclusão de que os parâmetros de cálculo adotados para os solos de regiões temperadas (EUA e Europa) não são adequados para os solos brasileiros. Por outro lado, o método, a utilização dos equipamentos adotados pelo Exército Americano, como o penetrômetro de cone, as definições das variáveis de análise e outras informações são pertinentes de serem utilizados para as pesquisas com solos nacionais. Assim, os conceitos apresentados na literatura constituem significativo subsídio para o desenvolvimento de tecnologia própria do Exército Brasileiro no campo da trafegabilidade de veículos militares. No entanto, alerta a necessidade de adequá-las às nossas características peculiares de solo, vegetação, clima, geologia, equipamentos, métodos e veículos.

Por outro lado, o método apresentado neste artigo é de emprego dual. Pode ser utilizado em situações de defesa nacional, mas também é adequado ao cotidiano civil de determinadas atividades, tais como as práticas de avaliação da compactação do solo agricultável. Outra possível aplicação dual do método é a elaboração de um sistema de gerenciamento de estradas rurais nas localidades de difícil acesso de tráfego automotivo. Esse sistema pode, por exemplo, permitir às prefeituras a elaboração de planejamentos de manutenção de rodovias municipais. Possibilita, assim, a elaboração de mapas de trafegabilidade sazonais (estação chuvosa e seca), facilitando o apoio nas calamidades públicas e na logística humanitária. Outra ciência que se utiliza dos equipamentos e alguns métodos aqui apresentados é a engenharia agrícola.

O estudo sobre a trafegabilidade de solos pode ser descrito por duas linhas de pesquisa distintas, dependendo dos objetivos a serem alcançados: 1) avaliação da trafegabilidade; 2) previsão da trafegabilidade. Uma comparação pragmática entre essas está na

finalidade de cada estudo. Enquanto a avaliação de trafegabilidade visa à demarcação de corredores de mobilidade para o pronto emprego da tropa (tática), a previsão de trafegabilidade almeja inferir o emprego da tropa em situações futuras (estratégica), definindo, por exemplo, tipo de viatura a ser utilizada em determinada área, tipos de pneus a serem empregados nos veículos, período do ano para o melhor emprego das tropas em decorrência das missões e das condicionantes climáticas à época das operações. [2].

O objetivo deste artigo é apresentar os principais aspectos para a avaliação da capacidade de trafegabilidade em situações “fora de estrada”, como também os resultados de avaliação da trafegabilidade das viaturas logísticas obtidos em ensaios de campo. Os testes foram realizados em áreas militares da Academia Militar das Agulhas Negras (Aman), Resende/RJ, e do Centro de Avaliação do Exército (CAEx), Rio de Janeiro/RJ.

2. Desenvolvimento

A possibilidade de um veículo se locomover em terrenos com baixa capacidade de suporte é influenciada por vários parâmetros. Cita-se o tipo de veículo, as habilidades do motorista, as características do relevo e solo, os obstáculos naturais e artificiais, o cenário climático e as circunstâncias da missão militar [1]. Ainda, as condições de contorno que aprofundam as modelagens da trafegabilidade são a resistência ao rolamento do veículo e a capacidade de suporte do terreno para resistir aos esforços do tráfego [4]. Esses esforços são consequências da aplicação de cargas verticais e horizontais no solo e das respostas desse às solicitações.

Corriqueiramente no EB, as avaliações de trafegabilidade de solos são embasadas no tirocínio individual dos motoristas militares. Não é empregado qualquer método científico nessas estimativas. As Fig. 1a e 1b contextualizam o fenômeno “atolar” e exemplificam que o tirocínio individual nem sempre alcança o objetivo de ultrapassar uma região de baixa capacidade de tráfego sem uma prévia análise do terreno.



Viatura Guarani (1a)



Viatura Astros (1b)

Fig. 1 – Viaturas impossibilitadas de trafegar. Fonte: [2]

A caracterização de um determinado terreno em termos de trafegabilidade exige a consideração de muitos parâmetros inter-relacionados, alguns deles de difícil determinação. Assim, muitos desses fatores precisam ser estimados ao invés de medidos [1]. Cientificamente, o processo de análise da trafegabilidade requer a congregação de tecnologias de diversos campos do conhecimento, como terramecânica, agronomia, engenharia agrícola, meteorologia, geotecnica, geomorfologia, cartografia e outras (tema multidisciplinar).

As propriedades físicas do solo podem ser alteradas após o tráfego de veículos, principalmente por veículos militares pesados. Segundo Schlosser [5], a técnica de avaliação de trafegabilidade pode orientar a ordem de marcha de uma coluna de veículos. Assim, diferentes tipos de veículos, com os respectivos índices de cone da viatura (ICV), podem ser organizados racionalmente para ultrapassar uma determinada região, considerando a interação terreno *versus* veículo, a respectiva mobilização do solo e sua possível perda de resistência pelo efeito do tráfego. Barbosa *et al.* [6] ratificam essa observação ao analisarem a diferença do efeito da intensidade de tráfego em linha reta e pivotada, mostrando que o cisalhamento provocado pelo tráfego dos veículos no solo também é decorrente da forma do deslocamento, seja esse em linha reta ou em curva.

Genericamente, a capacidade de tração dos solos depende de sua resistência ao cisalhamento [7]. Limitando-se à trafegabilidade, a resistência ao cisalhamento de solos é decorrente da combinação das

tensões normais e tangenciais ocasionadas pelo tráfego dos veículos, as quais produzem deformações plásticas na estrutura da superfície de apoio dos veículos [2].

Na avaliação da trafegabilidade, a resistência ao cisalhamento dos solos é avaliada *in situ*. Sabe-se que essa avaliação é realizada pela interpretação empírica dos ensaios, e os resultados são compilados em um índice denominado índice de cone (IC). Solos com valores maiores de IC apresentam maiores resistências ao cisalhamento, e vice-versa. O IC do solo é obtido pelo uso do equipamento penetrômetro de cone, o qual representa a resistência de um solo à penetração de um cone de 30º, com 0,5 pol² de área de base [3]. Esse índice reflete a resistência ao cisalhamento do solo durante a penetração do cone atrelado a um medidor de tensão [8].

O penetrômetro de cone possui emprego na área militar (por ser um equipamento portátil e robusto). Sua utilização também se estende às áreas da agronomia e da engenharia agrícola. Os penetrômetros de cone utilizados atendem às normas ASAE S313.3 [9] e ASAE EP542. [10]. As Fig. 2a e 2b exemplificam tipos de penetrômetros de cone.



Penetrômetro Analógico (2a)



Penetrômetro Eletrônico (2b)

Fig. 2 – Exemplos de penetrômetros de cone. Fonte: [2]

3. Apresentação de um método brasileiro de avaliação da trafegabilidade de solos

Em um reconhecimento especializado de engenharia, após avaliado o índice de cone do solo (IC), esse é comparado com o índice de cone da viatura (ICV), e assim é definida a trafegabilidade daquele terreno para aquele tipo de veículo. Se a IC for maior

que as tensões de cisalhamento aplicadas pelo veículo na superfície do terreno (interpretadas por $IC > ICV$), a viatura terá condições de trafegabilidade naquele local. Ou seja, se o solo oferecer uma resistência maior do que a viatura exige para trafegar, então o terreno é dito “trafegável”; caso contrário, “não trafegável” para a viatura em questão [2].

Observa-se que o parâmetro é dependente das condições de resistência do solo na oportunidade da avaliação. Então, essa observação possui um “prazo de validade curto”, visto que a interferência das condições meteorológicas, como as precipitações de chuvas, pode afetar a resistência do solo.

O estudo de trafegabilidade está voltado para a “capa superficial do terreno”, em torno de 60 cm de profundidade. Essa camada é naturalmente heterogênea. Suas propriedades podem variar muito de um ponto para outro, mesmo dentro de uma única área topográfica.

Por exemplo, seu comportamento *in-situ* referente ao fluxo de água (permeabilidade natural) é muitas vezes controlado por macroporos, fraturas, nível do lençol freático, camadas de resistências diferentes, existência de organismos vivos e outros aspectos. E essas características locais podem se alterar de um ponto para outro no terreno [2]. Vennik *et al.* [11] realizaram medições e simulações de profundidade de sulco (camada crítica) devido a passagens únicas e múltiplas de um veículo militar em diferentes tipos de solo.

As avaliações da trafegabilidade de solos têm por finalidade reunir as informações do terreno, comparando-as com as características das viaturas, e consolidar essas informações em mapas temáticos de trafegabilidade.

A título de implementação do método, sugere-se que essas avaliações sejam realizadas em tempo de paz, podendo ser validadas por meio de pesquisas empíricas. Por vezes, padrões de desempenho de uma região podem ser transferidos para outra, considerando características similares específicas e limitações de cada modelo.

A utilização de penetrômetro eletrônico pode trazer algumas vantagens em relação ao analógico. Por exemplo, conjugando os resultados de IC com as coordenadas geográficas dos pontos de uma campanha de reconhecimento do terreno, é possível montar mapas de trafegabilidade com as características da área em estudo.

O penetrômetro eletrônico exemplificado na Fig. 2b (penetroLOG) é fabricado pela empresa Falker. Possui um sistema de controle de velocidade de ensaio por meio de um sensor de emissão/recepção de ultrassom, o qual é refletido por uma base de metal. Quando a velocidade de ensaio ultrapassa o valor previsto em norma, o sistema alerta o operador. Também, esse equipamento avalia o IC ao longo do perfil de solo durante o ensaio, com a precisão de até 1 cm de profundidade, armazenando até 2.000 leituras (pontos). Estes dados podem ser transmitidos para um computador portátil por meio de *software* específico de análise de dados, denominado “Compactação do Solo”. A Fig. 3 exemplifica o resultado gráfico de um ensaio de penetração em uma areia de praia, exposto no *software* mencionado. As coordenadas geográficas desse ponto foram obtidas por meio de um aparelho de GPS (Sistema de Posicionamento Global) acoplado ao equipamento no momento da coleta das informações.

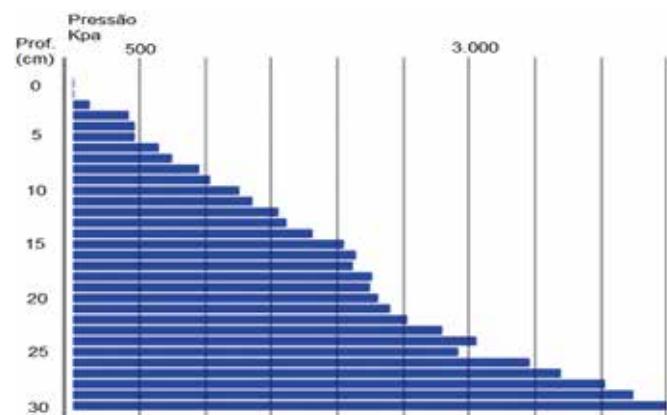


Fig. 3 – Resultado gráfico de um ensaio de IC (kPa), na Praia do Forte São João – Urca (Rio de Janeiro/RJ). **Fonte:** [2]

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foi verificado que a Falker é uma empresa brasileira que produz o penetrômetro eletrônico e os respectivos *software* e implementos em escala comercial. A empresa também disponibiliza um sistema de elaboração de mapas de solo, o qual conjuga as coordenadas geográficas e os respectivos resultados dos ensaios de IC obtidos ao longo dos perfis de ensaio. Esse sistema é denominado de FalkerMap.

O esquema da Fig. 4 apresenta um exemplo de um mapa de solos de uma área separada em glebas, numeradas de 39 a 50, com os respectivos IC nas profundidades 15 cm, 30 cm e 45 cm. Esse mapa de solo foi elaborado por meio da compilação de resultados de ensaios realizados com o penetrômetro de cone eletrônico, os quais foram “importados” e organizados no FalkerMap por meio de um sistema de informações geográficas.

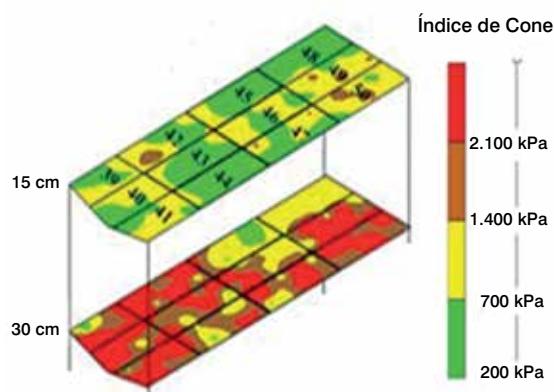


Fig. 4 – Esquema de mapas do solo separado em camadas com os respectivos valores médios de IC. **Fonte:** [2]

Interpretando o esquema, verifica-se que na gleba 44 (Fig. 4) os resultados de IC da camada de 15 cm de profundidade estão situados entre 200 e 700 kPa (legenda na cor verde); na gleba 50, nessa mesma profundidade, os resultados estão situados entre 700 e 1.400 kPa (legenda na cor amarela). No contexto da trafegabilidade de solos, um veículo com ICV de 800 kPa e profundidade da camada crítica de 15 cm não trafegaria na gleba 44 ($IC < 700$). Mas, ao optar por trafegar em outra gleba, trafegaria na maior parte da gleba 50 (Fig. 5), pois nela o IC é superior ao ICV ($IC > ICV$).

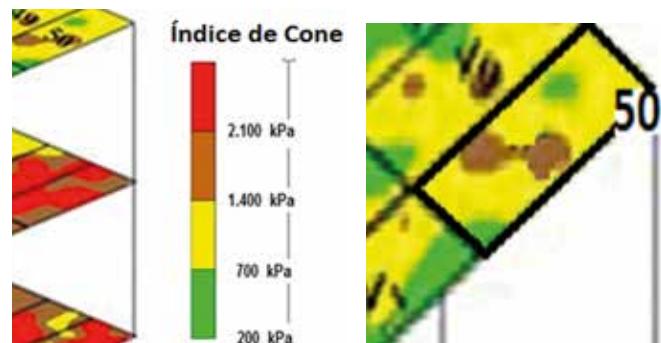


Fig. 5 – Detalhes do esquema de mapas do solo separado em camadas com os respectivos valores de IC. **Fonte:** [2]

Diante das peculiaridades do tema trafegabilidade, o penetrômetro eletrônico apresenta algumas vantagens em relação ao penetrômetro analógico.

- O meio acadêmico tem utilizado esse equipamento para análises na área agronômica; assim, as pesquisas desenvolvidas podem complementar os estudos do terreno de um teatro de operações.
- O equipamento pode ser operado por um único indivíduo, enquanto o manual C5-38 [3] especifica duas pessoas para a utilização do penetrômetro analógico. Cita-se outras características do penetrômetro eletrônico:
 - permite a coleta do IC de forma automatizada ao longo do perfil em análise, possui um mecanismo de controle de velocidade durante o ensaio, possui uma discretização de resultados a cada 1 cm e atinge profundidades suficientes para as análises da trafegabilidade;
 - durante a operação, o armazenamento dos ensaios é automático, sendo inclusive facilitado pelo *software* “Compactação do Solo”;
 - os dados do penetrômetro eletrônico podem ser tratados em um mapa;
 - é fabricado e comercializado por uma empresa brasileira, indo ao encontro das orientações governamentais de fomento da “indústria nacional de defesa”; e
 - é um equipamento de simples emprego e adequado a ser transportado individualmente.

3.1 Descrição do terreno e respectivo IC

A observação sistemica do comportamento da resistencia do solo permite entender que determinados tipos de terreno sao mais suscetiveis à perda da capacidade de suporte perante às alterações sazonais meteorológicas. Normalmente, esses estão localizados em áreas planas ou suavemente onduladas. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [8] define os seguintes tipos de topografia de terreno, qualificados pelo critério de declividade (Tabela 1):

Tabela 1 – Classes de declividade do terreno.

Classes de declividade	Declive (%)
Plano	0% a 3%
Suave ondulado	3% a 8%
Ondulado	8% a 20%
Forte ondulado	20% a 45%
Montanhoso	45% a 75%

Fonte: IBGE [12]

Dessa forma, a simples discriminação do terreno em um mapa de declividades já proporciona uma qualificação de locais a serem ponderados quanto à trafegabilidade. Afinal, explicado até mesmo pela morfologia do terreno, os solos de declividade plana (0% a 3%) podem ser formados por sedimentação natural de processos erosivos (solos transportados). Sendo assim, são considerados, em sua maioria, solos jovens, os quais despertam a necessidade de maiores estudos sobre a sua resistência. É relevante destacar que essa é uma primeira análise, tendo em vista a necessidade da conjugação de outras variáveis para melhor esclarecer a possibilidade de um veículo trafegar em um terreno.

A Fig. 6 apresenta um esboço que relaciona a topografia do terreno com a sua respectiva resistência (IC), concluindo-se pela dificuldade de trafegabilidade. Por exemplo, em um contexto geral, no extremo do gráfico pode-se exemplificar um solo de alta resistência e de topografia plana, o qual provavelmente apresentará uma grande facilidade de trafegabilidade para vários tipos de veículos. Por outro lado, um terreno ondulado e de baixa resistência apresentará elevada dificuldade de trafegabilidade, como é o caso das regiões de dunas litorâneas ou mesmo de dunas em zonas desérticas.

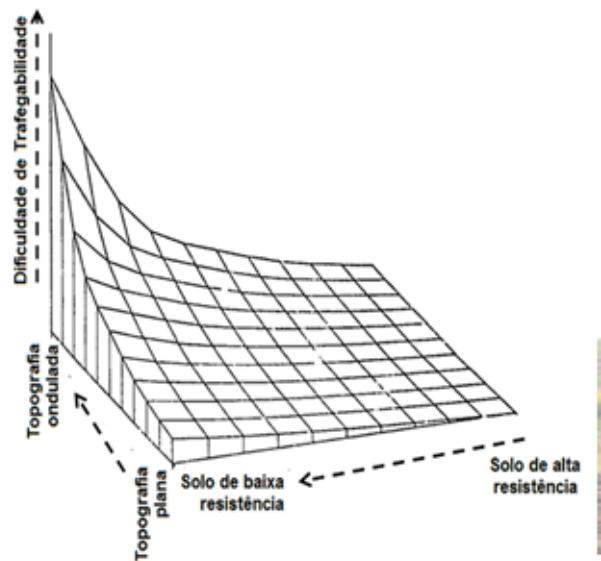


Fig. 6 – Esboço de correlação entre as características de resistência do solo e topografia com a dificuldade de trafegabilidade. **Fonte:** [2]

O emprego sistemico de imagens aéreas auxilia em muito a demarcação de regiões para uma averiguação inicial. Para tal, é facultada a utilização das mais diversas fontes de informações, mas destaca-se nessa pesquisa a utilização sistemica de veículos aéreos não tripulados (VANT) na obtenção de imagens atualizadas das áreas em estudo.

3.2. Estudos do índice de cone da viatura (ICV)

O ICV é o índice atribuído a uma dada viatura que indica a resistência mínima do solo, em termos de IC, necessária para as passadas da viatura em uma pista teste. É um parâmetro peculiar de cada viatura que resume empiricamente os esforços que aquela exerce nas camadas superficiais do terreno com a finalidade de trafegar. Esse índice decorre das características técnicas do veículo, como a pressão exercida no solo, tipo de tração, carga por roda, potência do motor, tipo de rodado (pneu ou esteira), entre outros parâmetros, todos interagindo com as características do terreno [2].

Valores baixos de ICV são atribuídos ao melhor desempenho do veículo em termos de capacidade de trafegabilidade “fora de estrada”. Uma viatura de ICV igual a 480 kpa indicará que essa possui atributos compatíveis com terrenos de IC superiores a 600 kpa, por exemplo (ICV < IC).

As viaturas sob lagartas estão, normalmente, mais aptas a trafegar em terrenos de baixa capacidade de suporte (IC baixos) comparadas a alguns caminhões logísticos ou mesmo algumas viaturas administrativas. As Fig. 7a e 7b apresentam dois tipos de viaturas militares que possuem desempenhos distintos em relação à trafegabilidade, sejam essas sob lagartas (7A) ou sob rodas (7B). Essas viaturas empregam solicitações diferentes no solo, e, portanto, possuem ICVs distintos. Por exemplo, a maioria das viaturas sob lagartas apresentam ICVs menores que a maioria das viaturas pesadas sob rodas. Nesse contexto, o ICV é um parâmetro atribuído a uma dada viatura, o qual indica os esforços de cisalhamento que o veículo aplica no solo para que possa se locomover. Quanto menor o ICV, melhor é o desempenho do veículo quanto à trafegabilidade.



Fig. 7 – Viaturas de desempenho diferentes. **Fonte:** [2].

O parâmetro do índice de cone da viatura pode ser modelado por meio de expressões matemáticas, mas esses modelos demandam calibrações constantes, diante da quantidade de variáveis que interferem na operacionalidade das viaturas. Assim, esse índice é melhor avaliado por meio de experimentos empíricos em pistas experimentais padronizadas ou pistas naturais controladas. Nelas, é possível medir os teores de umidade e a resistência do solo, registrando a interação do veículo com terreno. Procura-se a comparação da situação da viatura “atolada” com o respectivo IC da pista, formulando-se a questão: qual o menor IC da pista (ou do terreno) em que o veículo consegue ultrapassar? Esse valor remete à definição do ICV.

No contexto da trafegabilidade, a Fig. 8 exemplifica alguns experimentos em execução nos campos de teste Aberdeen Test Center, o qual possui diferentes tipos de pistas e respectivos protocolos de ensaios de viaturas militares [13].



Fig. 8 – Exemplo de teste de trafegabilidade sendo realizado em pistas preparadas artificialmente. **Fonte:** [13].

3.2.1 Proposta de um protocolo de testes empíricos

No ensaio de definição do ICV são utilizadas pistas experimentais, sejam essas naturais ou artificiais.

3.2.1.1 Pista experimental artificial

Apresenta-se, a seguir, uma proposta de pista experimental artificial, esboçando um protocolo de teste para a definição do ICV das viaturas que são avaliadas no Centro de Avaliação do Exército (CAEx).

Acompanhando as técnicas de avaliação empírica das análises de tratores pela engenharia agrícola, entende-se que as pistas artificiais devem ser construídas com os tipos de solos “extremos” de dificuldade de trafegabilidade.

Portanto, elencam-se, como proposta, dois tipos de pistas padronizadas: uma com o solo tipo areia e outra com o solo fino de baixa resistência. As pistas padronizadas para os testes de trafegabilidade devem possuir as seguintes características:

- plana, com inclinações próximas a 0%;
- preparada, para absorver a água e assim aumentar a umidade, quando for conveniente;

- possuir um sistema para simular a precipitação de chuva;
- possuir as condições de operação de equipamentos que possam revolver a camada de solo superficial, como tratores equipados com implementos de grade de disco, enxada rotativa, e outros;
- possuir, no mínimo, 50 m de comprimento, 8 m de largura e 2 m de profundidade;
- não deverá possuir materiais que possam servir de obstáculos durante os ensaios, como pedras ou outros; e
- deverá possuir uma superfície regular, evitando-se as considerações da irregularidade do terreno que interfiram na trafegabilidade.

Os esquemas das Fig. 9 e Fig. 10 apresentam a geometria da proposta de “pista padronizada”, adaptados de Francisco [14], bem como os aparelhos de simulação de chuva para umedecimento do terreno e equipamentos eletrônicos de medição de velocidade de deslocamento e filmagem dos ensaios.

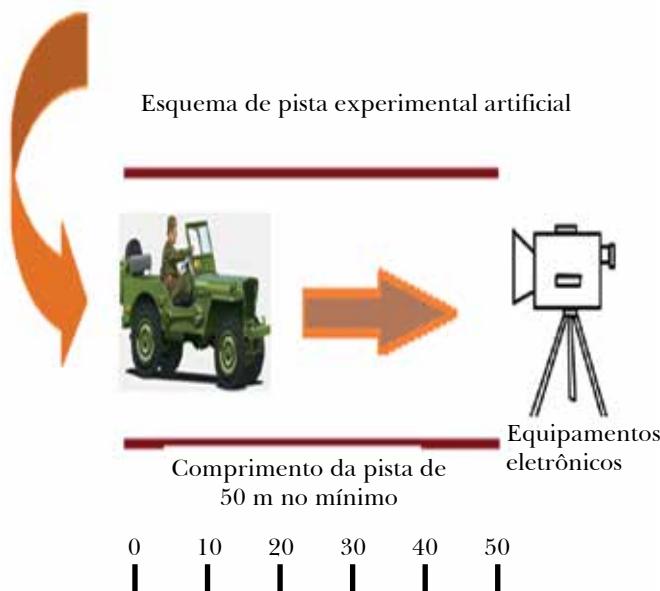


Fig. 9 – Esquema em planta da pista padronizada de teste de trafegabilidade. Fonte: [2].

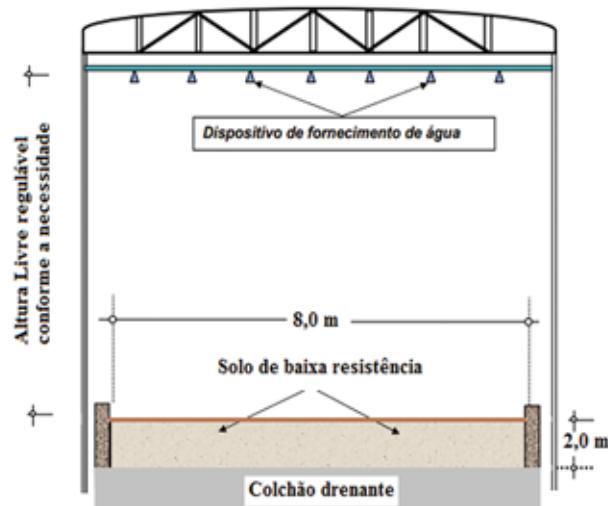


Fig. 10 – Esquema em corte transversal da pista padronizada de teste de trafegabilidade. Fonte: [2].

Os equipamentos eletrônicos de medição (Fig. 8) têm as seguintes finalidades: 1) filmar cada passagem durante os testes, permitindo análises posteriores; e 2) medição da velocidade de deslocamento, e definir o parâmetro do ICV.

3.2.1.2 Pistas experimentais naturais

As pistas naturais de teste deverão ser analisadas antes dos ensaios propriamente dito. Deverão ser obtidos parâmetros como o tipo do solo e sua respectiva classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (Sucs), da camada superficial da pista até a profundidade de 60 cm. Também devem ser considerados parâmetros da situação *in situ* do terreno, como a umidade do solo antes do início dos testes, peso específico aparente natural, porosidade do solo e grau de saturação.

Também pode ajudar na caracterização dessas pistas experimentais naturais a utilização de equipamentos portáteis tipo “Vane Test” [2].

A fim de atingir a situação de “não trafegável” nessas pistas, o terreno poderá ser molhado até a situação de saturação do solo durante a realização dos testes.

3.3 Apresentação do método de ensaio

Os ensaios para a definição do ICV são realizados nas pistas experimentais. Cabem algumas observações a serem contempladas na proposta de protocolo de teste de ICV.

- Os testes devem ser realizados em dias não chuvosos, a fim de evitar interferências externas.
- O desempenho é previsto para cada veículo operando isoladamente.
- O ICV passa a ser definido por meio de uma interpolação gráfica obtida durante os ensaios na pista padrão, visando atender à limitação de velocidade supracitada. Essa forma de definição diminui a subjetividade exposta nas bibliografias relativas ao tema, favorecendo a elaboração de um protocolo de ensaio a ser adotado pelo CAEx.
- As características do veículo durante a execução do ensaio devem ser:
 - ✓ carga máxima permitida, com tanque de combustível cheio;
 - ✓ todas os mecanismos de melhoria de trafegabilidade funcionando, ou seja, tração total, controle de tração, ou outras; e
 - ✓ calibragem dos pneus correspondente ao tipo de solo, conforme as orientações do fabricante.
- As características de execução do ensaio devem ser:
 - ✓ a umidade inicial da pista de solos finos deve ser correspondente a um teor que leva a iniciar os testes na situação desfavorável à trafegabilidade;
 - ✓ deslocamento em primeira marcha das viaturas;
 - ✓ velocidade de deslocamento no início do teste, ou seja, na entrada da pista, em torno de 20 km/h;
 - ✓ deslocamento em linha reta, evitando virar a direção para tentar sair da situação de atoleiro;
 - ✓ repetição dos procedimentos do ensaio para a validação das interpretações; estima-se que sejam necessárias três repetições para ratificar os resultados obtidos.

O teste na pista inicia-se pela caracterização do IC inicial e a respectiva umidade do solo. Na sequência,

a viatura posiciona-se para o teste no início da pista, a uma velocidade de entrada na área de ensaio em torno de 20 km/h. Inicia-se, então, a primeira passada da viatura. Durante isso, a velocidade é aferida por meio de equipamentos eletrônicos. Na sequência, completada a primeira passada, é aferida a profundidade da camada crítica. A pista é, então, revolvida (e molhada, se for o caso), piorando as condições de trafegabilidade. Entende-se que a cada “piora” das condições de trafegabilidade, a velocidade de deslocamento diminui.

A definição da condição “atolar” nesta pesquisa foi ajustada à variável temporal. De forma geral, é caracterizada a situação como “não passa”, durante os testes em pistas, se a viatura ficar atolada (imobilizada) por dez segundos, tentando sair do local.

O ensaio é repetido n vezes, aferindo-se a nova “velocidade de deslocamento” e o IC correspondente à cada passada da viatura. Quando a viatura atola (impedita por dez segundos), os testes são interrompidos e são medidos o IC do solo e a profundidade da camada crítica. O IC deverá ser medido no entorno das rodas do veículo, identificando-se o menor dos valores desse índice naquele momento. Coletam-se amostras de solos para a identificação da umidade. Os resultados de cada passada são processados e, então, condensados em um gráfico de: IC *versus* Velocidade de Deslocamento. A partir de então, é inferido o ICV.

Entende-se que quanto pior for a condição de trafegabilidade do solo, o veículo encontra maior resistência ao deslocamento, e, por tal motivo, diminui a sua velocidade. A fim de esclarecer lacunas das bibliografias sobre o tema, o critério para a definição do ICV foi correlacionado às práticas militares. De tal modo, tendo por base que a velocidade de marcha a pé da tropa é de 4 km/h (dados de manual militar), definiu-se que o limite mínimo de velocidade de deslocamento nas pistas testes de identificação de ICV deverá ser:

- Viaturas Logísticas $\geq 5,0$ km/h;
- Viaturas Operacionais $\geq 10,0$ km/h

Ou seja, o ICV passa a ser definido, a favor da segurança, por meio de um critério técnico de velocidade de deslocamento, e não mais de forma subjetiva. Tal critério de ICV é, então, entendido como o mínimo de velocidade aceitável nos deslocamentos táticos.

Ratificando, o ICV é uma característica técnica de uma dada viatura, que se relaciona à resistência mínima do solo necessária para as passadas de tal viatura em uma pista teste, atendendo ao critério de velocidade mínima de deslocamento. Esse índice procura resumir todas as qualidades de trafegabilidade que esse veículo possui, admitindo-se que esteja se deslocando em velocidade baixa, constante, no plano e sem tracionar reboque.

4. Resultados de avaliação da trafegabilidade obtidos em ensaios de campo

Os locais em que foram realizados os ensaios *in situ* são o campo de instrução da Aman e as áreas de teste de avaliação do CAEx. Os motivos que levaram à escolha dessas áreas são os tipos de terrenos mais comuns naquelas glebas, sendo os solos com textura fina na área da Aman e os solos arenosos típicos de região litorânea na área do CAEx.

Karafiath [15] mencionou que até 1977 não existia nenhum sistema de classificação de solos adotado por técnicos que estudam terramecânica. Tal argumentação foi ratificada ao longo dos estudos de trafegabilidade realizados por Cordeiro [2], o qual apresenta que não existem classificações de solos específicas para as análises da interação “terreno *versus* veículo”. Cabe ressaltar que os ensaios foram realizados com o apoio logístico e técnico de engenheiros agrônomos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e militares do Curso de Engenharia da Academia, nos ensaios realizados na Aman, como também dos militares do CAEx nos ensaios realizados no centro de avaliação [2].

Diante de uma dificuldade logística de construção de uma pista teste padronizada, a pesquisa deu continuidade tendo por orientação as pistas em terreno natural dos campos de teste mencionados.

Para tal, serviram de motivação as pesquisas realizadas com tratores na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria/RS e da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa/MG, as quais se valem de terrenos naturais para as atividades de ensaios.

4.1. Testes *in situ* realizados na Aman

A Fig. 11 apresenta alguns ensaios realizados no campo de instrução da Aman (Resende/RJ), em pista de terreno natural.

A área de teste na Aman trata-se de uma região plana, com solo hidromórfico (muito mal drenado). A Fig. 12b traz em detalhe os locais de teste 1 e 2. O local 2 apresentou dificuldades de trafegabilidade para todas as viaturas ensaiadas, mas no local 1 todas as viaturas obtiveram êxito no deslocamento.

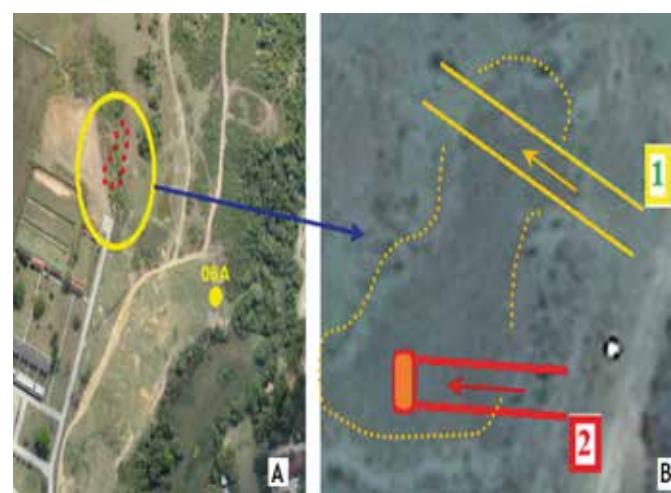


Fig. 11 – Local dos ensaios realizados na Aman. **Fonte:** [2]

A falta de trafegabilidade apresentada no local 2 da Fig. 11b foi constatada por meio do penetrômetro eletrônico. As Fig. 12a e Fig. 12b apresentam a realização dos ensaios de avaliação da trafegabilidade dos solos. Na oportunidade, foi constatado que a capacidade de suporte do local 2 estava incompatível com os esforços de cisalhamento aplicados pelos veículos na superfície do terreno. Assim, o solo não apresentou trafegabilidade, ou seja, $IC < ICV$.

Os ensaios, conforme foram realizados no campo de instrução da Aman, serviram para validar a percepção da diferença entre veículos e a heterogeneidade do solo. Um fato a ser destacado é que esses locais se distanciam em menos de 30 m, mas oferecem características diferentes o bastante para apresentarem capacidades de trafegabilidade distintas.

Ainda, apresentado na Fig. 12, diante da necessidade da utilização da placa repetidora do penetroLOG, foi adaptada uma “boia” para amparar a referida placa durante os testes com presença de lâmina d’água. Tal adaptação remete à investigação de leitos de cursos d’água, identificando-se o IC de vaus possíveis de serem utilizados nas travessias em manobras militares.



Teste de IC com penetrômetro de cone eletrônico

Fig. 12 – Ensaios na Aman. Fonte: [2]

Nesse sentido, a fim de avaliar a proposta de método para a definição do ICV, foram conduzidos ensaios *in situ* no CAEx e na Aman com viaturas administrativas do Exército. A Fig. 13 representa alguns ensaios realizados no campo de prova do Aman (Resende/RJ), local 2.



Viatura Marruá-teste em local de solo com textura fina.

Fig. 13 – Ensaios realizados na Aman. Fonte: [2]

4.2. Testes *in situ* realizados No CAEx

A Fig. 14 apresenta alguns ensaios realizados no campo de prova do CAEx (Rio de Janeiro/RJ), em pista de terreno natural, com solos arenosos em região de praia ou em terreno de mangue.



Fig. 15 – Viatura Marruá em teste de trafegabilidade em solo arenoso típico de região litorânea (A) e Viatura Hilux em solo típico de mangue (B). Fonte: [2]

Nos testes realizados foram adotados os métodos empíricos resumidos na seção 3.2 deste estudo, a fim de aferir o ICV que pudesse caracterizar a capacidade das viaturas em relação à trafegabilidade.

4.3. Resultados alcançados nos dois locais de testes

Nos testes realizados foram adotados os métodos empíricos resumidos no tópico 3.2 deste artigo, a fim de aferir o ICV que permitisse a trafegabilidade das viaturas no terreno. A Tabela 2 apresenta as características básicas das viaturas que participaram desses ensaios.

Tabela 2 – Descrição das viaturas.

Viatura operacional Marruá 4x2, marca Agrale
peso máximo na roda: 745 kgf (sem a carga)
Viatura transporte Hilux, marca Toyota
peso máximo na roda: 967 kgf (sem a carga)
Viatura transporte logístico marca Volk
peso máximo no conjunto de roda dupla: 2185 kgf (sem a carga)
Viatura caçamba de 10m ³ , marca Mercedes-Benz
peso máximo no conjunto de roda dupla: 1620 kgf (sem a carga)

Fonte: [2]

A Tabela 3 resume os valores obtidos nos ensaios de identificação de ICV, por meio da interpretação de valores obtidos nas pistas, como também em testes de campo em outras oportunidades ou dados técnicos de bibliografias. Essa tabela apresenta os resultados em kPa e Psi, a fim de possibilitar futuras avaliações com bibliografias do Exército Americano, visto que nos manuais daquele exército as unidades adotadas para os cálculos do ICV resultam em valores em Psi.

Tabela 3 – Valores de ICV das viaturas ensaiadas.

Tipo de Viatura	ICV (kPa)	ICV (Psi)
Marruá	470	69
Hilux	540	79
Volk	800	116
Caçamba	930	135

Fonte: [2]

A viatura logística marca Volk apresentou maiores facilidades de trafegabilidade comparada à caçamba (local de teste 2 – Aman). Tal fato pode ser explicado pelo peso na roda da primeira ser maior que o peso na roda da segunda, quando as duas viaturas encontram-se sem carga.

As viaturas logísticas (administrativas) ensaiadas apresentaram desempenhos similares.

5. Conclusão

Este artigo apresentou os principais aspectos para a avaliação da trafegabilidade.

Destaca-se que é necessário desenvolver um modo peculiar e regional para que os especialistas do terreno possam interpretar as informações disponíveis de uma dada região. Essa conveniência remete-nos aos conceitos de hierarquização da técnica de avaliação ou previsão de trafegabilidade. Ou seja, as análises iniciais podem fornecer um parecer provisório do terreno.

Mas esse parecer pode ser construído, reformado, manutenido e ampliado ao longo do

tempo das atividades de validação das modelagens. Nesse sentido, a utilização do método alicerçado no penetrômetro de cone apresenta-se como o principal processo de estudo do terreno para inferir a resistência do solo. Tal equipamento possui a vantagem da robustez necessária às atividades táticas de combate e oferece resultados que expressam a variabilidade do terreno.

Mais especificamente, o penetrômetro de cone eletrônico traz vantagens significativas à avaliação da trafegabilidade em comparação ao analógico. A proposta de identificação do índice de cone do veículo embasada na velocidade mínima de deslocamento define um método menos subjetivo, comparando-se ao descrito nas bibliografias.

Os resultados colhidos de ICV nos campos experimentais da Aman e do CAEx dão credibilidade ao método proposto e, principalmente, estabelecem parâmetros importantes para o planejamento tático de operações militares que envolvem a trafegabilidade das viaturas analisadas neste estudo.

Acredita-se que as inovações desta pesquisa tenham a capacidade de convidar os especialistas do terreno da Arma de Engenharia a maiores aprofundamentos na matéria mobilidade de tropas militares.

Afinal, a quantidade de variáveis para a análise do terreno vai além das considerações técnicas, estendendo-se à individualidade humana da condução do veículo. Por outro lado, as técnicas de avaliação de trafegabilidade são ferramentas poderosas para o planejamento de operações militares.

Por fim, a avaliação da trafegabilidade em corredores de mobilidade na faixa de fronteira brasileira é um exemplo da aplicação desse método. A condução de estudos estratégicos para as definições de corredores de trafegabilidade a serem aplicados nessa região do Brasil contribui para a garantia da soberania nacional.

Referências

- [1] VIEIRA, Á. Trafegabilidade dos Solos: Modelagem e Aplicações. Relatório de pesquisa. Vicksburg: U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1994.
- [2] CORDEIRO, W. R. Método de avaliação e de previsão da trafegabilidade de viaturas militares em solos brasileiros. Tese (Doutorado em Engenharia de Defesa) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.
- [3] BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. Estado-Maior. Portaria nº 149-EME, de 19 de dezembro de 2001. Aprova o Manual de Campanha C 5-38 – Estradas, 1^a edição, 2001. Boletim do Exército, Brasília, DF, n. 52, 2001.
- [4] LINARES, P. Análisis de la movilidad de vehículos militares en caminos de características desconocidas. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid, 1995.
- [5] SCHLOSSER, J. F. Comunicação pessoal. Professor da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). 2009-2013.
- [6] BARBOSA, B. W.; PEDRON, F. A.; MÜLLER, C. R.; RODRIGUES, M. F.; GUBIANI, P. I.; SCHENATO, R. B.; DALMOLIN, R. S. D. Physical properties of a Brazilian sandy loam soil after the traffic of a military vehicle M113BR. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 44, p. 1-25.
- [7] BARGER, E. L.; LILJEDAHL, J. B.; CARLETON, W. M.; MCKIBBEN, E. G. Tratores e seus motores. São Paulo: Edgard Blucher, 1963.
- [8] BEKKER, M. G. Introduction to terrain-vehicle systems. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1969.
- [9] ASAE – AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil Cone Penetrometer. In: Agricultural Engineers Yearbook. St. Joseph: ASAE, 1999.
- [10] ASAE – AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Procedures for using and reporting data obtained with the Soil Cone Penetrometer. In: Agricultural Engineers Yearbook. St. Joseph: ASAE, 1999.
- [11] VENNIK, K.; KUKK, P.; KREBSTEIN, K.; REINTAM, E.; KELLER, T. Measurements and simulations of rut depth due to single and multiple passes of a military vehicle on different soil types. Soil & Tillage Research, v. 189, p. 120-127.
- [12] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manuais Técnicos em Geociências, número 4. Manual Técnico de Pedologia. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.
- [13] US ARMY. Vehicle test facilities at aberdeen test center and yuma test center. Test Operations Procedure 01-1-011A. 2012.
- [14] FRANCISCO, G. M. Proposta de validação de um modelo para a avaliação da trafegabilidade dos solos inserida no estudo de situação de inteligência. Dissertação (Mestrado em Ciências Militares) – Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro, 2004.
- [15] KARAFIATH, L. L. Soil mechanics for off-road vehicle engineering. Switzerland: Trans Tech, 1978.

Redução de Dimensionalidade por Transformação Linear Adaptativa Dependente de Sinais Aplicada a Radares STAP

Carlos Cypriano Vallim Junior^{*a}, Felipe Aurélio Caetano de Bastos^b, José Antonio Apolinário Junior^b

^aCentro de Avaliações do Exército (CAEx)

^bInstituto Militar de Engenharia

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

^{*}cvallimjr@yahoo.com.br

RESUMO: Uma das principais aplicações do processamento adaptativo de espaço-tempo (*space-time adaptive processing – STAP*) é a detecção de alvos por sistemas de radar de busca e vigilância, notadamente para radares aerotransportados e possivelmente em presença de sinais interferentes fortes. Todavia, o crescente número de elementos empregados na construção de arranjos de antenas (*phased array antennas*) produz um volume de dados de processamento que inviabiliza a implementação prática de processamento de posto completo e limita a aplicabilidade de técnicas de posto reduzido quando são considerados a atual tecnologia de hardware e os requisitos de sistemas de tempo-real. Este trabalho se propõe a pesquisar e especializar um método de redução de posto por transformação linear (*reduced-rank linear transformation – RLT*) adaptativa, dependente de sinal, ao processamento de espaço-tempo de sistemas de radar. Verificar-se-á a redução de complexidade computacional resultante da aplicação do método RLT selecionado, bem como seu desempenho em termos de outras métricas do STAP, o qual será comparado com outras técnicas de redução de posto disponíveis na literatura. A fim de verificar seu desempenho, a aplicação do método RLT ao STAP será empregada no cenário de uma plataforma radar fixa em presença de clutter e jamming intensos.

PALAVRAS-CHAVE: Processamento Adaptativo de Espaço-tempo (STAP). Processamento em posto reduzido. Filtro de Wiener multiestágios. Refletores de Householder. Arranjo planar. Radar de plataforma fixa.

ABSTRACT: One of the key applications of space-time adaptive processing (STAP) is the detection of targets by surveillance radar systems, most notably by airborne radars and possibly in presence of strong interference signals. Notwithstanding, the ever growing number of elements used to build phased array antennas yields an amount of processing data that prevents practical implementation of full-rank processing and imposes a limit to the applicability of reduced-rank techniques as far as hardware technology and real-time systems requirements are concerned. This work proposes the application of an adaptive and signal dependent reduced-rank linear transformation (RLT) method to radar systems space-time processing. One will verify the computational complexity reduction resulting from the application of the method, as well as its performance in terms of STAP metrics, will be compared with other established reduced-rank techniques available in the literature. In order to verify its performance, the application of the RLT method to STAP radar systems will be employed on a scenario with a fixed platform, in presence of strong clutter and jamming scenario.

KEYWORDS: Space-time Adaptive Processing (STAP). Reduced-rank processing. Multistage Wiener filter. Householder reflectors. Planar array. Fixed platform radar.

1. Introdução

O processamento de espaço-tempo, usualmente referido como processamento adaptativo de espaço-tempo (*space-time adaptive processing – STAP*), é empregado em problemas de detecção, rastreamento e sensoriamento em radares [1]. O STAP consiste na exploração conjunta da dependência espacial (angular) e temporal (desvio Doppler) dos alvos de interesse a serem detectados por um sistema de radar e dos sinais interferentes a serem cancelados, para obter ganho de desempenho no processamento dos sinais de radar em relação ao

processamento de sinais convencional, i.e., filtragem espacial e filtragem temporal, sequenciais e separadas.

Embora o processamento de sinais de um sistema de radar convencional seja suficiente para a supressão de alvos fixos por plataformas radar fixas, o emprego de um processamento 2D (bidimensional), i.e., o STAP, por um radar fixo, e.g., um radar de vigilância aérea, permanece atrativo na presença de interferências cujos parâmetros estatísticos não são conhecidos *a priori*, conforme demonstrado experimentalmente em [2]. A aplicação do STAP por uma plataforma fixa na presença de níveis elevados de interferência permanece pouco explorada na literatura.

Tal fato, aliado à potencial aplicação em projetos de radares fixos militares e civis em curso ou a médio e longo prazo, enseja maiores estudos nesse cenário.

O problema de redução da dimensão dos dados recebidos no processamento de espaço-tempo atraí cada vez mais o interesse de novas pesquisas, haja vista que o crescente número de elementos sensores em arranjos de antenas produz volumes de dados desafiadores para o processamento de sinais, especialmente quando se contempla a aplicação em sistemas operando em tempo-real. Todavia, outra motivação relevante, que também direciona a pesquisa atual sobre o problema de processamento de posto reduzido, reside na escassez de dados de apoio para a estimativa de parâmetros estatísticos em ambientes realistas, decorrente do caráter intrinsecamente não-estacionário da componente de *clutter* radar, que limita a quantidade de dados disponíveis para estimativa dos parâmetros estatísticos da interferência ambiental, durante o período de iluminação do alvo pelo radar [3]. Algumas técnicas de posto reduzido são capazes de sobrepujar, em cenários específicos, a insuficiência de dados de apoio descorrelacionados do sinal do alvo de interesse para estimar a matriz de covariância das interferências. Graças à aplicação dessas técnicas, essa matriz torna-se inversível, possibilitando a filtragem de espaço-tempo. Além disso, as técnicas de posto reduzido resultam, em algumas situações, em desempenho superior às técnicas de posto completo [3]. Alguns algoritmos de redução de posto têm atraído muito interesse por apresentar desempenho superior, em determinadas aplicações e sob determinadas circunstâncias, às técnicas de posto completo e viabilizarem aplicações práticas [4], [5]. Uma técnica de redução de posto estatística por transformação linear adaptativa popularmente empregada por aplicações de *beamforming* é o filtro de Wiener multiestágios (*multistage Wiener filter* – MWF) [6], [5]. Uma implementação eficiente da sua matriz de bloqueio pode ser obtida empregando a transformação de Householder [7]-[9].

Neste artigo objetiva-se especializar uma técnica de redução de posto por transformação linear (*reduced-rank linear transformation* – RLT) adaptativa dependente

de sinal para a inversão da matriz de covariância das interferências de modo a viabilizar o STAP em sistemas de radar. Espera-se obter redução de complexidade computacional e ganho de desempenho em relação às técnicas de posto completo para estimativa de covariância. A especialização da técnica proposta será particularizada para o cenário de sistemas de radar fixos na presença de elevados níveis de interferência, com vistas a futuras aplicações práticas.

Este artigo encontra-se organizado da seguinte forma: na seção 2 é apresentado o modelo de sinal de espaço-tempo aplicado a um cenário com radar aerotransportado dotado de arranjo linear uniforme (*uniform linear array* – ULA), além do processador STAP de interesse; na seção 3 aplica-se o método de filtragem de posto reduzido HMWF (*householder multistage Wiener filter*) ao processamento STAP de um radar móvel com ULA; na seção 4 explora-se a aplicação do método HMWF, de posto reduzido, a um radar fixo com arranjo retangular uniforme (*uniform rectangular array* – URA); na seção 5 apresentam-se os resultados das simulações implementadas; e, por fim, na seção 6 são discutidas algumas das conclusões obtidas, destacando-se as contribuições alcançadas.

2. Modelagem de sinais para ULA

O processamento do receptor radar modelado pode ser ilustrado como na Fig. 1, na qual observa-se que toda a filtragem de espaço-tempo é realizada no estágio com rótulo “STAP”, cuja saída, $Z[l]$, é comparada a um limiar de detecção.

Considere-se um radar *phased-array* STAP móvel com um arranjo linear uniforme (ULA) com N elementos e intervalo de processamento coerente (*coherent processing interval* – CPI) que integra M pulsos coerentes (ou amostras temporais de *slow-time*). O intervalo de repetição de pulsos é amostrado com taxa $1/L$, sendo L o número de amostras de *fast-time*.

O transmissor do radar emite uma forma de onda pulsada, $S_{TX}(t)$. O sinal de eco analítico recebido pelo n -ésimo canal de recepção, relativo ao alvo de interesse e convertido para banda-base, é dado pela expressão [3], [10]

$$S_{RX}(t) = \frac{A_{tgt}}{\sqrt{2}} e^{j\psi} S_{TX}(t - \tau_{tgt}) e^{j2\pi\vartheta_{tgt}} e^{j2\pi f_{tgt} t}, \quad (1)$$

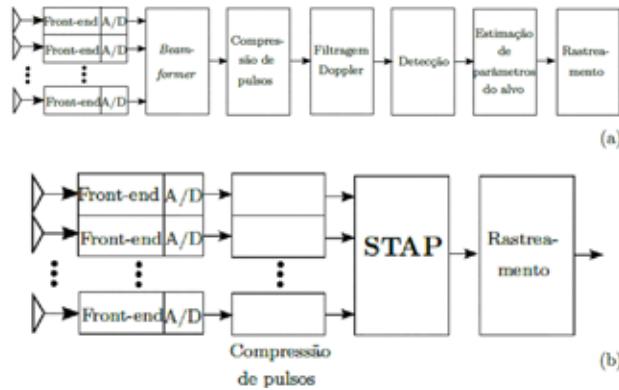


Fig. 1 – Comparação entre diagramas em blocos de (a) um Processador Radar Convencional e (b) um Processador Radar STAP.

onde A_{tgt} é a amplitude do eco, τ_{tgt} é o retardo de propagação eletromagnética, que abrange o tempo desde a emissão da forma de onda pulsada até a recepção do sinal de eco, $\psi = -2\pi(f_c + f_{tgt})\tau_{tgt}$, f_c é a frequência da portadora, f_{tgt} é a frequência Doppler devida ao movimento do alvo, $\vartheta_{tgt}(\theta_{tgt}, \phi_{tgt}) = \frac{d}{\lambda_c} \cos \theta_{tgt} \sin \phi_{tgt}$ é a frequência espacial do alvo, sendo θ_{tgt} e ϕ_{tgt} , respectivamente, os ângulos de elevação e azimute do alvo. Os sinais de eco são submetidos a filtros casados em cada canal para compressão de pulsos. Após a compressão de dados, o sinal de eco é dado por [3], [10]

$$\chi_{mn}(t) = \beta_{tgt} e^{j2\pi\vartheta_{tgt}(\theta_{tgt}, \phi_{tgt})} e^{j2\pi f_{tgt} \frac{m}{PRF}} \times \chi(t - \tau_{tgt} - \tau_p - \frac{m}{PRF}, 0) \begin{cases} n = 0, 1, \dots, N-1 \\ m = 0, 1, \dots, M-1 \end{cases} \quad (2),$$

sendo $\beta_{tgt} = (A_{tgt}/\sqrt{2}) e^{-j2\pi f_c \tau_{tgt}}$, τ_p a largura de cada pulso e $\chi(t, f)$ a função de ambiguidade do filtro casado implementado pelo estágio de detecção do receptor do radar. Amostra-se o sinal comprimido, $\chi_{mn}(t)$, nos instantes $t = t_0 + 1/f_s + m/PRF$, onde t_0 é o instante inicial do l -ésimo range gate, $l = 0, 1, \dots, L-1$ e $f_s > 2B_p = 2c/2\Delta R$ é a frequência de amostragem do intervalo entre pulsos sucessivos (PRI), sendo B_p a largura de banda do pulso e ΔR a resolução em alcance do radar. Portanto, o sinal amostrado pode ser expresso como [3], [10]

$$x_{mn}[l] = \zeta_l e^{j2\pi\vartheta_{tgt}} e^{\frac{j2\pi f_{tgt} m}{PRF}}, \begin{cases} n = 0, 1, \dots, N-1; \\ m = 0, 1, \dots, M-1; \\ l = 0, 1, \dots, L-1, \end{cases} \quad (3),$$

onde $\zeta_l = \beta_{tgt} x(t_0 - lf_s - \tau_{tgt} - \tau_p, 0)$. A amplitude do sinal descrito pela equação anterior é máxima quando $t = t_0 + 1/f_s \approx \tau_{tgt} + \tau_p$, isto é, equivalente à maximização de $|x_{mn}[l]|$ quando o l -ésimo range gate corresponde ao alcance do alvo de interesse. Portanto, o sinal comprimido, $x_{mn}[l]$, corresponde ao nm -ésimo elemento do l -ésimo snapshot de espaço-tempo do CPI considerado, que compõe os dados de entrada do filtro STAP conforme anteriormente observado.

O detalhamento de uma modelagem simplificada para as interferências (*clutter*, *jamming* e ruído) pode ser encontrada em [10].

O snapshot de espaço-tempo recebido pelo arranjo de sensores correspondente ao l -ésimo range gate, de dimensão $M \times N$, é representado pela sua vetorização, $\mathbf{r}[l] \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ e descrito pela expressão [3]

$$\mathbf{r}[l] = \alpha_{tgt}[l] \mathbf{s}(\vartheta_{tgt}, f_{tgt}) + \mathbf{i}[l] \quad (4),$$

onde a componente de sinal é $\alpha_{tgt}[l] \mathbf{s}(\vartheta_{tgt}, \varpi_{tgt})$. O steering vector de espaço-tempo é dado por $\mathbf{s}(\vartheta_{tgt}, \varpi_{tgt}) = \mathbf{a}(\vartheta_{tgt}) \otimes \mathbf{b}(\varpi_{tgt})$, onde \otimes indica o produto de Kronecker, sendo [3]

$$\mathbf{a}(\vartheta_{tgt}) = [1 e^{(-j2\pi\vartheta_{tgt})} \dots e^{(-j2\pi(N-1)\vartheta_{tgt})}]^T \quad (5) \text{ e}$$

$$\mathbf{b}(\varpi_{tgt}) = [1 e^{(-j2\pi\varpi_{tgt})} \dots e^{(-j2\pi(M-1)\varpi_{tgt})}]^T \quad (6),$$

respectivamente, as componentes espacial e temporal [3], λ_c é o comprimento de onda da portadora, d é espaçamento entre os elementos do arranjo de antenas, Φ_{tgt} é o ângulo de azimute do alvo de interesse e ϖ_{tgt} é a frequência Doppler, normalizada em relação à frequência de repetição de pulsos (*pulse repetition frequency* – PRF) do radar. O vetor interferência-mais-ruído de espaço-tempo, $\mathbf{i}[l]$, resulta da soma das interferências (*clutter* e *jamming*) e do ruído presentes no l -ésimo range gate.

Os *snapshots* recebidos pelo ULA são submetidos ao filtro de espaço-tempo, $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$, produzindo a saída escalar complexa [3]

$$\mathbf{z}[l] = \mathbf{w}^H \mathbf{r}[l] \quad (7).$$

A fim de maximizar a probabilidade de detecção, PD , aplica-se o filtro MVDR (*minimum variance distortionless response*) de espaço-tempo [3]

$$\mathbf{w}_{MVDR} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}}{\mathbf{s}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}} \quad (8),$$

sendo $\mathbf{R} = E[\mathbf{r}[l] \mathbf{r}^H[l]]$ a matriz de covariância total de interferências e $\mathbf{s} = \mathbf{a}(\theta_{tgt}) \otimes \mathbf{b}(\varpi_{tgt})$ o *steering vector* de espaço-tempo.

Pode-se demonstrar [10] que o valor esperado da relação sinal-ruído-mais-interferência (*signal-plus-interference-to-noise ratio* – SINR), normalizada em relação à SINR óptima, $E[\rho]$, é dado por

$$E[\rho] = \frac{K + 2 - MN}{K + 1}, \quad (9)$$

onde K é a quantidade de amostras de apoio (*snapshots* de espaço-tempo) processados pelo filtro. Resolvendo-se a equação anterior, fazendo $K = 2MN$, por exemplo, obtém-se $E[\rho] \approx 0,5$, o que resulta em uma diferença de aproximadamente 3 dB entre a SINR do filtro e a SINR óptima. Quando $K = MN$, obtém-se $E[\rho] = 2/(MN + 1)$. Mesmo tal valor de K não constituindo quantidade de amostras de apoio adequada para o filtro MVDR-SMI, a aplicação do filtro HMWF é capaz de atingir desempenho satisfatório com quantidade de amostras igual ou inferior a $K = MN$, conforme será apresentado na seção 5.

3. HMWF em radar STAP móvel ULA

A técnica HMWF com redução de posto é especializada nesta seção para aplicações de espaço-tempo. Como no método MWF, o HMWF obtém uma redução de posto r por meio do truncamento do filtro no r -ésimo estágio; porém, distintamente, o bloqueio do sinal desejado é implementado por refletores de Householder, que são dados por [7], [8], [9]

$$\mathbf{v}_i = \frac{|h_{i,1}|}{h_{i,1}} \mathbf{h}_i - \mathbf{u}_i \quad (10),$$

sendo \mathbf{h}_i a normalização da correlação cruzada entre o sinal de referência e os *snapshots* do i -ésimo estágio do filtro, que é colinear à direção do sinal de interesse, e $h_{i,1}$ é o primeiro elemento do vetor \mathbf{h}_i . Os refletores de Householder possuem norma unitária e produzem uma rotação em torno do primeiro elemento do vetor unitário na direção do sinal de interesse. Na Eq. (10), $\mathbf{u}_i = [10 \cdots 0]^T$. Com os refletores, constrói-se a matriz de Householder da seguinte forma [9]

$$\mathbf{H}_i = \frac{|h_{i,1}|}{h_{i,1}} \left(\mathbf{I} - 2 \frac{\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H}{\mathbf{v}_i^H \mathbf{v}_i} \right) \quad (11).$$

Pode-se facilmente demonstrar que a matriz de Householder é unitária, i.e., $\mathbf{H}^H \mathbf{H} = \mathbf{H} \mathbf{H}^H = \mathbf{I}$, onde \mathbf{I} é a identidade, e que sua primeira coluna é \mathbf{h}_i [9]. Essas duas propriedades implicam que as matrizes de bloqueio, \mathbf{B}_i , são obtidas a partir das demais colunas da matriz de Householder, i.e., $\mathbf{H}_i = [\mathbf{h}_i \mathbf{B}_i]$.

Aplica-se a técnica HMWF a um radar *phased-array* aerotransportado STAP com ULA, com N elementos e com CPI que integra M pulsos coerentes, de mesma modelagem que a apresentada na seção 2 e operando sujeito às mesmas condições de interferência.

As técnicas de redução de posto, entre as quais o filtro HMWF, são capazes de contornar as restrições impostas por amostras de apoio reduzidas na estimativa da matriz de covariância de espaço-tempo. A aplicação do HMWF resulta em um filtro de espaço-tempo de posto reduzido, \mathbf{w}_{HMWF} , dado por

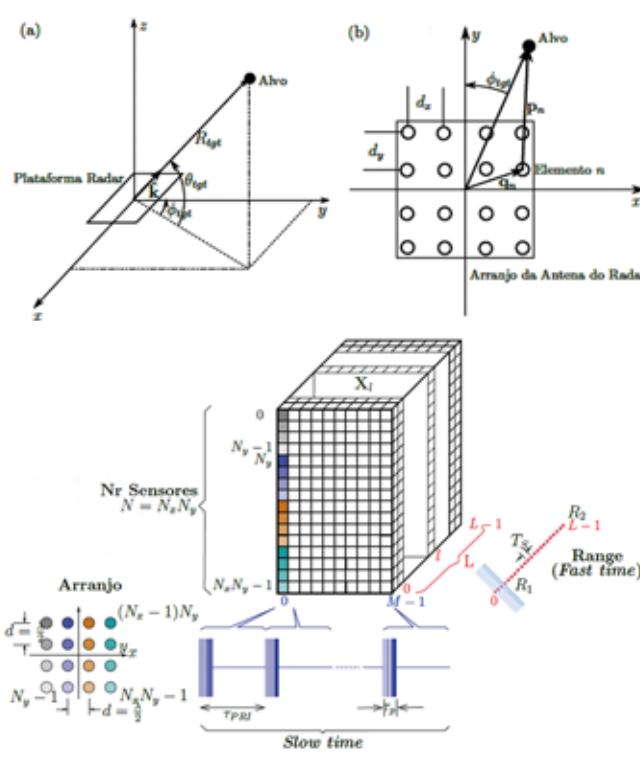
$$\mathbf{w}_{HMWF} = \frac{\mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{s}_r}{\mathbf{s}_r^H \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{s}_r} \quad (12),$$

onde $\mathbf{R}_r = \mathbf{T}_{HMWF}^H \mathbf{R} \mathbf{T}_{HMWF} = E[\mathbf{x}_r[l] \mathbf{x}_r^H[l]]$ é a matriz de covariância de interferências após a redução de posto, \mathbf{T}_{HMWF} é a matriz de transformação linear de redução de posto, $\mathbf{x}_r[l] = \mathbf{T}_{HMWF}^H \mathbf{x}[l]$, e $\mathbf{s}_r = \mathbf{T}_{HMWF}^H \mathbf{s}$ é o *steering vector* de espaço-tempo do sinal recebido após a redução de posto.

4. HMWF em radar STAP fixo URA

Analogamente à seção precedente, modelar-se-á o filtro STAP de posto reduzido pela técnica HMWF implementada no receptor de um radar fixo com arranjo retangular uniforme. Consideraremos um radar *phased-array* terrestre STAP, com URA composto por N elementos, integrando M pulsos coerentes e sendo construído segundo a geometria apresentada na Fig. 2, cujo CPI é esquematizado na Fig. 3. O CPI é composto por L snapshots de espaço-tempo de dimensão $M \times N$, que são representados por vetores $\mathbf{r}[l] \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$, dados pela mesma expressão da Eq. (1). O *steering vector* de espaço-tempo resulta do produto de Kronecker do *steering vector* temporal, de dimensão $M \times 1$, dado por (6), pelo *steering vector* espacial, de dimensão $N \times 1$, dado

$$\begin{aligned} & \vartheta_{tgt}(\theta_{tgt} \phi_{tgt}) = \\ & [\vartheta_0(\theta_{tgt} \phi_{tgt}) \vartheta_1(\theta_{tgt} \phi_{tgt}) \dots \vartheta_{N-1}(\theta_{tgt} \phi_{tgt})] \\ & \vartheta_{tgt}, \vartheta(\theta_{tgt} \phi_{tgt}) \vartheta_{tgt}. \end{aligned}$$



5. Simulações

Nesta seção serão apresentados resultados de simulações usando algoritmos MVDR-SMI (*MVDR sample matrix inversion*) [3] de posto reduzido em um cenário com escassez de amostras de apoio. Os algoritmos de posto reduzido para comparação de desempenho com o HMWF na aplicação proposta são: componentes principais (*principal components* – PC) [11], [12], métrica espectral cruzada (*cross-spectral metric* – CSM) [13], [14], [15] e o MWF [6].

Conforme detalhado em [10], foram simulados um radar *phased-array* aerotransportado móvel, dotado de ULA, e um radar *phased-array* terrestre fixo, dotado de URA. Os arranjos de antenas de ambos os radares possuem número total de elementos $N = 16$ com espaçamento de meio comprimento de onda da portadora. Os radares transmitem $M = 40$ pulsos por CPI, totalizando, portanto, $MN = 640$ graus de liberdade adaptativos do filtro de espaço-tempo. Ambos os radares possuem frequência de portadora de 1 GHz, PRF de 2,5 kHz, duração dos pulsos de 20 µs, potência de transmissão de pico de 700 W, alcance máximo de interesse de 60 km, velocidade máxima de interesse de 187 m/s e resolução em velocidade de 9,4 m/s. O alvo simulado possui frequência Doppler de 400 Hz e se situa a 10 km da posição radar. Em ambos os cenários, i.e., ULA móvel e URA fixo, simula-se um interferidor que produz relação *jammer-ruído* (*jammer-noise ratio* – JNR), por elemento, de 40 dB, e o ruído é assumido estacionário branco gaussiano de média nula.

O radar aerotransportado desloca-se a aproximadamente 187 m/s ao longo da direção definida pelos elementos do ULA e possui resolução em alcance de 25 m. Nesse cenário, inseriu-se *clutter* uniforme ao longo de 360° de azimute, com relação *clutter-ruído* (*clutter-noise ratio* – CNR), por elemento e por pulso, de 50 dB, sem ambiguidade no espectro Doppler, sem desalinhamento do vetor de velocidade da plataforma e sem movimento intrínseco do *clutter*.

O radar terrestre é fixo no solo e possui resolução em alcance de 75 m. No cenário com o radar URA fixo, sintetizou-se o *clutter* distribuído uniformemente em azimute no quadrante entre o azimute 0° e 90° e,

em alcance, entre 10,5 km e 11,5 km, com CNR de 50 dB, sem ambiguidades.

A Fig. 4 apresenta o comportamento da SINR normalizada em relação à SINR ótima, para a aplicação do HMWF ao filtro MVDR-SMI. Nessa figura, variou-se o número de amostras para ambos os cenários (ULA e URA). Além disso, o desempenho do HMWF é comparado com o MWF, o CSM, o PC, além do filtro quiescente ($w = S$), aplicados ao MVDR-SMI.

Similarmente, utilizando como métricas a probabilidade de detecção (P_D) e a probabilidade de falso alarme (P_{FA}), conforme definidas em [1], comparou-se, para ambos os cenários de simulação (ULA móvel e URA fixo), o desempenho da aplicação do HMWF ao MVDR-SMI com as demais técnicas da simulação anterior, obtendo-se o resultado apresentado na Fig. 5.

No que se refere à complexidade computacional, fazendo uso das expressões na Tabela 1, obteve-se a Fig. 6 variando o número de estágios (posto) dos filtros e utilizando 640 amostras de apoio.

Tabela 1 – Complexidade computacional do HMWF e MWF.

Algoritmo	Multiplicações complexas
MVDR-SMI posto completo	$K(2M^3N^3 + 13M^2N^2 + 9MN)/3$
MWF	$Kr^3/3 - KMNr^2 + K(M^2N^2 - 1/3)r$
HMWF	$-Kr^3/3 + K(MN/2 - 5)r^2 + K(13/6 + M^2N^2/2 + 11MN/2)r - 6KMN - K$

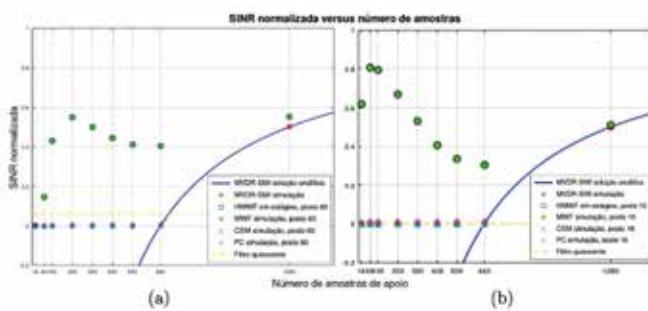


Fig. 4 – SINR normalizada versus número de amostras de apoio, K , do HMWF, $M = 40, N = 16$, 100 iterações de Monte Carlo. (a) Radar ULA móvel, posto $r = 55$. (b) Radar URA fixo, posto $r = 16$.

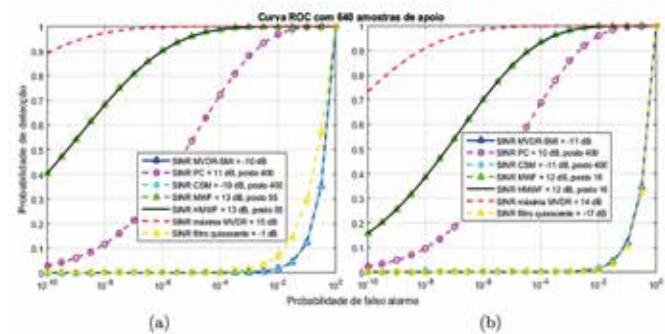


Fig. 5 – P_D versus P_{FA} (Curva ROC), $K = MN = 640$, 100 iterações de Monte Carlo. (a) Radar ULA móvel, posto $r = 55$. (b) Radar URA fixo, posto $r = 16$.

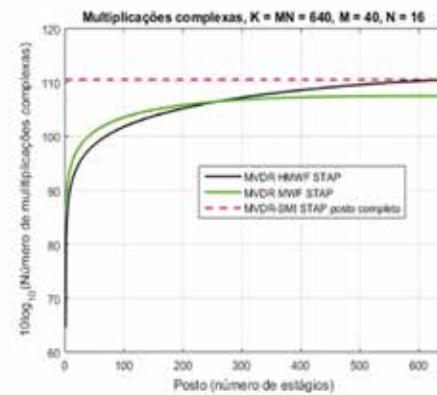


Fig. 6 – Número de multiplicações complexas versus número de estágios (posto) dos algoritmos HMWF e MWF, $K = MN = 640$ amostras de apoio.

6. Conclusão

Este artigo explorou a aplicação do HMWF (*householder multistage Wiener filter*) por radares *phased-array* em dois cenários: um radar aerotransportado equipado com um ULA e um radar terrestre fixo com URA. Ao aplicar o HMWF ao STAP, obteve-se o mesmo desempenho que o MWF convencional, especialmente no que tange à capacidade de operação com redução de posto de até 128 vezes em relação ao posto completo, mesmo para reduzido número de amostras de apoio. Além disso, em comparação com as demais técnicas simuladas e disponíveis na literatura, evidenciou-se, para as métricas utilizadas nas simulações de desempenho,

que a capacidade de operação em posto reduzido do HMWF é significativamente superior.

Indo mais além, a aplicação do HMWF ao STAP confirmou sua maior eficiência computacional para posto e número de amostras reduzidos. Esse resultado promissor vem ao encontro de um dos principais objetivos atuais de pesquisa na área de processamento de espaço-tempo de radares, em face da escassez de amostras contendo interferências estacionárias em relação ao *snapshot* ao qual se almeja aplicar a filtragem STAP.

Referências

- [1] RICHARDS, M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing. 2. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2014.
- [2] FARINA, A.; TIMMONERI, L. Cancellation of clutter and E.M. Interference with STAP algorithms. Application to live data acquired with a ground-based phased-array radar. In IEEE Radar Conference. Piscataway: IEEE, 2004.
- [3] WARD, J. Space-time adaptive processing for airborne radar. Technical Report 1015. Lexington, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [4] HIEMSTRA, J. D.; GOLDSTEIN, J. S. Robust rank selection for the multistage Wiener filter. In IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2002). Piscataway: IEEE, 2002.
- [5] OLIVEIRA, A.; SAMPAIO-NETTO, R.; FORTES, J. M.; BACKX, F. Interpolation-and-decimation-based dimensionality reduction applied to space-time processing. In IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). Piscataway: IEEE, 2016. p. 1–5.
- [6] GOLDSTEIN, J. S.; REED, I. S.; SCHARF, L. L. A multistage representation of the Wiener filter based on orthogonal projections. IEEE Transactions on Information Theory, v. 44, n. 7, p. 2943–2959, 1990.
- [7] CAMPOS, M. L. R.; WERNER, S.; APOLINÁRIO JR, J. A. On an efficient implementation of the multistage Wiener filter through Householder reflections for DS-CDMA interference suppression. In IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE, 2003.
- [8] WERNER, S.; With, M.; KOIVUNEN, V. Householder multistage Wiener filter for space-time navigation receivers. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, v. 43, n. 3, p. 975–988, 2007.
- [9] YANG, X.; SUN, Y.; LIU, Y.; ZHANG, J. Derivative constraint-based Householder multistage Wiener filter for adaptive beamforming. In IET International Radar Conference. Auburn Hills, MI: IET Internacional, 2013. p. 1–5.
- [10] VALLIM JR, C. C. Redução de Dimensionalidade por Transformação Linear Adaptativa Dependente de Sinais Aplicada a Radares STAP. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.
- [11] HOTELLING, H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. Journal of Educational Psychology, v. 24, n. 6, p. 417–441, 1933.
- [12] HAIMOVICH, A. The eigencanceler: adaptive radar by eigenanalysis methods. Aerospace and Electronic Systems. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, v. 32, n. 2, p. 532–542, 1996.
- [13] GOLDSTEIN, J. S.; REED, I. S. Reduced rank adaptive filtering. IEEE Transactions on Signal Processing, v. 45, n. 2, p. 492–496, 1997.
- [14] GOLDSTEIN, J. S.; REED, I. S. Theory of partially adaptive radar. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, v. 33, n. 4, p. 1309–1325, 1997.
- [15] GOLDSTEIN, J. S.; REED, I. S.; ZULCH, P.; MELVIN, W. A multistage STAP CFAR detection technique. In IEEE Radar Conference (RADARCON). Piscataway: IEEE, 1998.

Análise comparativa de métricas topológicas em redes de coautoria para o problema de predição de links

*Mariana Magalhães de Mattos Coelho, Claudia Marcela Justel

Engenharia de Computação, Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio 80, 2229-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

*mariana@ime.eb.br

RESUMO: O problema denominado *predição de links* consiste em estimar o surgimento de arestas entre nós de um grafo que representa uma rede de elementos interligados (e.g., uma rede de coautoria cujos vértices e arestas representam, respectivamente, os autores e as publicações entre eles). Diversas abordagens para resolver esse problema foram propostas nos últimos anos. Dentre as diferentes abordagens existentes, neste trabalho consideramos a abordagem topológica, para a qual foram definidas diferentes métricas. O objetivo deste trabalho é comparar quatro métricas topológicas por meio de experimentos em uma rede de coautoria. Apresentamos os resultados e as conclusões obtidas a partir dos experimentos executados em uma rede real desenvolvida por alunos participantes do projeto de pesquisa Algoritmos em Grafos.

PALAVRAS-CHAVE: análise de redes sociais, predição de links, aplicações de grafos.

ABSTRACT: The link prediction problem consists in estimating the appearance of edges between nodes of graphs representing a network of interconnected elements (e.g. a co-authorship network whose vertices and edges represent, respectively, the authors and the publications between them). In the last years, several approaches to solve this problem were proposed. Among them, one line of work is considering the topology of the network. This paper is about different metrics used to solve the topological approach of the link prediction problem. Our goal is to compare 4 different metrics by conducting experiments in a collaboration network. We present the results and conclusions obtained with the experiments for a real network developed by students, working in the research project Graph Algorithms.

KEYWORDS: social network analysis, link prediction, graph applications.

1. Introdução

Neste trabalho, abordamos o problema de predição de *links*, um problema fundamental da área Análise de Redes Sociais, com aplicações em diferentes domínios, como, por exemplo, predição da evolução em redes dinâmicas, indicação de novas amizades em redes sociais, recomendação de produtos e serviços [1], entre outros. Uma rede de coautoria é representada por vértices e arestas, em que os nós são os autores e as arestas são as publicações entre eles.

O problema de predição de *links* procura identificar ligação entre pares de nós para os quais essa conexão não existe. Para resolver esse problema, existem diferentes soluções. Algumas delas utilizam características ou atributos dos nós, e outras só utilizam informação estrutural do grafo. As primeiras são conhecidas

como abordagens baseadas em características, e as últimas como abordagens topológicas. Também existem abordagens que usam ambas, informação de características dos nós e informação estrutural, e são denominadas abordagens híbridas [2].

O artigo de Liben-Nowell e Kleinberg [3] introduziu diferentes métricas topológicas para resolver o problema de predição de *links* que associam a um par de nós não conectados x, y de um grafo G num tempo t , um coeficiente, denominado $score(x,y)$. Depois disso, uma lista ordenada pelos valores de $score(x,y)$ é produzida para gerar um preditor de novas conexões.

Em [4], Nassar *et al.* propõem uma nova abordagem topológica para predição de *links* denominada “predição aos pares” que, em vez de considerar um par de nós, determina qual nó tem mais chance de formar um triângulo com uma aresta existente. Dessa

forma, uma nova versão das métricas propostas por [3] é introduzida.

Ambos os tipos de métricas, que denominaremos “tradicional” e “aos pares”, são métricas topológicas de predição de *links* para redes homogêneas¹[5]. Mas, de acordo com as informações de que dispomos, não foram comparadas as versões tradicional e aos pares das métricas propostas em [3] e [4], respectivamente, isto é, não existem artigos fazendo a comparação sobre o desempenho das duas versões das métricas numa mesma rede real. Por esse motivo, consideramos importante desenvolver experimentos que permitam identificar vantagens e desvantagens das duas versões, tradicional e aos pares.

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise comparativa do desempenho de diferentes métricas topológicas nas versões tradicional e aos pares em redes de coautoria. Para tanto, utilizamos um *dataset* de uma rede de coautoria gerada a partir de informações da Plataforma Lattes do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para a realização dos experimentos que permitem fazer a comparação e, posteriormente, analisamos os resultados obtidos pelas duas versões. Pelos experimentos realizados, podemos concluir que a versão aos pares obteve uma pequena vantagem em relação à versão tradicional.

O restante deste artigo está organizado como se segue. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 explicita a descrição do problema de predição de *links*, assim como as métricas introduzidas em [3] e [4] e as definições dos conceitos utilizados neste trabalho. A metodologia utilizada para viabilizar a comparação das métricas nas duas versões propostas pelos dois artigos mencionados anteriormente é descrita na Seção 4, e a Seção 5 apresenta os experimentos realizados com seus respectivos resultados. Finalmente, a Seção 6 destaca as conclusões do trabalho.

2. Trabalhos relacionados

No artigo de Liben-Nowell e Kleinberg [3], trabalho importante em predição de *links*, é analisada uma rede de

¹ Redes homogêneas possuem um único tipo de nós e *links*.

coautoria acadêmica utilizando características topológicas da rede para prever a formação de arestas entre dois nós não conectados. Nesse caso, a rede de coautoria é homogênea.

Os autores de [6] propõem uma adaptação das métricas tradicionais em redes homogêneas descritas em [3], para serem utilizadas em redes heterogêneas bipartidas, isto é, uma rede na qual os nós são de dois tipos diferentes (uma bipartição do conjunto de nós) e todas as arestas têm extremidades em conjuntos diferentes da bipartição. Os autores propõem transformar o conjunto $\Gamma'(u)$ de vizinhos de u , em $\Gamma'(u) = \cap_{v \in \Gamma(u)} \Gamma(v)$ (vizinhos dos vizinhos do nó u), ou seja, substituir $\Gamma(u)$ por $\Gamma'(u)$ no cálculo das métricas topológicas tradicionais.

Em 2010, [7] apresentou uma solução diferente da proposta em [6] para tratar redes heterogêneas bipartidas. Nesse caso, é utilizada uma projeção do grafo que representa a rede sobre um dos dois conjuntos da bipartição, e então são definidas as métricas de acordo com essa projeção. A Fig. 1 ilustra as duas projeções para um exemplo de grafo bipartido, segundo [7].

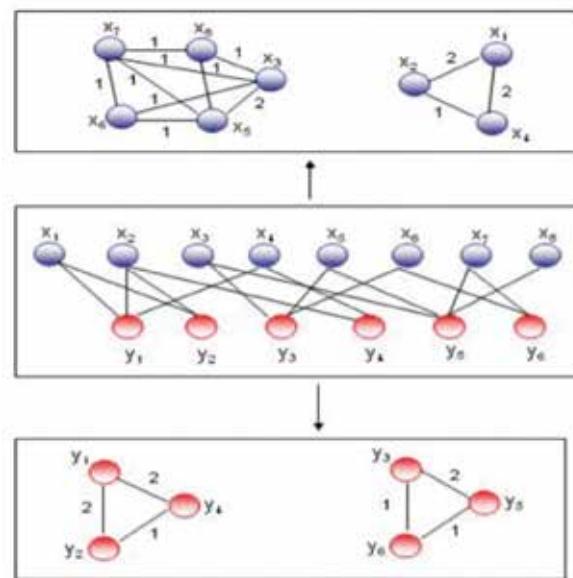


Fig. 1 – Duas projeções do grafo bipartido $G = (X \cup Y, E)$. Fonte: [7].

Em [8], foi desenvolvida uma solução para uma rede heterogênea multipartida. O método proposto, denominado MRLP (*multi-relational link prediction*), cujo componente principal utiliza um esquema de

pesos para diferentes tipos de combinações de arestas, a partir da contagem de subgrafos formados por três nós que existem na rede.

Já em 2019, Nassar *et al.* [4] propuseram prever a formação de arestas considerando um nó e uma aresta existente na rede. Os artigos [3] e [4] consideram de formas diferentes o fechamento de triângulos ao analisar subgrafos formados por três nós em redes homogêneas (Fig. 2 e Fig. 3).

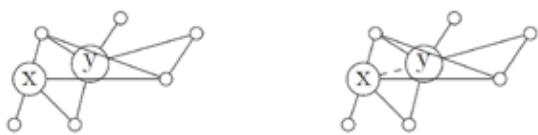


Fig. 2 – O desenho à esquerda representa G num tempo t e as ligações existentes até esse instante (x e y são vértices não adjacentes); o desenho à direita representa G num tempo t' e as ligações existentes até esse instante, para $t < t'$. A aresta tracejada seria uma possível ligação entre x e y no instante t' usando métrica para predição de links tradicional. **Fonte:** [4].



Fig. 3 – O desenho à esquerda representa G num tempo t e as ligações existentes até esse instante (u e v são adjacentes); o desenho à direita representa G num tempo t' e as ligações existentes até esse instante, para $t < t'$. As arestas tracejadas seriam possíveis ligações entre u e w e entre v e w usando métricas para predição de links aos pares. **Fonte:** [4].

3. Duas abordagens topológicas

Redes sociais são objetos altamente dinâmicos, que crescem e mudam rapidamente ao longo do tempo pela adição de novas arestas, de acordo com o surgimento de novas interações no grafo original. O problema de predição de *links* está relacionado com a evolução da rede social ao longo do tempo e pode ser definido da seguinte forma: dado um retrato instantâneo de uma rede social num tempo t , o problema de predição de *links* procura prever com certa precisão arestas que serão adicionadas nessa rede durante o intervalo de tempo entre t e um tempo futuro t' [3].

Todas as métricas consideradas por [3] para predição de *links* associam um coeficiente a pares de nós não adjacentes x , y , denominado $score(x, y)$, a partir de um grafo de entrada e produzem uma lista ordenada na ordem não crescente desses coeficientes. Os coeficientes podem ser considerados como uma medida de proximidade ou similaridade entre um par de nós, e serão chamados de **métricas tradicionais**. Essas métricas foram adaptadas de algumas técnicas utilizadas em Teoria de Grafos e Análise de Redes Sociais. Elas, em geral, não foram criadas para computar a similaridade entre nós de um grafo, portanto foi necessário modificá-las para o novo propósito.

A notação utilizada é a seguinte: $G = (V, E)$ um grafo não direcionado, $x \in V$ um nó, $\Gamma(x) = \{y \in V : (x, y) \in E\}$ o conjunto de vizinhos do nó $x \in V$, e $|\Gamma(x)|$ a cardinalidade do conjunto $\Gamma(x)$. A Tabela 1 apresenta quatro métricas topológicas tradicionais utilizadas em [3].

Tabela 1 – Métricas na versão tradicional.

Tradicional	
$VC(x,y) =$	$ \Gamma(x) \cap \Gamma(y) $
$JS(x,y) =$	$\frac{ \Gamma(x) \cap \Gamma(y) }{ \Gamma(x) \cup \Gamma(y) }$
$AA(x,y) =$	$\sum_{z \in \Gamma(x) \cap \Gamma(y)} \frac{1}{\log \Gamma(z) }$
$LP(x,y) =$	$ \Gamma(x) \Gamma(y) $

Fonte: [3]

Em [4], Nassar *et al.* observam que a predição de *links* tradicional, definida em [3], pode ser descrita em termos da seguinte pergunta: dado um nó x na rede, quais são os nós mais propensos a serem ligados a *ele*? Nassar *et al.* consideraram uma nova versão das métricas, a partir da pergunta: dada uma aresta (u, v) na rede, quais são os nós mais propensos a se conectar às extremidades da aresta, ou seja, aos vértices u e v ? O objetivo é definir nova versão da proximidade ou similaridade entre cada um dos vértices que são da extremidade da aresta com o nó, que os autores

denominam “aos pares” e denominaremos **métricas aos pares**. Será utilizada a notação a seguir:

$\Gamma^*((u,v)) = \{z \in V : \Gamma(u)U\Gamma(v) - \{u,v\}\}$ o conjunto de vizinhos da aresta $(u,v) \in E; |\Gamma^*((u,v))|$ a cardinalidade do conjunto $\Gamma^*((u,v))$. As métricas adaptadas utilizando a versão aos pares são denotadas Vizinhos Comuns (VC^*), Similaridade de Jaccard (JS^*), Adamic-Adar (AA^*) e Ligação Preferencial (LP^*). A Tabela 2 apresenta quatro métricas topológicas aos pares.

Tabela 2 – Métricas na versão aos pares.

Aos Pares	
$VC^*(w,(u,v)) =$	$ \Gamma(w) \cap \Gamma^*((u,v)) $
$JS^*(w,(u,v)) =$	$\frac{ \Gamma(w) \cap \Gamma^*((u,v)) }{ \Gamma(w) \cup \Gamma^*((u,v)) }$
$AA^*(w,(u,v)) =$	$\sum_{z \in \Gamma(w) \cap \Gamma^*((u,v))} \frac{1}{\log \Gamma(z) }$
$LP^*(w,(u,v)) =$	$ \Gamma(w) \cap \Gamma^*((u,v)) $

Fonte: [4]

4. Metodologia

Neste trabalho, consideramos um grafo $G=(V,E)$, no qual cada aresta $e \in E$ representa uma interação entre dois nós u e v num instante de tempo $t(e)$ numa rede social. Não serão consideradas múltiplas interações entre u e v . Para um dado instante de tempo t , notamos por G_t o subgrafo de G que contém todas as arestas e tal que $t(e) \leq t$. A formulação matemática do problema é dada a seguir. Escolhemos dois instantes de tempo, $t < t'$, e consideramos um algoritmo que acesse o grafo que representa a rede até o instante t , G_t e que retorne uma lista de pares de elementos (dois nós não adjacentes, ou um nó e uma aresta em G_t), que são previsões de arestas para $G_{t'}$. Os intervalos $(0,t]$ e $(t,t']$ são referidos como intervalo de treino e teste, respectivamente.

Cada preditor p considerado retorna uma lista ordenada L_p de pares em $V \times V$, formada pelas previsões de novas interações em $G_{t'}$ em ordem não crescente de confiança.

A medida de desempenho para o preditor p é determinada da seguinte maneira: escolhendo os primeiros k pares de previsões de novas interações da lista ordenada L_p (Top- k). Logo, para poder comparar cada métrica M_i na versão tradicional ($i = 1$) e aos pares ($i = 2$), é preciso construir a partir do preditor $p(M_i)$ o Top- k , ou seja, os primeiros k elementos da lista $L_p(M_i)$, para $i = 1, 2$. Finalmente, para cada lista $L_p(M_i)$, determinam-se as medidas de qualidade de classificação do preditor $p(M_i)$, $i = 1, 2$, usando as fórmulas das Eq. 1 a Eq. 4:

$$Precisão = \frac{VP}{VP + FP} \quad (1)$$

$$Acurácia = \frac{VP + VN}{VP + FP + FN + VN} \quad (2)$$

$$Revocação = \frac{VP}{VP + FN} \quad (3)$$

$$F1 = \frac{2 \cdot Precisão \cdot Revocação}{Precisão + Revocação} \quad (4)$$

onde,

- VP = verdadeiro positivo (um link é classificado, ou previsto, positivo e existe no grafo $G_{t'}$);
- FP = falso positivo (um link é classificado, ou previsto, positivo e não existe no grafo $G_{t'}$);
- FN = falso negativo (um link é classificado, ou previsto, negativo e existe em $G_{t'}$); e
- VN = verdadeiro negativo (um link é classificado, ou previsto, negativo e não existe em $G_{t'}$).

De acordo com a descrição do tipo de rede na qual é possível utilizar as métricas tradicionais e aos pares feita na Seção 3, foi escolhido um dataset, correspondente a uma rede de coautoria, para realizar os experimentos comparativos. A seguir, é apresentada a descrição do dataset.

Para determinar o dataset a ser utilizado nos experimentos, observamos que tanto as métricas tradicionais quanto aos pares não produzem bons resultados em redes heterogêneas bipartidas. Realizamos alguns experimentos preliminares, mostrando que a adaptação proposta em [6] não funciona com as métricas aos pares. Portanto, escolhemos como dataset uma rede de coautoria, que é uma rede homogênea. A rede de coautoria pode ser pensada como a projeção, proposta em [7], no conjunto dos autores da rede heterogênea bipartida que relaciona autores e artigos.

Em [9], foi criada uma rede de coautoria a partir de dados retirados em 11 de outubro de 2010 da Plataforma Lattes do CNPq. Os nós do grafo que representa a rede correspondem aos autores, e as arestas identificam pelo menos uma publicação conjunta entre dois autores (portanto o grafo é não direcionado, sem arestas múltiplas) e $t(e)$ corresponde ao ano da primeira publicação conjunta entre os vértices que são extremidades da aresta e .

Posteriormente, a rede criada em [9] foi atualizada com dados até 10 de outubro de 2014 [10]. Tanto a criação da rede quanto a primeira atualização foram desenvolvidas por alunos de graduação num trabalho de final de curso e em um projeto de iniciação científica inserido no projeto *Algoritmos em Grafos*. As Fig. 4 e 5 ilustram os grafos G_{2011} e G_{2014} que representam as duas redes de coautoria antes mencionadas.

No contexto da pesquisa deste artigo, foi realizada uma nova atualização dos dados em 5 de janeiro de 2021. A Tabela 3 apresenta os tamanhos dos conjuntos de nós e arestas dos grafos G_{2011} , G_{2014} e G_{2020} , com informações correspondentes aos períodos (2010, 2014] e (2014, 2020], respectivamente. A Fig. 6 representa o grafo G_{2020} .

Tabela 3 – Informações das redes de coautoria obtidas da plataforma Lattes-CNPq.

$G = (V, E)$	$ V $	$ E $
G_{2011}	207	520
G_{2014}	280	756
G_{2020}	425	1.350

Os experimentos foram realizados em um computador *Intel Core i7*, CPU 1.80GHz, 8GB de RAM. A linguagem de programação *Python* (versão 3.9.4 [11]) foi usada para implementar as métricas, determinar os preditores e obter os Top- k e a biblioteca *NetworkX* 2.5.1 para manipular grafos ([12]).

5. Descrição dos experimentos realizados

5.1 Experimento Lattes-CNPq 2011-2014

Nesse primeiro experimento, utilizamos a rede de coautoria Lattes e produzimos os grafos

G_t e $G_{t'}$ com $t < t'$ que representam a rede, para valores $t = 2011 < t' = 2014$. Observamos que nesse caso existem 32 arestas em G_{2014} entre pares de nós não adjacentes em G_{2011} , ou seja, 32 novas arestas. Houve pequenas diferenças dos valores de Top- k obtidos com os k considerados ($k = 3, 5, 7$), portanto mostramos unicamente os resultados para $k = 7$. O valor $k = 7$ foi escolhido porque a métrica tradicional Vizinhos Comuns apresentou unicamente nove valores de escores diferentes. Todos os valores das medidas da qualidade da classificação dos links preditos obtidos nesse experimento são apresentados na Tabela 4.

A partir da Tabela 4, podemos concluir que, para Vizinhos Comuns e Similaridade de Jaccard, os resultados obtidos pelas métricas na versão aos pares foram melhores ou iguais, exceto na Revocação para Vizinhos Comuns. Para Ligação Preferencial, as métricas na versão tradicional tiveram melhores resultados em todos os casos. E para Adamic-Adar os resultados são balanceados para as duas versões das métricas.

Tabela 4 – Resultados para G_{2011} e G_{2014} .

Top-7		
	VC	VC*
Precisão	0,01010101	0,025
Acurácia	0,965818951	0,994732053
F-1	0,019310345	0,035087719
Revocação	0,21875	0,058823529
JS		
Precisão	0	0
Acurácia	0,985241094	0,992497372
F-1	0	0
Revocação	0	0
LP		
Precisão	0,142857143	0
Acurácia	0,998221239	0,998029793
F-1	0,051282051	0
Revocação	0,03125	0
AA		
Precisão	0,142857143	0,058823529
Acurácia	0,998221239	0,996928246
F-1	0,051282051	0,058823529
Revocação	0,03125	0,058823529

5.2 Experimento Lattes-CNPq 2014-2020

Nesse experimento, utilizamos o grafo de coautoria Lattes e produzimos as informações necessárias para trabalhar com $t < t'$, para valores $t = 2014$ e $t' = 2020$. Os resultados foram avaliados para diferentes valores de Top- k ($k = 3, 5, 7$).

Observamos que nesse caso existem 105 arestas em G_{2020} entre pares de nós não adjacentes em G_{2014} , ou seja, 105 novas arestas. Houve pequenas diferenças dos resultados obtidos com os valores de Top- k considerados, portanto mostramos unicamente os resultados para $k = 7$. O valor $k = 7$ foi escolhido porque a métrica tradicional Vizinhos Comuns apresentou unicamente oito valores de escores diferentes. Todos os valores das medidas da qualidade da classificação dos links preditos obtidos nesse experimento são apresentados na Tabela 5.

Dos resultados mostrados na Tabela 5, observamos que, para as métricas Vizinhos Comuns e Similaridade de Jaccard, os resultados da versão aos pares foram melhores quando comparados com as da versão tradicional, exceto na *Revocação*. Para Ligação Preferencial, as duas versões, tradicional e aos pares, apresentaram valor zero na *Precisão*, *F1* e *Revocação*. A *Acurácia* para a métrica Ligação Preferencial tradicional foi um pouco melhor que aos pares. E para Adamic-Adar os resultados obtidos pela versão aos pares mostram uma pequena vantagem, exceto na *Acurácia*.

Tabela 5 – Resultados para G_{2014} e G_{2020} *

Top-7		
	VC	VC*
Precisão	0,00791526	0,033950617
Acurácia	0,776524645	0,989178834
F-1	0,015639374	0,05
Revocação	0,647619048	0,094827586
JS		
Precisão	0,002932551	0,006024096
Acurácia	0,988408521	0,992981544
F-1	0,004484305	0,007352941
Revocação	0,00952381	0,009433962

continua

Top-7		
	LP	LP*
Precisão	0	0
Acurácia	0,99707602	0,997050532
F-1	0	0
Revocação	0	0
AA		
Precisão	0	0,023255814
Acurácia	0,99707602	0,996166584
F-1	0	0,013422819
Revocação	0	0,009433962

6. Conclusão

Neste trabalho, apresentamos os resultados de experimentos comparativos entre duas versões para as métricas de predição de *links*, tradicional e aos pares, em uma rede real de coautoria.

A partir dos resultados obtidos, podemos concluir que as duas versões para as quatro métricas consideradas, Vizinhos Comuns, Similaridade de Jaccard, Ligação Preferencial e Adamic-Adar, apresentam comportamentos parecidos, com uma pequena vantagem para a versão aos pares. Em todos os experimentos realizados, a versão aos pares para Vizinhos Comuns obteve discreta melhoria na *Precisão*, *Acurácia* e *F1*. Em Similaridade de Jaccard, os resultados foram iguais ou melhores em *Precisão*, *Acurácia* e *F1*, enquanto para Adamic-Adar a melhora foi em *F1* e *Revocação*.

Observamos que para Ligação Preferencial no Experimento 2014-2020, tanto a versão tradicional quanto a versão aos pares obtiveram valores iguais a zero para *Precisão*, *F1* e *Revocação*. Já no Experimento 2011-2014, os valores dessas três medidas de qualidade para Ligação Preferencial foram diferentes de zero para a versão tradicional.

A partir dos resultados preliminares, podemos considerar que a versão aos pares, que foi introduzida recentemente, também pode ser usada para resolver a abordagem topológica do problema de predição de *links*, no caso de três das métricas consideradas neste artigo.

Como trabalhos futuros, sugerimos continuar analisando os resultados para os *datasets* do repositório de *preprints ArXiv* em cinco campos de astrofísica ([13]), que já foram usados na literatura para avaliar os resultados de métodos de predição de *links*. Os *datasets* a serem considerados são: *General Relativity and Quantum*

Cosmology (gr-qc), *Astrophysics (astro-ph)*, *Condensed Matter (cond-mat)*, *High Energy Physics – Phenomenology (hep-ph)* e *High Energy Physics – Theory (hep-th)*. Nessa análise futura, pretendemos também incluir experimentos usando uma alteração da versão aos pares, originalmente proposta pelos mesmos autores de [4], publicada em [14].

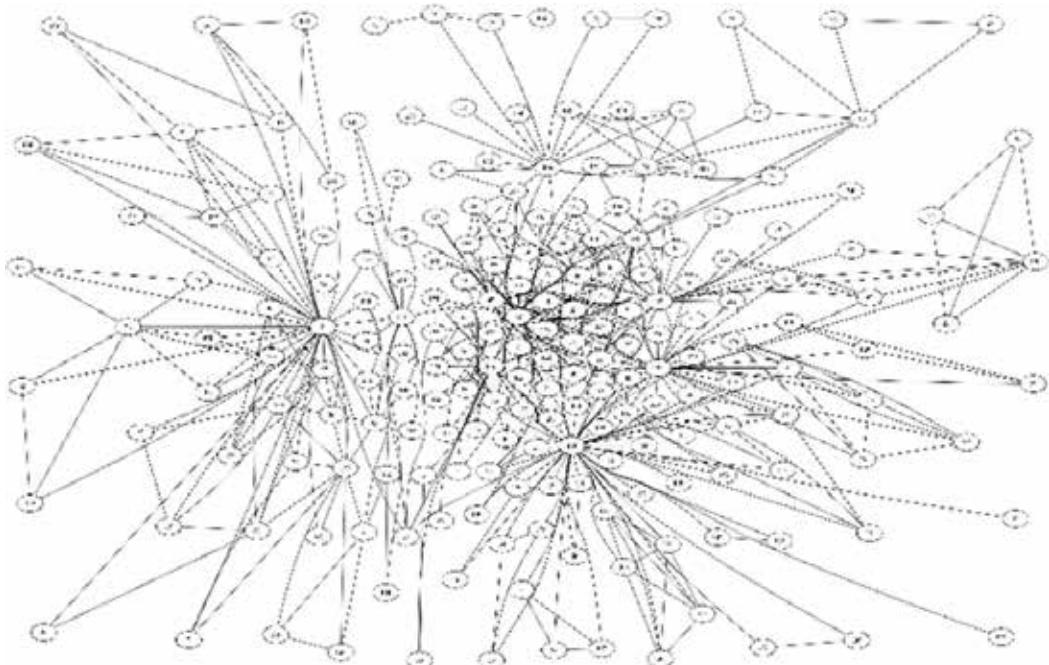


Fig. 4 – Grafo Lattes-CNPq G_{2011} . Fonte: [9]

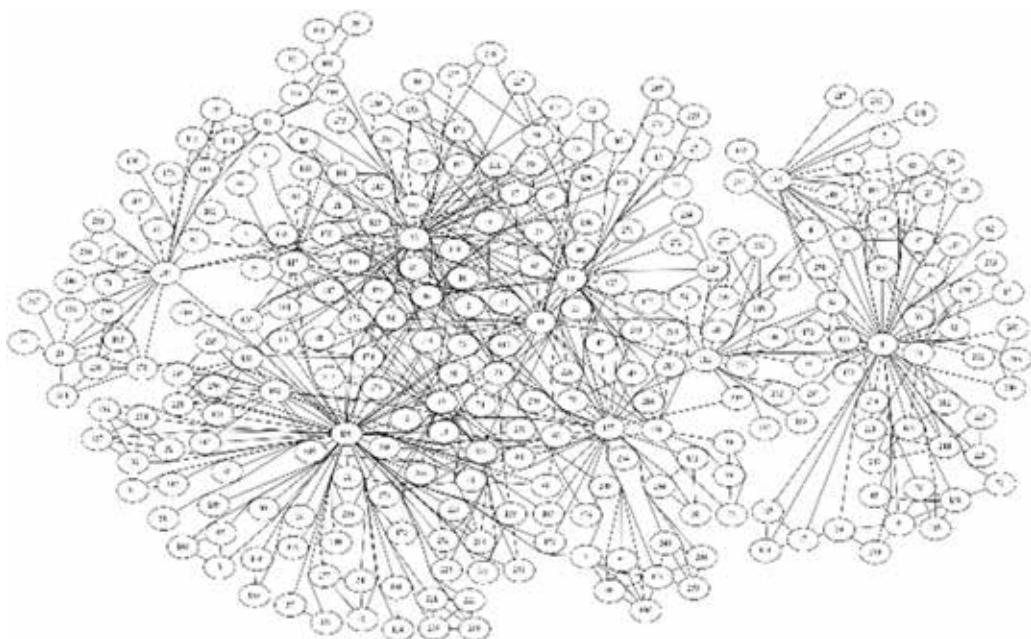


Fig. 5 – Grafo Lattes-CNPq G_{2014} . Fonte: [10]

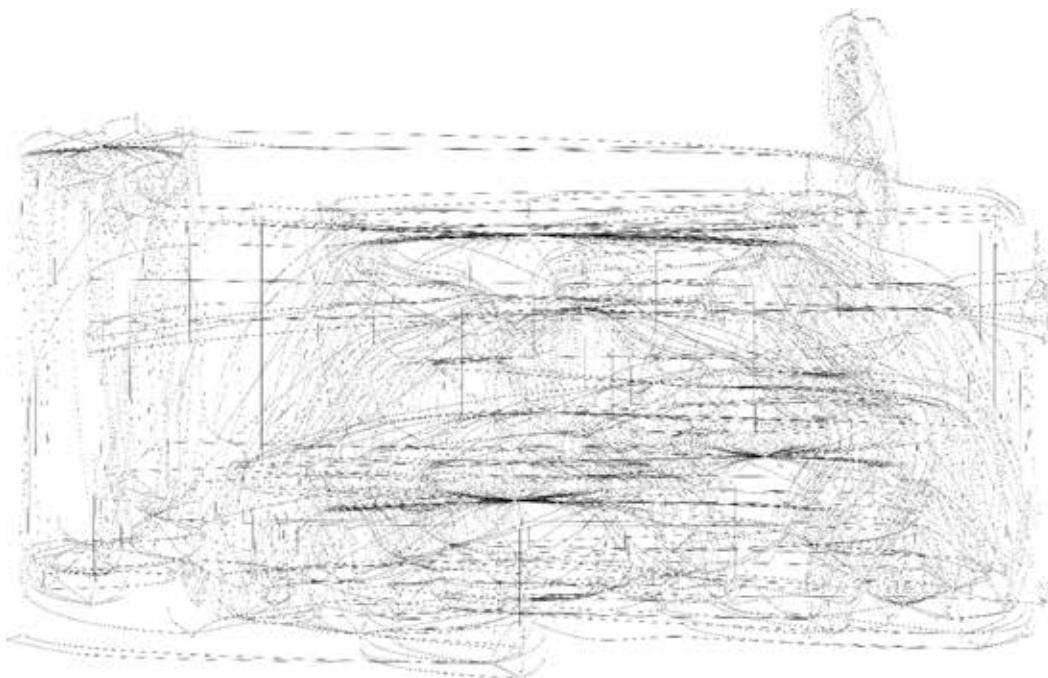


Fig. 6 – Grafo Lattes-CNPq G_{2020} .

Referências

- [1] ZAREIE, A.; SAKELLARIOU, R. Similarity based link prediction in social networks using latent relationships between the users. *Scientific Reports*, v. 10, n. 20137, p. 1–11, 2020.
- [2] PUJARI, M. *Link Prediction in Large-scale Complex Networks (Application to bibliographical Networks)*. Paris: University Sorbonne Paris Cité, 2015.
- [3] LIBEN-NOWELL, D.; KLEINBERG, J. The Link-Prediction Problem for Social Networks. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, v. 58, n. 7, p. 1019–1031, 2007.
- [4] NASSAR, H.; BENSON, A. R.; GLEICH, D. F. Pairwise Link Prediction. *arXiv:1907.04503v1 [cs.SI]*. 10 Jul 2019.
- [5] AL HASAN, M.; ZAKI, M. J. A survey of link prediction in social networks. In AGGARWAL, C. C. *Social Network Data Analytics*. New York: Springer, 2011. p. 243–275.
- [6] HUANG, Z.; LI, X.; CHEN, H. Link prediction approach to collaborative filtering. In *ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries (JCDL)*. New York: ACM Digital Library, 2005. p. 141–142.
- [7] BENCHETTARA, N.; KANAWATI, R.; ROUVEIRO, C. Supervised machine learning applied to link prediction in bipartite social networks. In *International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*. Piscataway: IEEE, 2010.
- [8] DAVIS, D.; LICHTENWALTER, R.; CHAWLA, N. V. Supervised methods for multi-relational link prediction. *Social Network Analysis and Mining*, v. 3, p. 127–141, 2013.
- [9] BARBOSA, D. A. B. L.; AVELINO, L. B.; SOUZA, R. F.; OLIVEIRA, C. C. G. F.; JUSTEL, C. M. Medidas de centralidade e detecção de comunidades em rede de co-autoria. In *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro: Sobrapo, 2011. p. 2574–2583.
- [10] MAGNANI, H. M. *Redes Sociais e Comunidades*. Relatório Final Projeto Institucional de Iniciação Científica CNPq-IME, 2014.
- [11] PYTHON. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 6 abr. 2021.
- [12] NETWORKX. Disponível em: <http://networkx.org>. Acesso em: 6 abr. 2021.
- [13] ARXIV. Disponível em: <https://arxiv.org/>. Acesso em: 6 abr. 2021.
- [14] NASSAR, H.; BENSON, A. R.; GLEICH, D. F. Pairwise Link Prediction. In *IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM)*. New York: ACM Digital Library, 2019. p. 386–393

Pontes e passarelas em pFRP: estudo comparativo e análise de processos de montagem

Marcos Vasconcelos Diniz^a, Ana Maria Abreu Jorge Teixeira^b, Michèle Schubert Pfeil^c

^aSeção de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,
marcosvdiniz@gmail.com

^bSeção de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,
anamajt@gmail.com

^cPrograma de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, mpfeil@coc.ufrj.br

RESUMO: O artigo reúne as principais informações a respeito das pontes desmontáveis existentes no Exército Brasileiro e das pontes em material compósito pultrudado de fibra e resina (pFRP) desenvolvidas ao redor do mundo. Além disso, apresenta os resultados obtidos na montagem e ensaio estático até a ruptura de uma ponte desmontável brasileira de fibra de vidro e resina (GFRP) concebida para o emprego em situações de emergência. Por fim, compara aspectos de montagem e capacidade de resistência das pontes em pFRP e as pontes tradicionais metálicas, indicando as vantagens logísticas de transporte e montagem no campo.

PALAVRAS-CHAVE: Pontes. Materiais Compósitos. pFRP. FRP. GFRP. Estruturas.

ABSTRACT: This paper presents the main information about the brazilian army's military bridges and the Pultruded Fiber Reinforced Polymer (pFRP) bridges developed around the world. Besides, presents the procedures for the assembly and static structural tests of a scaled model brazilian Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bridge, which project has been made for support emergency situations. Lastly, it compares some assembly aspects and resistance capacity between FRP and military bridges, indicating several advantages, especially regarding transportation and mounting in the field.

KEYWORDS: Bridges. Composites Materials. pFRP. FRP. GFRP. Structures.

1. Introdução

Polímeros reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymers*) são constituídos por duas fases distintas: uma estrutura de reforço em fibras e uma matriz polimérica. As fibras, usualmente, são de carbono, aramida ou vidro, enquanto a matriz polimérica, normalmente, é de poliéster, epóxica, fenólica ou éster vinílica [1].

Há diversos processos de fabricação dos polímeros reforçados com fibras, sendo a pultrusão um dos processos mais utilizados devido ao baixo custo e à possibilidade de obtenção de perfis de seções transversais variadas, com quaisquer comprimentos e com elevado teor volumétrico de fibras na direção longitudinal do perfil. O FRP fabricado pelo processo da pultrusão é frequentemente denominado pFRP (*Pultruded Fiber Reinforced Polymer*).

A resistência à tração do pFRP é fortemente influenciada pela resistência das fibras longitudinais, enquanto a resistência ao cisalhamento depende muito da matriz. No processo da pultrusão, os fios de fibras são embebidos na matriz polimérica e puxados através de um molde, adquirindo o formato desejado. O posicionamento das fibras longas na direção longitudinal confere ao pFRP a propriedade de material ortotrópico.

Cabe ressaltar que materiais do tipo FRP já são largamente empregados na engenharia aeronáutica e em tubos e tanques de armazenamento nas áreas de óleo e gás [2].

O interesse pela utilização do FRP na engenharia civil tem aumentado nas últimas décadas devido às suas propriedades físicas e mecânicas, tais como elevada resistência mecânica em relação ao baixo peso específico, elevada energia de absorção de impacto e

imunidade à corrosão e estabilidade dimensional [1], tornando atrativa a utilização desses materiais em pontes e passarelas desmontáveis.

As principais vantagens do emprego de FRP em pontes e passarelas desmontáveis são: redução do peso das estruturas, possibilitando a diminuição dos custos com mão-de-obra para sua montagem; facilidade no transporte e instalação; e possibilidade de fabricação de perfis específicos por diferentes processos, tais como moldagem e pultrusão [3].

Em face do exposto e devido ao caráter inovador e recente da utilização de elementos estruturais de FRP na constituição parcial ou total de pontes e passarelas, este artigo tem por objetivo reunir os principais trabalhos publicados com perfis de FRP na fabricação de estruturas de pontes e passarelas de emprego dual no Brasil e no mundo, apresentando com mais detalhes os resultados do projeto e a montagem de uma ponte desmontável em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*) realizadas pelo Instituto Militar de Engenharia, em parceria com o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/URFJ).

2. Pontes metálicas militares usadas pelo Exército Brasileiro

O Exército Brasileiro dispõe, atualmente, de quatro modelos de pontes desmontáveis. Essas estruturas, além de serem concebidas para utilização em operações militares, também têm sido empregadas no apoio à Defesa Civil nos casos de calamidade pública em que haja a necessidade de reestabelecer o acesso às localidades atingidas ou o tráfego em vias importantes.

Por serem constituídas de aço ou alumínio, essas pontes são pesadas, demandando grande efetivo de mão-de-obra e equipamentos especializados de engenharia para montagem e desmontagem, e necessidade de logística de transporte mais robusta, com a utilização de caminhões e viaturas concebidas para o transporte de cargas elevadas.

A seguir, são apresentadas as principais características dessas equipagens e as informações referentes ao transporte e montagem.

2.1 Ponte Bailey M2 [4]

A ponte de painéis M2 consiste em uma superestrutura formada por peças padronizadas da equipagem Bailey, constituída por painéis de aço que, ligados entre si, formam vigas longitudinais treliçadas, biapoiadas, vigas transversais e piso de aço e madeira, dentre outros itens.

O material dos painéis, vigas transversais e piso é o aço de liga BS968, de peso específico 79 kN/m³. Cada painel tem 3,084 m de comprimento e 1,5 m de altura (Fig. 1), com peso de 2,62 kN.

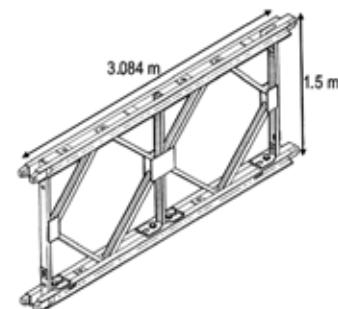


Fig. 1 – Painel Bailey tipo M2. **Fonte:** [4].

A ponte Bailey pode ser montada em configurações com uma ou até três linhas de vigas (simples-simples, dupla-simples ou tripla-simples) de cada lado e até três alturas de vigas (tripla-simples, tripla-dupla ou tripla-tripla). A largura total do tabuleiro é de 4,34 m e a largura útil para viaturas é de 3,81 m. A Fig. 2 mostra uma ponte Bailey M2 dupla-simples com 22 m de comprimento.



Fig. 2 – Ponte Bailey dupla-simples. **Fonte:** [4].

O vão máximo possível de ser vencido pela equipagem Bailey é de, aproximadamente, 64 m de comprimento para um trem tipo de 333 kN na configuração tripla-simples e o trem tipo máximo de 1120 kN para um vão de 25 m na configuração dupla-simples.

O transporte dos elementos constituintes da ponte, do ferramental e dos elementos de apoio exige a utilização de viaturas especializadas de engenharia. O Manual T5-275 [4] prevê a organização de todo o material para a montagem da ponte em conjuntos pré-determinados com volume e peso compatíveis com as viaturas especializadas de transporte. São as chamadas “cargas-tipo”, que variam conforme a configuração e comprimento de ponte a ser montada. A Fig. 3 mostra um esquema de carga-tipo de transporte de painéis de ponte na carroceria de um caminhão basculante.

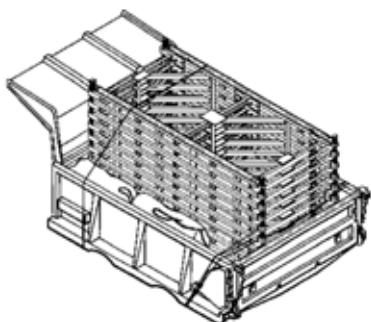


Fig. 3 – Carga-tipo de painéis na carroceria de um caminhão basculante. Fonte:[4].

Uma ponte do tipo simples-simples com 15,42 m de comprimento tem peso próprio de 209 kN e os elementos de ferramental, mais as partes constituintes do nariz de lançamento, têm peso total de 68 kN, sendo necessário o transporte de uma carga total de 280 kN, aproximadamente.

A estrutura da ponte é montada sobre roletes de aço em uma das margens e empurrada manualmente para a margem oposta. As seções das pontes são montadas sucessivamente com o posicionamento dos painéis, colocação das vigas transversais e instalação dos contraventamentos horizontais e verticais. Após

o assentamento da ponte nos apoios, feito com o auxílio de macacos hidráulicos, é colocado o piso e são montadas as rampas de acesso.

Para a montagem manual de uma ponte simples-simples de 15,42 m, é necessário o emprego de 33 pessoas para um tempo total de 8 horas. A Fig. 4 mostra o esquema de montagem da ponte.

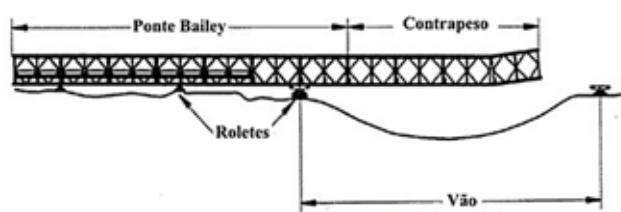


Fig. 4 – Vista longitudinal da ponte lançada sobre o vão. Fonte:[4].

2.2 Ponte M4T6 [5]

Aponte M4T6, de fabricação inglesa, é constituído por vigas tipo caixão e vigas transversais em duralumínio. A estrutura pode ser montada sobre suportes flutuantes de borracha, sobre cavaletes intermediários de alumínio ou biapoiada sobre sapatas de aço.

Nesta última configuração, o vão máximo é de 13,71 m de comprimento para um trem tipo de até 390 kN, sendo sua capacidade máxima de suporte de 1.127 kN para um vão de 4,57 m.

A Fig. 5 mostra as vigas componentes da ponte M4T6 e a Fig. 6 apresenta uma ponte biapoiada durante a montagem.

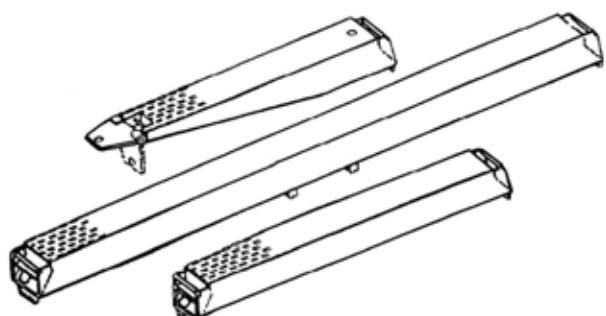


Fig. 5 – Vigas componentes da ponte M4T6. Fonte:[5].



Fig. 6 – Ponte M4T6 durante a montagem. **Fonte:** Acervo dos autores.

O transporte dos elementos constituintes da ponte M4T6 não exige veículos especializados e a carga a ser transportada, incluindo ferramental, é de 73,66 kN para a construção de uma ponte com 13,71 m de comprimento, cujo peso próprio é de 54,72 kN.

A montagem da estrutura pode ser feita apenas com ferramental simples ou ainda utilizar guindaste para a colocação da estrutura sobre o vão. São necessárias 15 pessoas para a montagem dessa ponte, num tempo total de 2 horas e meia.

2.3 Ponte Compact 200 [6]

Esta ponte, de fabricação inglesa, foi adquirida pelo Exército Brasileiro em 1997 e consiste na evolução do projeto da ponte Bailey. O sistema estrutural é formado por painéis ligados entre si por meio de pinos, formando vigas longitudinais treliçadas nas quais são apoiadas as vigas transversais e piso, tudo de aço.

Os painéis são fabricados em aço galvanizado tipo BS 4360, com peso específico de 77 kN/m³. Cada painel possui comprimento de 3,084 m e altura de 2,22 m (Fig. 7), com peso total de 4 kN.

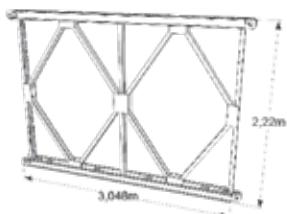


Fig. 7 – Painel Compact 200. **Fonte:** [6].

A ponte Compact 200 pode ser montada em configurações de uma até três linhas de vigas treliçadas (simples-simples, dupla-simples ou tripla-simples) de cada lado do tabuleiro, mas com apenas uma altura de viga. A largura total da ponte é de 6,00 m e a largura útil para viaturas é de 4,20 m nas configurações *standard* e 5,30 m na configuração *extra wide*, na qual o comprimento das vigas transversais é maior.

A ponte, apesar de ser utilizada como estrutura temporária no Exército Brasileiro, foi concebida para instalação semipermanente. A Fig. 8 mostra uma ponte dupla-simples com 18 m de comprimento.



Fig. 8 – Ponte Compact 200 dupla simples. **Fonte:** [6].

O vão máximo possível de ser vencido pela equipagem Compact 200 é de, aproximadamente, 56 m para um trem tipo de 426 kN na configuração dupla-simples e o trem tipo máximo de 1.043 kN para um vão de 43 m na configuração dupla-simples.

O transporte da estrutura exige a utilização de viaturas especializadas, tais como caminhões do tipo bitrem. Os manuais existentes não preveem sistema de cargas-tipo para organização dos materiais para o transporte como na ponte Bailey, sendo utilizada a experiência prática quando do transporte das peças.

Uma ponte do tipo simples-simples com 15,42 m de comprimento tem peso próprio de 304 kN e os elementos de ferramental, mais as partes constituintes do nariz de lançamento, têm peso total de 107 kN, sendo necessário o transporte de uma carga total de 411 kN, aproximadamente.

A montagem da estrutura é bastante semelhante à ponte Bailey, com a limitação de que somente pontes do tipo simples-simples sejam montadas de forma

manual em situações emergenciais, uma vez que o projeto prevê a utilização de guindastes e tratores. As seções das pontes são montadas sucessivamente com o posicionamento dos painéis, colocação das vigas transversais e contraventamentos horizontais e verticais. Após o assentamento nos apoios feito com o auxílio de macacos hidráulicos, é colocado o piso e são montadas as rampas de acesso.

A montagem de uma ponte simples-simples de 15,42 m de comprimento exige emprego mínimo de 100 pessoas, sendo o tempo total previsto de montagem de 36 horas.

2.4 Ponte LSB [7]

Esta ponte, de fabricação inglesa, foi adquirida pelo Exército Brasileiro em 2010 e consiste na evolução do projeto da Ponte Compact 200, de emprego militar, com rampas com inclinação ajustável.

O sistema estrutural em aço é formado por painéis ligados entre si por meio de pinos, formando vigas longitudinais treliçadas nas quais são apoiadas as vigas transversais e o piso.

Os painéis são de aço galvanizado tipo BS 4360, cujo peso específico é de 77 kN/m³. Cada painel possui comprimento de 3,084 m e altura de 2,22 m, idênticos aos da ponte Compact 200 (Fig. 7), com peso total de 4 kN.

A montagem da estrutura prevê apenas a utilização de equipamento de engenharia, como guindastes e tratores, podendo ser realizada em configurações com uma até três linhas de vigas treliçadas (simples-simples, dupla-simples ou tripla-simples) de cada lado, porém com apenas uma altura de viga.

O vão máximo da equipagem da LSB é de, aproximadamente, 56 m de comprimento para um trem tipo de 426 kN na configuração dupla-simples e o trem tipo máximo de 1.160 kN para um vão de 40 m na configuração dupla-simples.

O transporte da estrutura, assim como na ponte Compact 200, exige a utilização de viaturas especializadas, como caminhões do tipo bitrem. São possíveis várias combinações de carga-tipo para a

montagem das pontes, de acordo com o vão e com a capacidade da ponte.

A Fig. 9 mostra o material organizado no interior de um dos vagões do caminhão tipo bitrem para a montagem de ponte simples-simples.



Fig. 9 – Material organizado para a montagem da ponte LSB simples-simples. **Fonte:** [7].

Uma ponte do tipo simples-simples com 15,42 m de comprimento tem peso próprio de 256 kN. Os elementos de ferramental, mais as partes constituintes do nariz de lançamento, têm peso total de 111 kN, e as rampas articuladas têm peso de 186 kN, sendo necessário o transporte de uma carga total de 553 kN, aproximadamente.

Para a montagem de uma ponte simples-simples de 15,42 m de comprimento existe a necessidade de emprego de 36 pessoas e utilização de guindastes, com tempo total de montagem previsto de 32 horas.

3. Pontes e passarelas de FRP

A seguir, são apresentadas algumas pontes constituídas total ou parcialmente por FRP.

3.1 Ponte alemã em GFRP [8]

A Universidade de Aachen, na Alemanha, desenvolveu uma ponte veicular de comprimento de 20 m para um trem-tipo de 109 kN em cinco módulos desmontáveis, com largura útil de 2,75 m (Fig. 10).

A estrutura é composta por duas vigas longitudinais treliçadas ligadas entre si por vigas transversais. Os elementos da estrutura são constituídos por perfis pGFRP, incluindo o piso. As ligações são feitas com parafusos de alta resistência e chapas de aço.

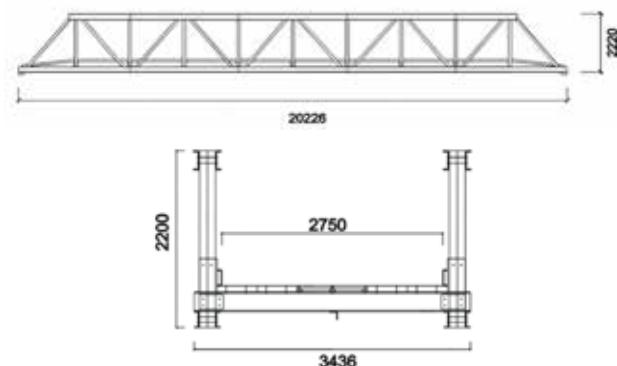


Fig. 10 – Elevação longitudinal e seção transversal da ponte (dimensões em mm). **Fonte:** [8].

Por ser constituída de material leve, a montagem da ponte foi realizada no local por mão-de-obra sem experiência utilizando ferramental simples, num prazo total de três horas. O peso próprio da estrutura montada resultou em 50 kN e a carga de ruptura foi de 350 kN, que ocorreu por flambagem lateral do banzo superior da treliça da ponte.

A Fig. 11 mostra o veículo do tipo MLC 12 realizando passagem sobre a estrutura montada. A ponte atendeu os requisitos de resistência, flecha e facilidade de transporte e montagem previsto no projeto.



Fig. 11 – Passagem de veículo no teste de campo. **Fonte:** [8].

3.2 Ponte grega em GFRP [9]

Uma ponte rodoviária, de caráter permanente, composta por um tabuleiro apoiado em treliça espacial de pGFRP com ligações em aço foi concebida neste trabalho desenvolvido pela Universidade de Patras, na Grécia.

A estrutura foi projetada para vencer um vão de 11,6 m com largura útil do tabuleiro de 4,2 m, conforme mostrado na Fig. 12, e trem tipo de até 300 kN. Os elementos estruturais de pGFRP têm seção transversal quadrada e foram produzidos com fibras de vidro do tipo S e resina éster vinílica. Os nós foram fabricados em aço.

O peso total da estrutura é de 127 kN e esta foi transportada até o local da montagem em um caminhão. Sua instalação durou duas horas e necessitou de dois guindastes para o posicionamento. As Fig. 13 e Fig. 14 mostram, respectivamente, a estrutura sendo transportada e posicionada sobre o vão.

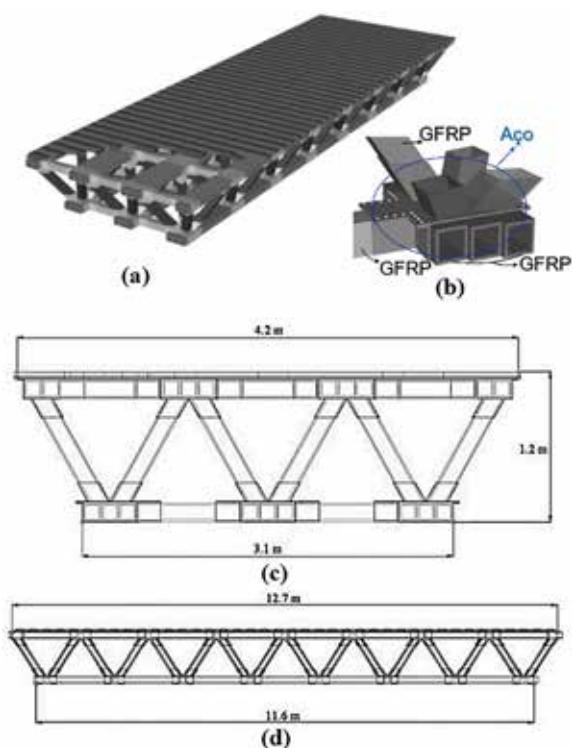


Fig. 12 – Ponte veicular de GFRP: (a) vista geral, (b) detalhe dos nós de aço, (c) seção transversal e (d) vista longitudinal. **Fonte:** [9].



Fig. 13 – Transporte da estrutura sobre caminhão. **Fonte:** [9].



Fig. 14 – Instalação da ponte sobre o vão com o auxílio de guindastes. **Fonte:** [9].

3.3 Pontilhão militar americano de FRP [10]

Com a finalidade de atender à mobilidade das tropas em situações de combate ou em emergência, o Exército americano desenvolveu um pontilhão para vencer um vão de quatro metros, composto por dois pisos de rodagem independentes entre si, com 76 cm de largura cada, conforme apresentado na Fig. 15.

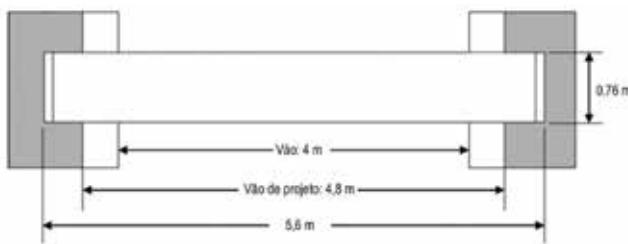


Fig. 15 – Um piso de rodagem do pontilhão militar de FRP. **Fonte:** [10].

O trem tipo adotado para o projeto foi de 270 kN (MLC 30), determinado a partir do que prescreve o Trilateral Design and Test Codes for Military Bridging and Gap-crossing Equipment [11].

A estrutura é composta por perfis quadrados colados, cujas faces superior e inferior são de polímero reforçado em fibra de carbono (CFRP) e as demais faces são de GFRP (fibra de vidro do tipo E e resina epóxica). A Fig. 16 mostra a seção transversal do piso de rodagem.

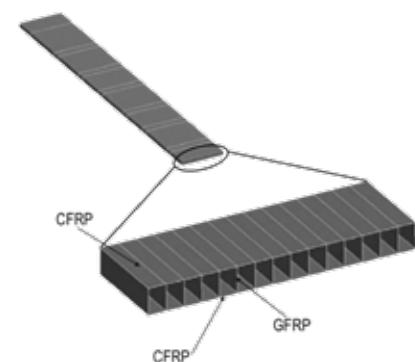


Fig. 16 – Seção transversal de um piso de rodagem. **Fonte:** [10].

O pontilhão foi posicionado manualmente sobre o vão sem a necessidade de pessoal especializado. O peso de cada piso de rolamento é de 2,03 kN, perfazendo um total de 4,06 kN para o pontilhão. A Fig. 17 traz um exemplo de passagem de veículo sobre o pontilhão.



Fig. 17 – Passagem de veículo sobre o pontilhão. **Fonte:** [10].

Os autores concluíram que o emprego de pontilhões militares com esse tipo de material é adequado aos princípios de lançamento rápido para pontes de pequenas brechas.

3.4 Ponte desmontável brasileira em GFRP [1;12;13]

Com vistas a apresentar uma alternativa às pontes militares utilizadas pelo Exército Brasileiro em operações militares e em apoio à Defesa Civil, uma ponte desmontável em material compósito fibra de vidro começou a ser desenvolvida em 2007 em parceria do Exército Brasileiro com a UFRJ.

O projeto da ponte desmontável em GFRP com largura total de quatro metros tinha por objetivo vencer um vão de até 30 m e suportar um veículo de até 280 kN. A Fig. 18 apresenta a seção transversal da ponte e o esquema estrutural das vigas do projeto.

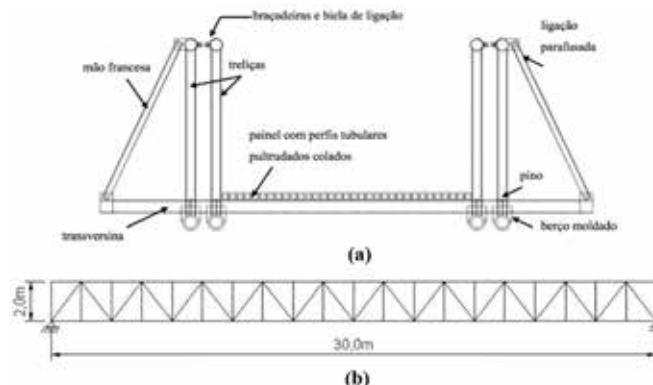


Fig. 18 – Ponte Desmontável: (a) seção transversal, (b) esquema estrutural das vigas. **Fonte:** [1].

O sistema estrutural desenvolvido consiste em:

- vigas treliçadas compostas por perfis pultrudados tubulares circulares de GFRP e nós metálicos, ligados por contato e pré-comprimidos pela utilização de fios de aço protendido no seu interior;
- transversinas formadas por dois perfis tubulares quadrados colados e apoiados sobre os nós metálicos;
- contraventamento lateral das vigas treliçadas por meio de mãos francesas;
- contraventamento horizontal do tabuleiro;
- piso com perfis pultrudados tubulares colados.

O projeto foi, inicialmente, dimensionado em escala real, porém, para a viabilidade econômica do teste das vigas em laboratório, foi desenvolvido um modelo reduzido na escala 1:2,3 a partir da Teoria da Semelhança dos Modelos Físicos (TSMF) [14], de forma que seus resultados pudessem ser extrapolados para o protótipo em verdadeira grandeza, refletindo o comportamento das vigas em tamanho real.

A escolha das ligações pré-comprimidas por contato ocorreu após a realização de ensaios de ligações entre chapas de GFRP com parafusos de aço submetidos ao corte duplo. Os autores verificaram que a resistência das chapas ligadas por parafusos

foi muito inferior à resistência do GFRP obtida nos ensaios de caracterização mecânica, tendo ocorrido a ruptura por rasgamento da chapa ou por contato do furo no parafuso. Assim, concluíram que a utilização de ligações parafusadas limita a capacidade resistente de projetos com materiais compósitos; por isso, esse tipo de ligação foi descartado no projeto da ponte desmontável.

A concepção da ligação por contato ativada pela pré-tração de fios de aço dispostos nos tubos de GFRP constituiu uma das inovações desse projeto, além do detalhamento e fabricação das juntas metálicas (nós) para a união das peças de GFRP e formação do sistema treliçado, conforme mostrado na Fig. 19. Inicialmente, os nós metálicos foram confeccionados com tubos de aço soldados resultando em peças de peso elevado e com diversas imperfeições. Posteriormente, eles foram fabricados em alumínio, conferindo mais leveza à estrutura.

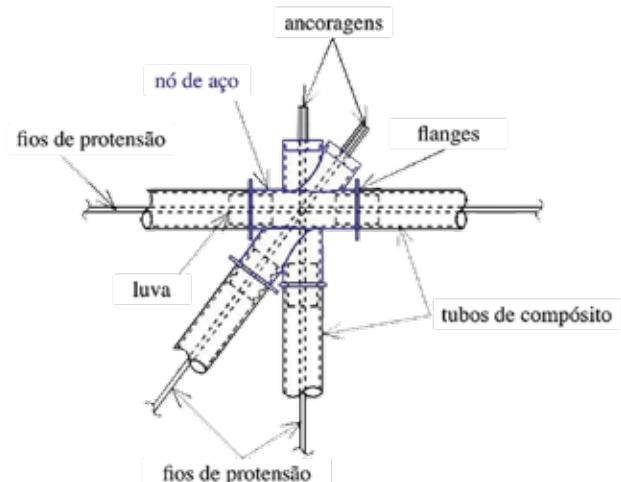


Fig. 19 – Detalhe tubo-nó da viga treliçada. **Fonte:** [12].

Os perfis pultrudados, grades injetadas e os fios de protensão foram adquiridos em um único lote. Os nós em alumínio foram fabricados em liga de alumínio 6351 pelo processo de fundição em molde de areia no ano de 2012, tendo recebido tratamento térmico tipo T6 (solubilização e envelhecimento) para aumento da sua dureza. Um nó comum e nó central do banzo inferior e um nó comum e nó central do banzo superior da treliça são apresentados na Fig. 20.

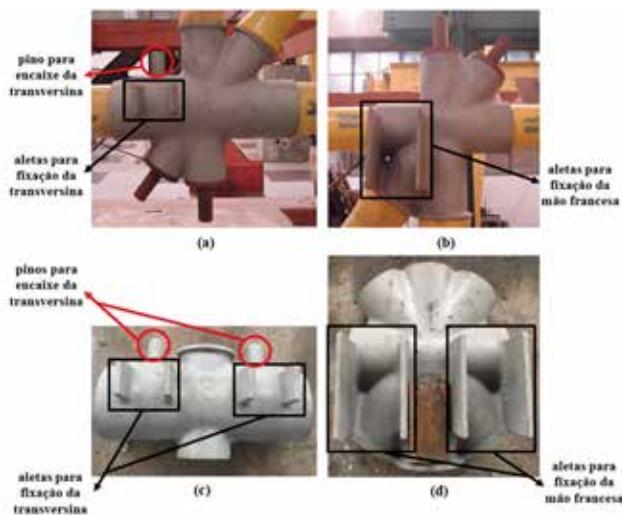


Fig. 20 – Nós de alumínio: (a) inferior, (b) superior, (c) central inferior e (d) central superior. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Os nós do banzo inferior foram moldados com um pino na parte superior para encaixe das transversinas e duas aletas na lateral para fixação das transversinas. Os nós do banzo superior foram moldados com duas aletas para o encaixe da mão francesa.

O reforço externo dos tubos das diagonais e montantes foi feito por laminação manual, com o posicionamento de luvas de alumínio em seu interior, enquanto os elementos de banzo superior e inferior tiveram seu reforço externo feito pelo batente interno dos nós de alumínio, e interno, com as luvas de alumínio, conforme mostrado na Fig. 21.

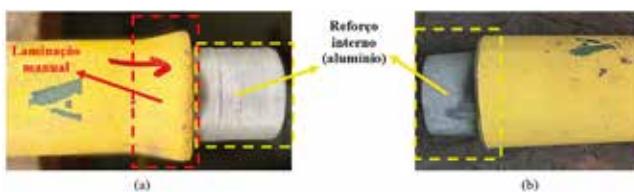


Fig. 21 – Reforços nos elementos de GFRP: (a) montantes e diagonais e (b) banzos superior e inferior. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

A TSMF foi aplicada apenas aos tubos de compósito, enquanto os nós e os fios de protensão foram adotados sem respeitar os fatores de escala. Os nós foram projetados apenas para a treliça do modelo reduzido, porém, no protótipo, estes serão mais leves uma vez que a espessura das peças do modelo reduzido ficou limitada à espessura mínima necessária para a fundição.

A área dos tubos de GFRP no modelo reduzido foi distorcida em relação ao modelo em escala real (protótipo). Dessa forma, como a escala adotada no modelo reduzido foi $k_1 = 1/2,3$, foram obtidas as seguintes escalas:

- área dos perfis: $k_A = k_{13} = 1/(2,3)^3$;
- peso específico aparente: $k_{\text{aparente}} = 1/k_1 = 2,3$;
- peso próprio: $k_{pp} = k_{13} = 1/(2,3)^3$;
- carga móvel aplicada: $k_F = k_{13} = 1/(2,3)^3$.

O programa experimental desenvolvido nos trabalhos consistiu na montagem de uma das vigas da ponte com comprimento total de 13,06 m (equivalente ao comprimento de 30 m para protótipo, sendo obedecido o fator de escala adotado de 1:2,3).

Inicialmente, foram utilizados nós de aço com reforço de jaquetas de aço, luvas de aço e luvas de compósito nos nós, conforme mostrado na Fig. 22.

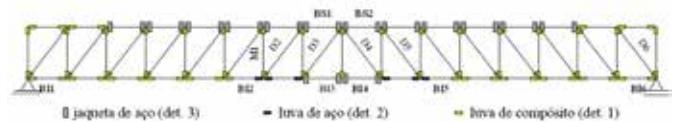


Fig. 22 – Ligações adotadas nos primeiros ensaios. **Fonte:** [12].

A carga de ruptura obtida neste ensaio foi de 46 kN, o equivalente a 560 kN de carga esperada no protótipo, de acordo com a TMSF [14]. A ruptura ocorreu por flambagem lateral do banzo superior da viga.

Posteriormente, os nós de aço foram substituídos por nós de alumínio com reforços internos feitos por luvas de alumínio nas ligações tubo pGFRP-nós, conforme mostrado na Fig. 23.

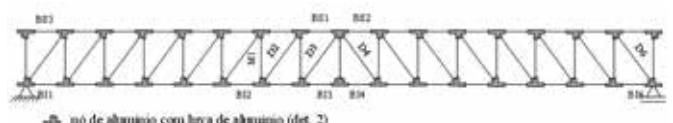


Fig. 23 – Ligações adotadas nos ensaios seguintes. **Fonte:** [12].

Com a utilização dos nós de alumínio, a ruptura também ocorreu devido à flambagem lateral da viga para uma carga estática de 42 kN, o equivalente a 511 kN de carga esperada para o protótipo, de acordo com a TSMF [14].

Apesar de propiciarem uma estrutura mais flexível, os nós de liga de alumínio ainda apresentam vantagens em relação aos nós de aço. Eles não estão sujeitos à corrosão, são mais leves e facilitam a montagem da viga-treliça, tanto pela diminuição do peso como pela facilidade de encaixe dos tubos de compósito. Os nós de liga de alumínio são moldados, o que reduz muito a incidência de defeitos durante a fabricação das peças [12].

Em todos os ensaios, o sistema de carregamento consistiu na aplicação de cargas por meio de tirantes presos em dois nós no banho inferior das vigas e ligados a dois macacos hidráulicos que reagiram a uma placa de reação, conforme mostrado na Fig. 24.

Como o carregamento no modelo não tem a mesma distribuição espacial do carregamento de projeto da ponte (três eixos de aplicação de carga, conforme a viatura de projeto) e, sendo linear o comportamento da estrutura em serviço, os autores utilizaram a analogia de viga para se calcular, a partir dos deslocamentos obtidos no ensaio de carregamento da viga-treliça, a rigidez equivalente de uma viga biapoiada, chegando à conclusão de que a capacidade portante da viga-treliça satisfez os requisitos de projeto e segurança requeridos para a estrutura e que o momento resistente de projeto ($1.141,5 \text{ kN.m}$) foi superior ao momento solicitante de projeto no protótipo ($982,7 \text{ kN.m}$) [1]. Tais implicações viabilizaram a continuação do projeto de montagem da ponte completa.

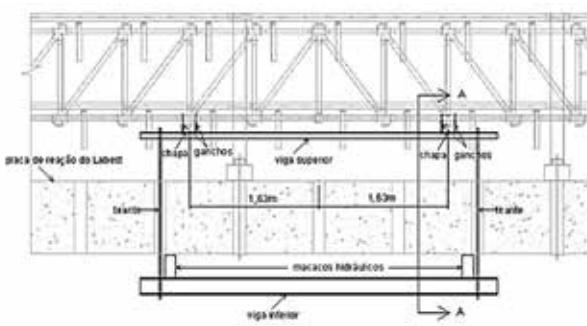


Fig. 24 – Croqui do sistema de carregamento adotado. **Fonte:** [1].

3.5 Pontilhão canadense em GFRP [15]

O Exército do Canadá desenvolveu uma ponte para pequenas brechas para emprego, tanto

em atividades militares, quanto em situações de catástrofes naturais. Este projeto procurou utilizar materiais leves e baratos, que viabilizassem o transporte e lançamento da estrutura com o mínimo de pessoal e equipamentos especializados.

A ponte é composta por dois pisos de rodagem em viga caixão de inércia variável, com inclinação de $9,4^\circ$ (Fig. 25). Cada piso possui 4,8 m de comprimento, 1,2 m de largura e altura no ponto central de 51,3 cm. A estrutura foi projetada para suportar um veículo sobre rodas de 270 kN.

As vigas foram compostas por perfis quadrados e chapas de GFRP (fibra de vidro tipo E e resina éster vinílica para os perfis, resina de poliéster para as chapas inferiores e laterais e resina de isopolíester para a chapa superior), todos colados com adesivo de alta resistência.

Cada piso de rolamento pesava 2,5 kN, facilitando o transporte e posicionamento da estrutura sobre o vão, não havendo necessidade de pessoal ou equipamento especializado para tal. A Fig. 26 traz o exemplo da passagem de um veículo sobre um piso de rolamento.

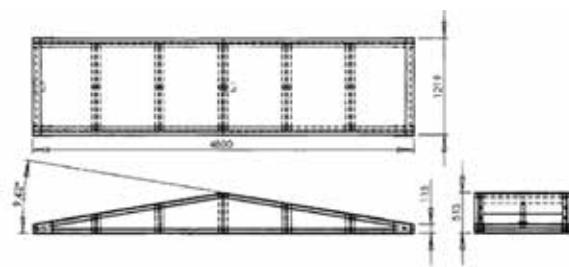


Fig. 25 – Vista superior e em elevação de um piso de rodagem. **Fonte:** [15].



Fig. 26 – Passagem do veículo sobre um piso de rolamento. **Fonte:** [15].

2.6 Ponte modular híbrida FRP/alumínio chinesa [16]

A estrutura é composta por dois pisos de rodagem em alumínio apoiados sobre treliças espaciais compostas por elementos de alumínio, GFRP e HFRP (polímero reforçado com fibras de vidro tipo E, carbono e basalto).

A ponte foi projetada para um vão de 12 m, largura útil de 3,2 m (Fig. 27) e capacidade para um trem-tipo de 100 kN especificado no Código Geral para Projetos de Pontes Militares da China (General Code for Military Bridge Design) [17].

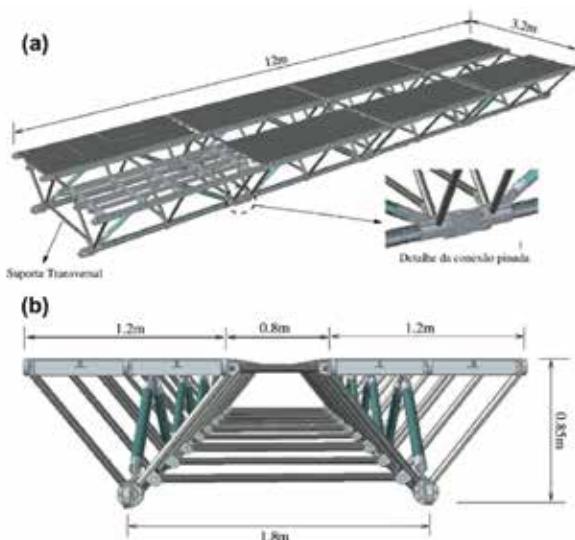


Fig. 27 – Ponte modular híbrida. (a) vista geral, (b) seção transversal. **Fonte:** [16].

A conexão dos módulos da ponte foi feita por pinos de alumínio enquanto a dos elementos metálicos utilizou soldagem. O encaixe dos elementos de FRP e os metálicos foram realizadas por contato. A Fig. 28 mostra os detalhes das conexões que são semelhantes às utilizadas por Teixeira, Pfeil e Batista [12]. A montagem total de um piso de rodagem com quatro módulos durou 45 minutos, com o emprego de 12 pessoas. A montagem completa durou 90 minutos.

O peso total da estrutura é de 12 kN, possibilitando uma fácil montagem. O transporte da estrutura pode ser feito em módulos, não exigindo veículos muito grandes e simplificando a logística do transporte até os locais de montagem.

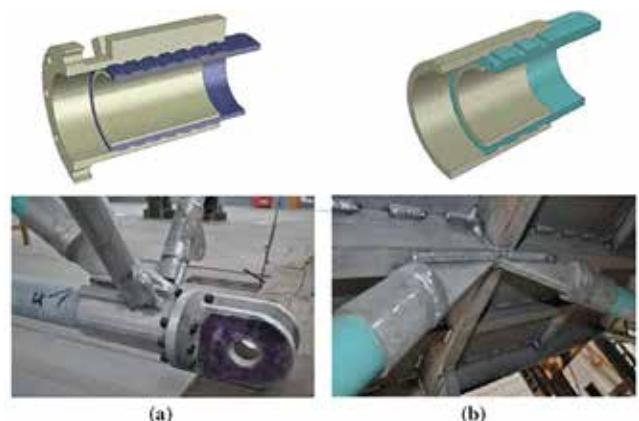


Fig. 28 – Vista em corte das conexões: (a) HFRP, (b) GFRP. **Fonte:** [16].

3.7 Ponte temporária taiwanesa de GFRP [18]

Taiwan encontra-se em uma região com elevada incidência de terremotos e enchentes que, eventualmente, provocam colapso de pontes rodoviárias, com a consequente interrupção no tráfego. Esse cenário motivou o desenvolvimento de uma ponte emergencial de resgate com 10 m de comprimento e três metros de largura, para um trem-tipo máximo de 50 kN.

A estrutura biapoiada é composta por vigas longitudinais de perfis I pultrudados de GFRP (pGFRP), ligadas por meio de enrijecedores metálicos e parafusos e um piso gradeado de GFRP. O esquema da estrutura é mostrado na Fig. 29.

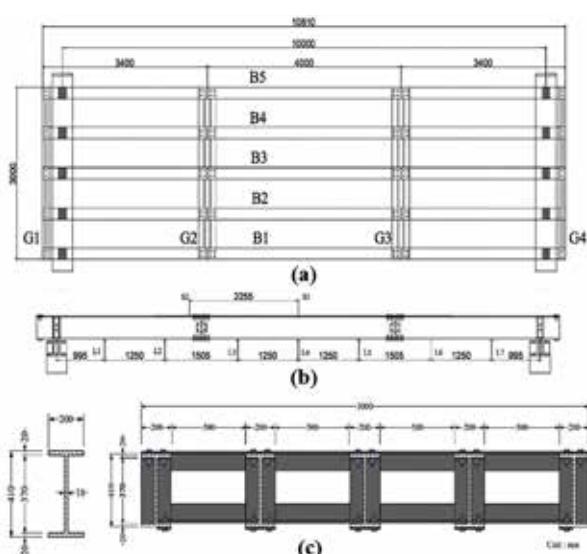


Fig. 29 – Ponte temporária: (a) vista superior, (b) elevação longitudinal e (c) seção transversal. **Fonte:** [18].

Devido ao baixo peso (29,42 kN), a estrutura foi montada por estudantes, com auxílio de ferramental simples, num período de 10 horas.

O posicionamento da estrutura sobre o vão utilizou um pequeno guindaste. A ponte atendeu os critérios de projeto com elevado fator de segurança e resultou em uma estrutura de peso próprio baixo, facilitando o transporte e a montagem.

3.8 Ponte emergencial estaiada taiwanesa de GFRP [19]

O projeto da ponte utiliza o mesmo sistema de tabuleiro do item anterior, tendo o vão de pGFRP sido aumentado para 20 m. Entre os vãos de 10 m (aço) e 20 m (pGFRP), foi construído um pilar de aço de onde saíam os estais para suporte do tabuleiro, conforme mostrado na Fig. 30. O trem-tipo de projeto foi mantido em 50 kN.

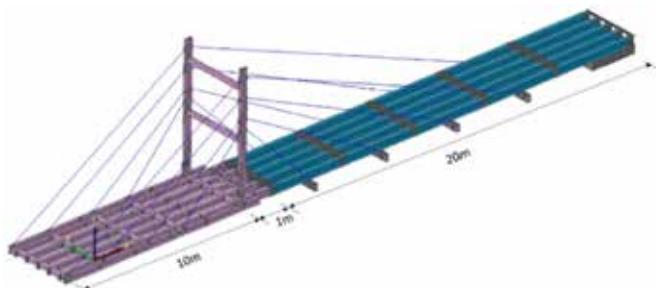


Fig. 30 – Esquema de ponte estaiada com pGFRP em azul e elementos de aço em roxo. **Fonte:** [19].

Para atender ao requisito emergencial em situações em que não é possível acessar outra margem, foi realizada a montagem das seções suspensas sobre o vão com o auxílio de um contrapeso. Trinta pessoas participaram da montagem, utilizando ferramental simples e um pequeno guindaste. A montagem durou seis horas. A Fig. 31 mostra a passagem de um pequeno caminhão sobre a ponte.

O peso total da estrutura, considerando os elementos metálicos, é de 58,84 kN, possibilitando que a estrutura seja facilmente transportada por pequenos caminhões e facilitando consideravelmente a logística de montagem.



Fig. 31 – Passagem do veículo sobre a ponte estaiada. **Fonte:** [18].

4. Estudo experimental da ponte completa desmontável brasileira em GFRP

Com os resultados obtidos por Teixeira [1] e Teixeira, Pfeil e Batista [12,13], foi dada continuidade aos trabalhos de desenvolvimento da ponte desmontável brasileira em GFRP.

Dessa forma, uma montagem completa do modelo reduzido da ponte em escala 1:2,3 foi realizada em laboratório. A estrutura, com 6,5 m de comprimento e 4,0 m de largura, foi montada nas instalações da COPPE/UFRJ por três pessoas num prazo total de 18 horas, com a utilização de ferramental simples e auxílio de uma talha fixada em uma ponte rolante. Esse prazo foi calculado de acordo com a experiência do pessoal envolvido na montagem de estruturas dessa natureza, tendo sido majorado em 3 vezes, considerando-se o fator de escala de 2,3. Diferentemente da estrutura apresentada no item 3.4 (Fig. 18), a ponte montada apresentou apenas uma treliça de cada lado do tabuleiro.

As propriedades mecânicas dos perfis utilizados nesse trabalho são as mesmas indicadas no desenvolvimento da ponte brasileira do item 3.4, podendo ser encontradas, em detalhe, na publicação em referência [1].

A Fig. 32 apresenta a seção transversal da ponte, uma vista lateral e uma vista superior, com o detalhamento dos elementos de contraventamento

horizontal e vertical. Nesta figura, o piso só foi ilustrado em metade do vão na vista em elevação, para possibilitar uma melhor visualização dos contraventamentos horizontais.

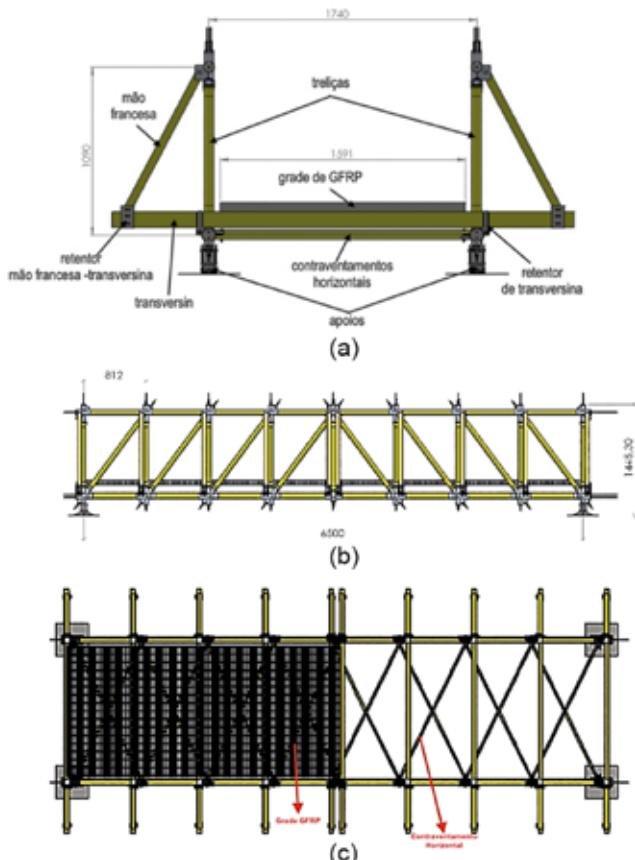


Fig. 32 – Ponte desmontável: (a) seção transversal, (b) elevação longitudinal e (c) vista superior (dimensões em mm). **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Um dos objetivos da montagem foi verificar o processo construtivo idealizado, visando à aplicação das protensões e a montagem da estrutura completa no campo.

As etapas foram as seguintes: montagem das vigas nas bancadas; protensão de montantes, diagonais e banzo superior; protensão parcial do banzo inferior; içamento e assentamento das vigas; instalação dos contraventamentos horizontais; posicionamento das vigas transversais; instalação das mãos francesas; posicionamento do piso e protensão final do banzo inferior. A Fig. 33 mostra a ponte montada.



Fig. 33 – Ponte do modelo reduzido montada. **Fonte:** Acervo dos autores.

Para a análise do comportamento da estrutura em termos de cargas, deformações e deslocamentos, durante as fases de montagem e carregamento, foram utilizados 54 sensores, sendo 33 extensômetros elétricos de resistência (eer) com 5 mm de comprimento, da marca Kyowa, nove flexímetros com curso de 100 mm, da marca Kyowa, e 12 células de carga fabricadas a partir de eer. A Fig. 34 apresenta a disposição dos sensores na ponte.

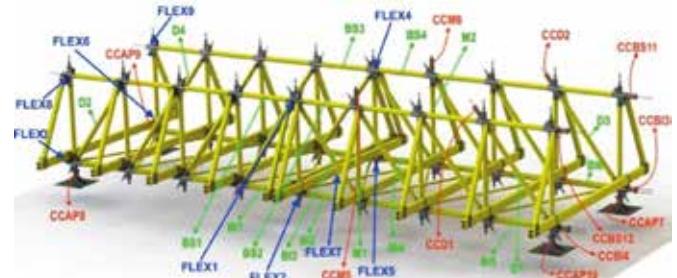


Fig. 34 – Ponte com todos os sensores. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Para o sistema de carregamento foi considerado o trem-tipo indicado por Teixeira [1], a viatura AV-LMU ASTROS II, cujo peso total é de 280 kN [20]. A mesma escala de 1:2,3 foi considerada para as dimensões do trem tipo, bem como suas cargas, respeitando-se o previsto na TSMF [14]. A Fig. 35 apresenta a viatura ASTROS

com suas principais dimensões, e a Fig. 36 representa o esquema do veículo já com as dimensões reduzidas.

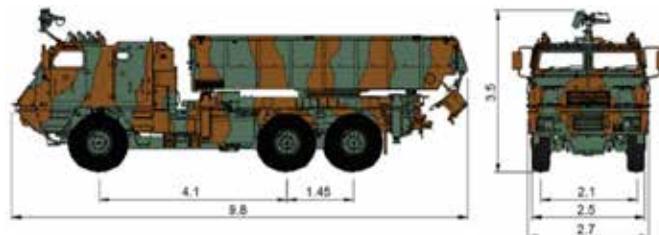


Fig. 35 – Dimensões da viatura ASTROS, em metros. **Fonte:** [20].

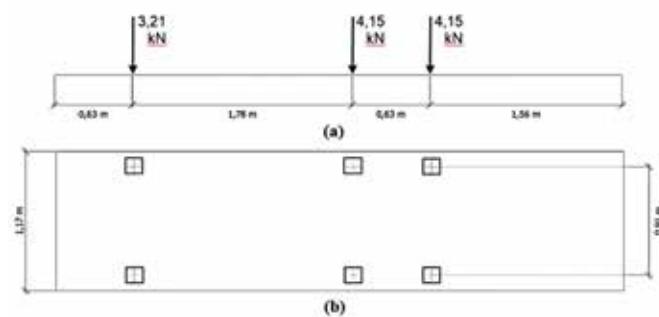


Fig. 36 – Esquema do veículo e dimensões do modelo reduzido: (a) em elevação, (b) em planta. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Conhecidas as dimensões do veículo, foi fabricada uma estrutura de carregamento em perfis de aço que pudesse simular os eixos da viatura. Para garantir que essa estrutura não se deformaria com a aplicação do carregamento, foram realizadas simulações utilizando a ferramenta Solidworks Simulation, cujos deslocamentos verticais são apresentados na Fig. 37. Verificou-se que os deslocamentos obtidos foram mínimos, na ordem de 0,45 mm para uma carga aplicada de 130 kN.

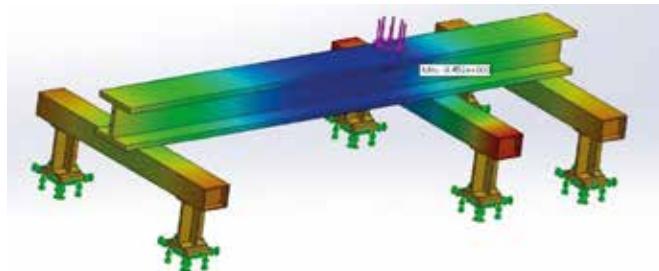


Fig. 37 – Modelagem numérica da estrutura de carregamento com os deslocamentos verticais. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

A estrutura de carregamento, após a fabricação, foi pesada com o auxílio de uma célula de carga presa à talha da ponte rolante, tendo sido encontrado o valor de 9,48 kN. A Fig. 38 apresenta a estrutura de carregamento posicionada sobre a ponte.

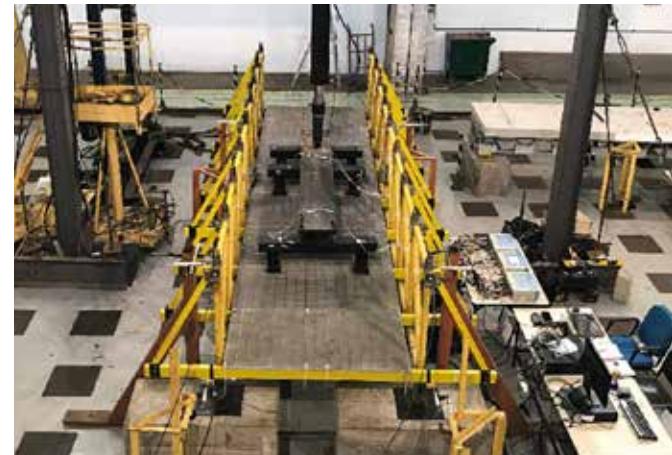


Fig. 38 – Estrutura de carregamento posicionada sobre a ponte. **Fonte:** Acervo dos autores.

A ponte montada apresentou peso próprio de 7,51 kN. Pela escala adotada no projeto por Teixeira [1], pode-se estimar o peso próprio do protótipo de 15 m em 91,37 kN. Este valor é aproximado, tendendo a ser um pouco menor, uma vez que os nós de alumínio, apesar de estarem na escala reduzida, tiveram que manter as espessuras dos nós do protótipo devido ao processo de fundição, acarretando peças de maior peso.

Foram realizados ensaios estáticos da ponte completa para verificação do comportamento da estrutura em serviço e na ruptura. Devido ao peso próprio e à protensão final, a contra flecha média medida no meio do vão das vigas foi de 21,04 mm. E, com a aplicação da carga de serviço (11,50 kN), a contra flecha média no centro das vigas passou a 18,56 mm, correspondendo a uma deformação vertical média de 2,48 mm devido ao carregamento aplicado.

A ruptura da ponte ocorreu devido à flambagem lateral de uma das vigas, acarretando compressão excêntrica no elemento de pgFRP do banho superior no vão central, provocando seu esmagamento. A Fig. 39 mostra a estrutura rompida.

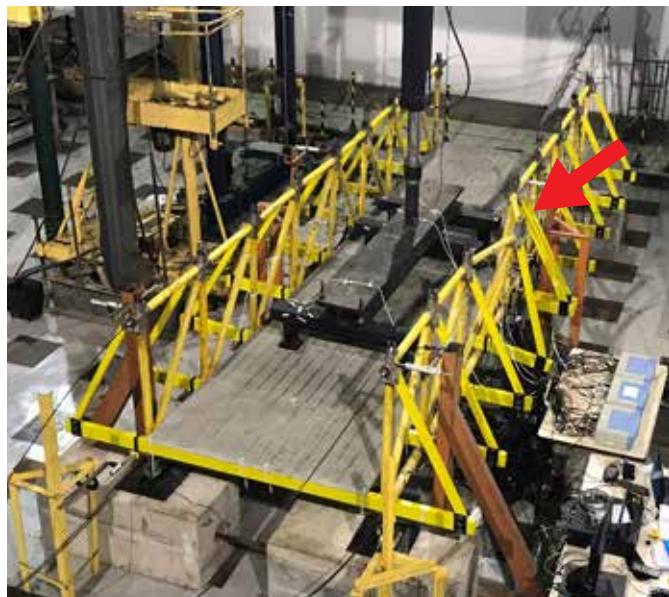


Fig. 39 – Vista superior da ruptura da ponte. **Fonte:** Acervo dos autores.

A carga máxima aplicada ao sistema foi de 97,62 kN, porém, devido à TSMF [14], há necessidade de ser adicionado peso ao modelo reduzido de tal modo que este represente bem a parcela de peso próprio do protótipo. Assim, foi subtraído um total de 17,27 kN (2,3 vezes o peso próprio da ponte de modelo reduzido) de tal forma que a carga máxima considerada foi de 80,35 kN.

Para estimar a carga máxima de ruptura na ponte protótipo, com 13 m de vão, considerou-se o fator de escala elevado à terceira potência, conforme previsto no projeto por Teixeira [1]. Assim, estimou-se em 977,6 kN ($80,35 \times 2,3^3$) a carga máxima para ruptura da ponte protótipo.

O Eurocomp [21] considera os seguintes coeficientes de redução de resistência para os materiais pultrudados após a cura total e em temperaturas inferiores à temperatura de amolecimento da resina utilizada: 1,39, para combinações de carga de curta duração, e 3,54, para combinações de carga de longa duração. Então, para a estimativa de carga de projeto da ponte (capacidade máxima) utilizou-se o coeficiente de 1,39, resultando em 703,3 kN.

5. Comparação entre as pontes de FRP apresentadas e as pontes metálicas utilizadas pelo Exército Brasileiro

Com a finalidade de apresentar um panorama da utilização dos materiais FRP em estruturas de ponte, bem como comparar aspectos dessas estruturas com as pontes metálicas utilizadas pelo Exército Brasileiro, foi elaborada a Tabela 1.

Deve-se ressaltar que os valores de carga apresentados na Tabela 1 são de ruptura das pontes em FRP, conforme apresentado nos itens 3 e 4, e de projeto das pontes metálicas. Para a ponte brasileira, estimou-se a capacidade máxima dividindo-se a carga de ruptura por 1,39, conforme já apresentado.

Tabela 1 – Comparativo entre as pontes metálicas utilizadas pelo Exército Brasileiro e as pontes de FRP.

Ponte	Peso próprio (kN)	Montagem (h)	Nr pessoas	Nr pessoas x hora
Alemã	50	3	5	15
Grega	127	48	8	384
Americana	4	imediata	4	-
Brasileira (protótipo)	91	40	6	240
Canadense	5	imediata	8	-
Chinesa	12	1,5	12	18
Taiwanesa (2015)	29	10	10	100
Taiwanesa (2016)	59	6	30	180
Ponte Bailey M2	209	8	33	264
Ponte M4T6	55	2,5	15	37,5
Ponte Compact 200	304	36	100	3600
Ponte LSB	256	32	36	1152
Ponte	Vão (m)	Carga de Ruptura (kN)	Carga de Projeto (kN)	
Alemã	20,00	350	109	
Grega	11,60	-	300	
Americana	4,80	-	270	
Brasileira (protótipo)	13,00	978	703	
Canadense	4,00	330	270	
Chinesa	12,00	-	100	
Taiwanesa (2015)	10,00	200	50	
Taiwanesa (2016)	20,00	-	50	
Ponte Bailey M2	15,42	-	510	
Ponte M4T6	13,71	-	390	
Ponte Compact 200	15,42	-	570	
Ponte LSB	15,42	-	570	

Fonte: Elaborado pelos autores.

A primeira análise diz respeito ao peso próprio das estruturas montadas.

Em comparação com a ponte Bailey simples-simples de 15,42 m de vão, a ponte brasileira apresenta 43,72% do peso próprio, enquanto para as pontes Compact 200 e LSB, essa proporção cai para 30,10% e 35,70%, respectivamente.

O peso próprio da ponte brasileira é 67% maior que o da ponte M4T6. Porém, a capacidade máxima desta ponte é de 390 kN, correspondendo a 55% da capacidade máxima da ponte brasileira.

Os demais trabalhos apresentados, apesar de terem pesos próprios das estruturas montadas, assim como o esquema estrutural adotado, mostraram que os procedimentos de montagem foram simples, com a necessidade de pouca mão-de-obra para um tempo reduzido de montagem.

O número de pessoas necessárias para a realização das montagens das pontes é uma variável que depende do peso próprio da estrutura, dos equipamentos e ferramentas disponíveis e do processo de montagem em si. Porém, a partir dos dados obtidos, é possível verificar (do ponto de vista do peso próprio) que as pontes em pFRP demandam menos mão-de-obra do que as pontes metálicas empregadas pelo Exército Brasileiro, e, consequentemente, tempo de montagem menor.

Ao analisar o produto Nr de pessoas × hora (Tabela 1), verifica-se que a montagem da ponte brasileira é bem mais rápida do que a das pontes Bailey, Compact 200 e LSB, se for considerado o mesmo número de pessoas para a montagem.

Essa mesma comparação com as demais pontes pFRP indica que a ponte brasileira demanda maior tempo que a maioria das pontes em FRP. Isto pode ser explicado pelo fato dessa ser a única que, no processo de montagem, necessita da realização de protensões nos elementos constituintes das vigas. Essa etapa deve ser feita com bastante critério, uma vez que protensões diferentes das estabelecidas no projeto terão influência direta na capacidade de suporte da estrutura.

Outra conclusão é que, havendo aumento do efetivo para a montagem, o tempo necessário para a ponte brasileira poderá reduzir.

Por fim, ao se compararem as capacidades de suporte, verifica-se que a ponte Bailey possui 72,5% da capacidade de suporte da ponte em GFRP brasileira, enquanto a ponte M4T6, 55,5%, e a Compact 200 e LSB, cerca de 81,0%.

6. Conclusões

O presente trabalho apresentou as pontes militares metálicas empregadas pelo Exército Brasileiro, não apenas em operações militares, mas também em atividades de apoio à Defesa Civil nos casos de calamidade pública.

Além disso, foram apresentados alguns trabalhos de utilização de materiais pFRP em projetos de pontes ao redor do mundo, os quais demonstraram a viabilidade da utilização desses materiais no que diz respeito à resistência, facilidade de transporte e montagem.

Uma ponte em GFRP (fibra de vidro e resina de poliéster) foi testada pelo Exército Brasileiro em parceria com a UFJR. Foi realizada a montagem da estrutura completa em modelo reduzido na escala 1:2,3 com 6,5 m de comprimento e o ensaio de carregamento estático para verificação do comportamento dela em serviço e na ruptura. Desta montagem foi possível concluir que:

- a ponte não exigiu pessoal e equipamentos especializados para a sua montagem;
- devido ao baixo peso dos elementos constituintes da estrutura, em comparação aos elementos de materiais de construção tradicionais, o tempo de lançamento se mostrou bastante eficiente, tendo em vista ter sido realizada por apenas duas pessoas;
- a montagem a partir dos elementos completamente desmontados diminui os volumes a serem transportados, demandando menos viaturas especializadas para o transporte;
- os procedimentos de protensão dos elementos das vigas indicaram ser adequados para execução no campo;
- a carga de ruptura da estrutura foi 8 vezes superior à de projeto;

- a ruptura ocorreu conforme o previsto, havendo o deslocamento transversal do nó superior da viga; e
- comparando com as pontes metálicas, atualmente utilizadas pelo Exército Brasileiro, a ponte desmontável de pFRP poderá potencializar o apoio em calamidades públicas ou em situações de combate.

Das verificações realizadas neste trabalho e com a finalidade de dar continuidade ao estudo de ponte desmontável em material compósito, algumas sugestões foram levantadas, das quais:

- modificar o projeto de contraventamento das mãos francesas, retirando sua ligação com as transversinas, ou enrijecendo-as suficientemente, de forma a aumentar a eficiência do contraventamento vertical;
- fabricar um carrinho com a geometria da viatura ASTROS para melhor simular a distribuição de cargas na ponte;
- avaliar o comportamento dinâmico da estrutura; e
- verificar as propriedades físicas e mecânicas dos perfis do projeto sob ação de temperaturas acima de 60°C.

Referências

- [1] TEIXEIRA, A. M. A. J. Ponte desmontável em material compósito de fibra de vidro. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [2] MARSH, E. Composites in Infrastructure: building new markets. Amsterdam: Elsevier, 2000.
- [3] ASCIONE, L.; GUTIERREZ, E.; DIMOVA, S.; PINTO, A.; DENTON, S. Prospect for new guidance in the design of FRP: support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. Ispra, VA: European Comission, 2016.
- [4] MINISTÉRIO DO EXÉRCITO. Estado Maior do Exército. Manual Técnico T 5-277 – Ponte de painéis tipo Bailey, M2 montada sobre suportes fixos – 1^a parte. Brasília, DF: Ministério do Exército, 1979.
- [5] MINISTÉRIO DO EXÉRCITO. Estado Maior do Exército. Manual Técnico T 5-278 – Ponte M4T6. Brasília, DF: Ministério do Exército, 1975.
- [6] EXÉRCITO BRASILEIRO. 3º Batalhão de Engenharia de Combate. Nota de aula. Trabalho acadêmico (Disciplina Pnt Compact200). 3º Batalhão de Engenharia de Combate. Cachoeira do Sul, 2005.
- [7] MINISTÉRIO DA DEFESA. Exército Brasileiro. Secretaria Geral do Exército. Manual Técnico EB50-MT-06.001 – Ponte de Apoio Logístico LSB – Parte I e II. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2019.
- [8] SEDLACEK, G.; TRUMPF, H.; CASTRISCHER, U. Development of a light-weight emergency bridge. Structural Engineer International, v. 14, n. 4, p. 282–287, 2004. <https://doi.org/10.2749/101686604777963702>.
- [9] KOSTOPOULOS, V.; MARKOPOULOS, Y. P.; VLACHOS, D. E.; KATERELOS, D.; GALIOTIS, C.; TSIKNIAS, T. et al. Design and construction of a vehicular bridge made of glass/polyester pultruded box beams. Plastics, Rubbers and Composites, v. 34, n. 4, p. 201–207, 2005. <https://doi.org/10.1179/174328905X55641>.
- [10] ROBINSON, M. J.; KOSMATKA, J. B. Development of a short-span fiber-reinforced composite bridge for emergency response and military applications. Journal of Bridge Engineering, v. 13, n. 4, p. 388–397, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2008\)13:4\(388\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:4(388)).
- [11] HORNBECk, B.; KLUCK, J.; CONNOR, R. Trilateral design and test code for military bridging and gap-crossing equipment. Warren MI: Tacom Research Development and Engineering Center Warren MI, 2005.
- [12] TEIXEIRA, A. M. A. J.; PFEIL, M. S.; BATTISTA, R. C. Viga Treliçada com Perfis Pultrudados e Conexões Metálicas para Ponte Desmontável. Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, v. 35, 2012.
- [13] TEIXEIRA, A.M.A.J.; PFEIL, M. S.; BATTISTA, R. C. Structural evaluation of a GFRP truss girder for a deployable bridge. Composite Structures, v. 110, p. 29-38, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.11.014>.
- [14] CARNEIRO, F. L. Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos. 2. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1993.
- [15] WIGHT, R. G.; ERKI, M. A.; SHYU, C. T.; TANOVIC, R.; HEFFERNAN, P. J. Development of FRP short-span deployable bridge – experimental results. Journal of Bridge Engineering, v. 11, n. 4, p. 489–498, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2006\)11:4\(489\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:4(489)).

- [16] ZHANG, D.; ZHAO, Q.; HUANG, Y.; LI, F.; CHEN, H.; MIAO, D. Flexural properties of a lightweight hybrid FRP-aluminum modular space truss bridge system. *Composite Structures*, v. 108, p. 600–615, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.058>.
- [17] CHINESE ARMY. China National Military Standard. General Code for Military Bridge Design. Beijing: China National Military Standard, 1992.
- [18] HUNG, H. H.; SUNG, Y. C.; CHANG, K. C.; YIN, S. H.; YEH, F. Y. Experimental testing and numerical simulation of a temporary rescue bridge using GFRP composite materials. *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 181–193, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.199>
- [19] YEH, F. Y.; CHANG, K.-C.; SUNG, Y.C.; HUNG, H. H.; CHOU, C. C. A novel composite bridge for emergency disaster relief: concept and verification. *Composite Structures*, v. 127, p. 199–210, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.012>
- [20] AVIBRÁS INDÚSTRIA AEROESPACIAL. Informações AV LMU. 2017.
- [21] CLARKE, J. L. (ed). Structural design of polymer composites – Eurocomp. design code and background document. Abingdon: Taylor & Francis, 1996.

Gaseificação do eucalipto em leito fixo *downdraft* visando a obtenção de gás de síntese

Roberto Canuto Paiva, Luiz Eduardo Pizarro Borges*, Fábio Bellot Noronha

Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
*luiz@ime.eb.br

RESUMO: Gaseificação é o processo em que ocorre a conversão termoquímica da biomassa, gerando gás combustível ou gás de síntese, dependendo das condições reacionais, uso de catalisadores e do tipo de gaseificador utilizado. O gaseificador foi alimentado por batelada e o ar foi alimentado continuamente em vazões que variaram de $5,62 \times 10^{-3}$ mol/s a $9,96 \times 10^{-3}$ mol/s e o fator de ar ficou na faixa de 0,41 a 0,48. Balanços de massa, balanço de energia e fenômenos termoquímicos do leito de biomassa foram estudados. Os gases gerados durante o processo de gaseificação foram analisados a cada 20 minutos por cromatografia gasosa, utilizando Cromatógrafo Varian CP 3800 com detector de TCD. Picos de frações de H_2 e CO de até 12,8% e 14,8%, respectivamente, e frações médias de 5,36% de H_2 e 6,73% de CO foram observadas para a vazão de ar de $9,96 \times 10^{-3}$ mol/s. O gás produzido apresentou um poder calorífico superior de 1.617 kJ/Nm³ e um poder calorífico inferior de 1.491 kJ/Nm³.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa. Eucalipto. Gaseificação. Pirólise.

ABSTRACT: Gasification is a process where thermochemical conversion of biomass occurs yielding combustible gas or synthesis gas, depending on reaction circumstances, catalyst use or type of gasifier. The gasifier was fed in batches while air was continuously fed at flow rates between $5,62 \times 10^{-3}$ mol/s and $9,96 \times 10^{-3}$ mol/s. Air factors were in the range of 0,41 to 0,48. Mass and energy balances were realized, and thermochemical phenomena in the biomass bed were studied. Gas produced during the gasification process was analyzed every 20 minutes by gas chromatography with a Varian CP 3800 chromatographer equipped with a TCD detector. Peaks of 12,8% H_2 and 14,8% CO and mean fractions of 5,36% H_2 and 6,73% CO were registered at air flow of $9,96 \times 10^{-3}$ mol/s. The gas produced had a higher calorific value of 1617 kJ/Nm³ and a lower calorific value of 1491 kJ/Nm³.

KEYWORDS: Biomass. Eucalyptus. Gasification. Pyrolysis.

1. Introdução

A crescente preocupação com o balanço de gás carbônico na atmosfera tem sido um fator impulsionador do desenvolvimento de novas formas de combustível [1]. Nesse âmbito, a utilização da biomassa no lugar de combustíveis fósseis tem despertado o interesse de órgãos governamentais, da indústria e da comunidade científica [2]. Além disso, a biomassa é um recurso amplamente disponível, tornando possível a geração de energia mesmo em regiões de difícil acesso [3]. Algumas regiões da Amazônia brasileira são exemplos de locais para os quais a biomassa seria uma boa solução para a geração de energia. Contudo, os sistemas de recuperação de energia modernos requerem substâncias com

propriedades bem definidas e, normalmente, toleram baixos níveis de impurezas. Estes últimos requisitos contrastam fortemente com as propriedades físicas e químicas da biomassa [4].

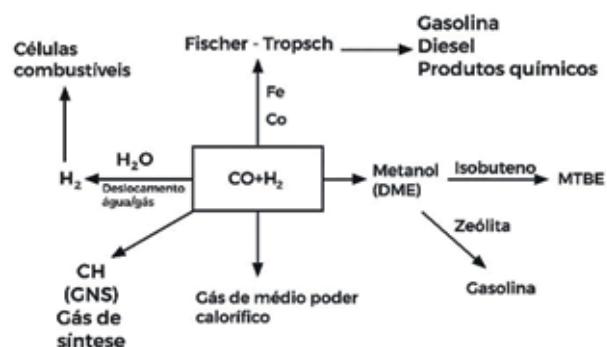


Fig. 1 – Exemplos de possibilidades de aproveitamento do gás de síntese. Fonte: Adaptado de [5].

Dado esse contexto, anseia-se pela transformação da biomassa em algo mais aplicável em sistemas mais refinados, os quais requerem alto nível de pureza. O gás de síntese talvez seja a solução tecnológica para esta intenção. Esse gás é uma mistura de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2), apresentando grande versatilidade industrial. As aplicações dessa mistura abrangem inúmeros processos, como, por exemplo: reação de deslocamento (*shift*) para produção de hidrogênio; reação de Fisher-Tropcsch para obtenção de hidrocarbonetos; produção catalítica de metanol; produção do gás natural sintético (GNS); ou queima direta em motores de combustão [5]. A Fig. 1 apresenta a aplicação do gás de síntese para geração de energia e produção de diversos compostos químicos.

1.1 Aspectos gerais da gaseificação

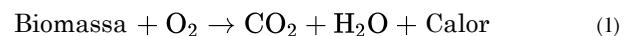
A gaseificação é um processo de oxidação parcial no qual ocorre a formação de um produto gasoso com importância química e energética. Os agentes oxidantes (ou agentes de gaseificação) podem variar,

mas, na maioria dos processos, utiliza-se oxigênio, ar, vapor d'água, água supercrítica ou até mesmo dióxido de carbono [5].

Segundo Lora *et al.* [5], o processo de gaseificação pode ser separado em duas etapas: a pirólise e a gaseificação. O fornecimento de calor é necessário para que a etapa de pirólise ocorra, conforme a Equação 3. Assim, a biomassa deve atingir uma temperatura alta o suficiente para sua decomposição em carvão, gases e alcatrão. A Fig. 2 ilustra as etapas da gaseificação.

Se o agente de gaseificação for à base de O_2 , parte da biomassa pode ser queimada (Equações 1 e 2) para prover o calor necessário para a pirólise. Se os agentes de gaseificação forem vapor d'água ou CO_2 , é preciso fornecer calor por meio de uma fonte externa para que o processo ocorra.

Combustão da biomassa



Combustão do carvão

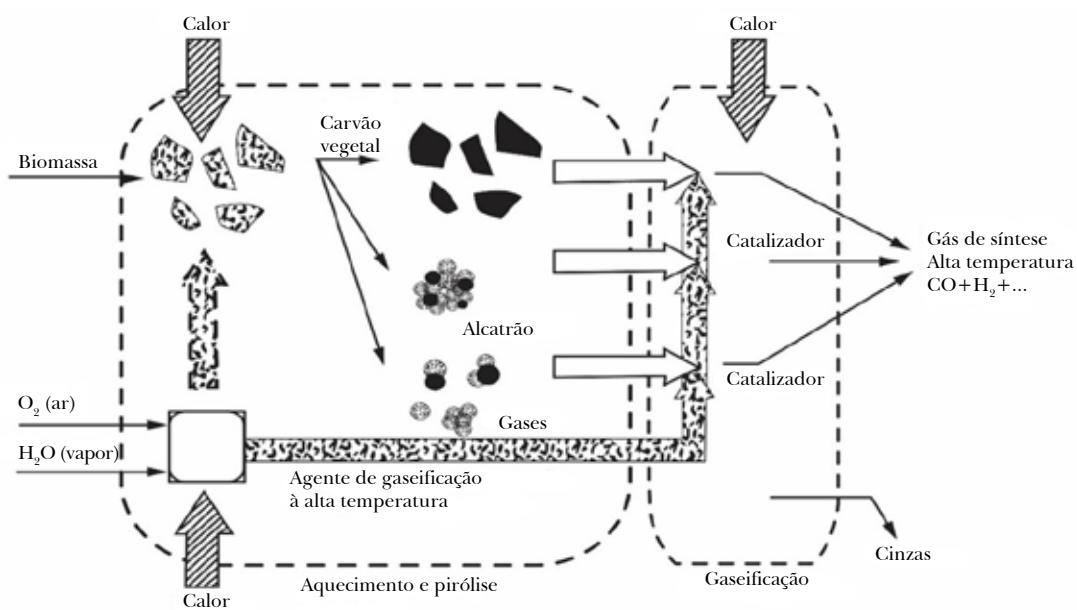


Fig. 2 – Ilustração das etapas envolvidas no processo de gaseificação. Fonte: Adaptado de [5].

Seguindo a concepção do processo de gaseificação de Lora *et al.* [5], as reações das duas etapas de gaseificação são como segue:

1) Pirólise



2) Gaseificação (Equações 4 a 8) [6, 7, 8]:

Reação de Boudouard



Metanação



Reforma a vapor do metano



Reforma a vapor do carbono:



Reação de deslocamento (*shift*) água-gás



A ocorrência de diversas reações faz com que outros produtos além de CO e H₂ estejam presentes no gás de síntese. Em decorrência da composição diversa da matéria-prima e da conversão incompleta, o gás de biomassa pode conter alcatrão, inorgânicos (metais alcalinos, metais alcalinos terrosos, enxofre, cloro etc.), e partículas sólidas [9]. Tais impurezas representam um grande entrave na utilização do gás de biomassa nos processos apresentados pela Fig. 1. Por isso, a obtenção de gás de síntese livre de partículas e alcatrão é de extrema importância na viabilização da gaseificação de biomassa para obtenção de energia [10].

1.2 Tipos de gaseificador

Lora *et al.* [5] classifica os gaseificadores de acordo com o modo de operação, levando em conta o sentido do movimento dos gases e a natureza do leito. Existem duas classes principais de gaseificadores: os de leito fixo e os de leito fluidizado.

1.2.1 Gaseificadores de leito fixo

O termo “leito fixo” indica a característica estacionária do leito de biomassa. Embora haja um movimento

descendente em decorrência do consumo do material a ser gaseificado, a velocidade de deslocamento do leito sólido é muito inferior à velocidade dos gases que o percolam. Por isso, usa-se o termo “leito fixo”, apesar de existir uma pequena mobilidade da parte sólida.

Seguindo a classificação da literatura [5], os gaseificadores de leito fixo podem ser divididos de acordo com o sentido dos fluxos, como segue:

a) fluxo concorrente: tanto o leito de biomassa quanto os gases produzidos movem-se no sentido descendente e as cinzas são depositadas na parte inferior do gaseificador. Portanto, o agente de gaseificação é injetado na parte superior da garganta onde ocorre a gaseificação;

b) fluxo contracorrente: a biomassa flui para baixo à medida em que é consumida, enquanto os gases produzidos fluem para cima. Portanto, o agente de gaseificação é injetado na parte inferior da garganta de gaseificação. As cinzas também se acumulam na parte inferior do equipamento;

c) fluxo cruzado: o agente de gaseificação é injetado na lateral e os gases efluentes são coletados na lateral oposta do gaseificador. Assim como nos gaseificadores concorrente e contracorrente, as cinzas são depositadas no fundo e o leito de biomassa move-se em sentido descendente à medida em que é consumido.

A Fig. 3 apresenta um esboço dos gaseificadores em leito fixo.

1.2.2 Gaseificadores de leito fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser classificados de acordo como o modo de operação da fluidização, como segue [5]:

a) leito fluidizado borbulhante: neste tipo de operação, os agentes de gaseificação promovem a movimentação de um leito de partículas composto por material inerte misturado à biomassa. O inerte pode também ser substituído por materiais catalíticos visando melhorar a eficiência da gaseificação ou reduzir o conteúdo de impurezas no gás efluente. No leito borbulhante, os sólidos não são carreados para fora do tubo onde ocorre a fluidização. Portanto, não há recirculação significativa do material do leito. Possíveis impurezas sólidas carreadas pelo gás podem, no entanto, ser retornadas ao leito.

Neste tipo de reator, normalmente, verifica-se uma região com maior área de seção transversal onde a velocidade superficial do gás é baixa e faz com que as partículas se sedimentem e não escapem no topo;

b) leito fluidizado circulante: neste tipo, também se utiliza um material inerte ou catalítico misturado à biomassa. No entanto, a mistura de partículas é fluidizada e carreada através do reator. Assim, a saída do reator é composta pela mistura de gases e partículas do leito. O material sólido pode, então, ser separado por métodos físicos e retornar ao leito, e o gás produzido escapa livre de sólidos;

c) leito fluidizado arrastado: neste caso, a matéria-prima finamente dividida é carreada por transporte pneumático para regiões de alta temperatura onde o processo de gaseificação acontece. Neste tipo, não se utilizam partículas sólidas inertes ou catalíticas além da biomassa. Altas temperaturas são obtidas pela oxidação de parte desta.

A classificação dos gaseificadores de leito fixo apresentada é ilustrada pela Fig. 4.

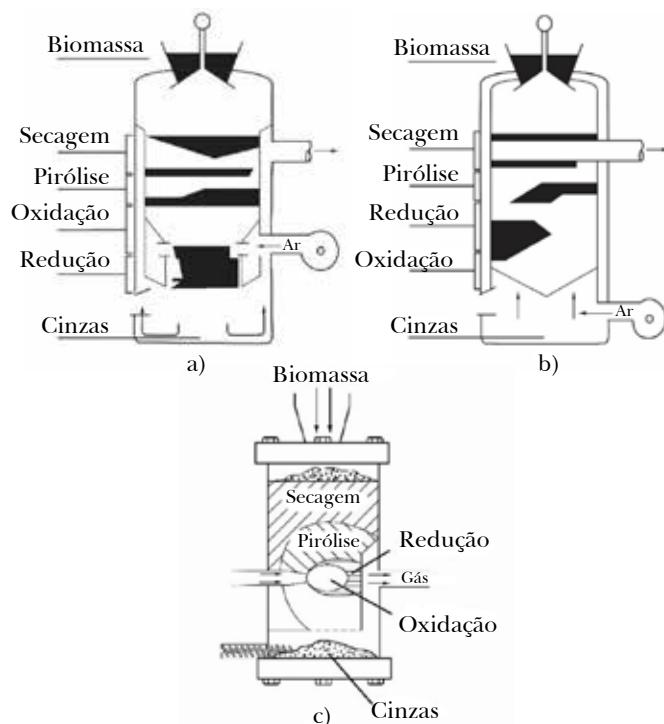


Fig. 3 – Principais tipos de gaseificadores de leito fixo: a) concorrente; b) contracorrente; c) fluxo cruzado. Fonte: Adaptado de [5].

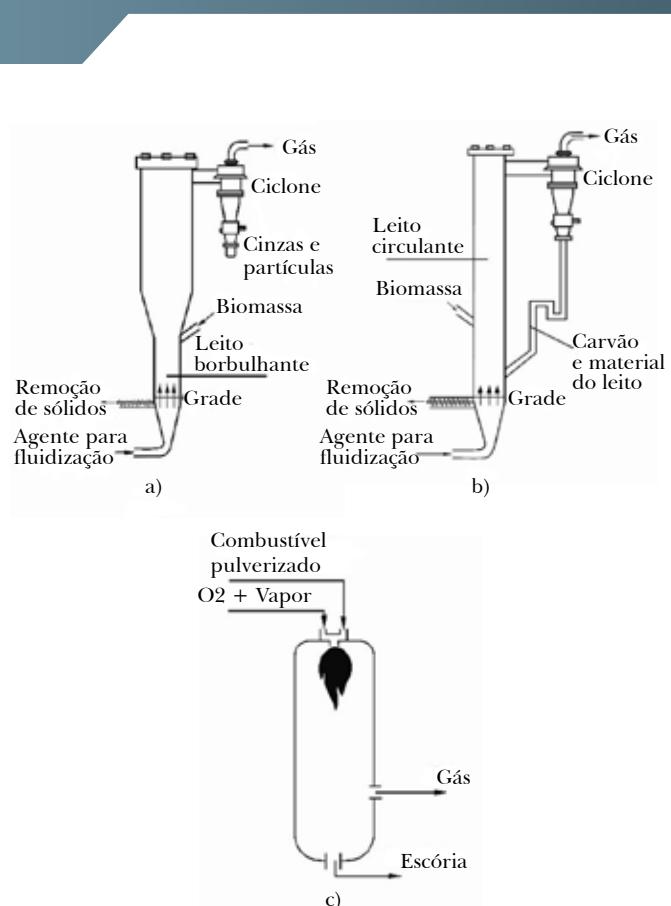


Fig. 4 – Principais tipos de gaseificadores de leito fluidizado: a) leito borbulhante; b) leito circulante; c) exemplo de leito arrastado. Fonte: Adaptado de [5].

Os gaseificadores em leito fluidizado possuem a vantagem de possibilitar a introdução de um material catalítico, substituindo o particulado inerte. Mas o catalisador deve ser resistente tanto ao choque quanto à sinterização devido ao movimento vigoroso do leito e às altas temperaturas empregadas [9].

A construção de gaseificadores não é restrita aos tipos apresentados. Contudo, na grande maioria dos casos, as variantes se assemelharão mais a algum dos modelos apresentados.

1.2.3 Gaseificador de leito fixo concorrente (*downdraft*)

Este trabalho tem por objeto de estudo um gaseificador do tipo *downdraft*. A Fig. 5 apresenta a localização típica das regiões de secagem, pirólise, combustão e redução para um gaseificador de leito fixo em fluxo concorrente, conhecido como gaseificador *downdraft*.

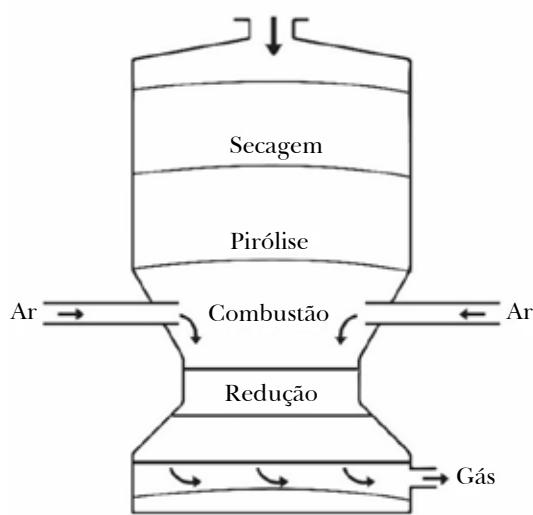


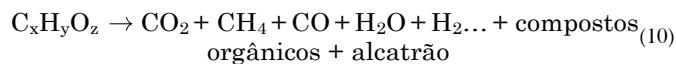
Fig. 5 – Divisão e localização dos subprocessos da gaseificação em um gaseificador de fluxo concorrente em leito fixo (*downdraft*).
Fonte: Elaborado pelos autores.

Com respeito às regiões apresentadas, detalham-se os processos químicos que ocorrem em cada uma para um gaseificador de leito fixo concorrente:

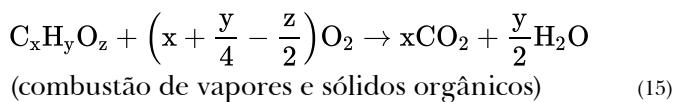
Secagem [11]



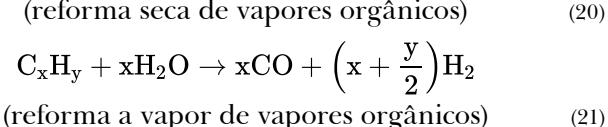
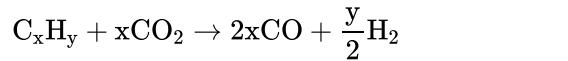
Pirólise [12]



Combustão [7, 12]



Redução [7, 8]



1.3 Alcatrão

O alcatrão é um conjunto de substâncias originadas da decomposição térmica ou termooxidação da biomassa. Seus componentes apresentam normalmente um elevado peso molecular (geralmente mais pesados do que o benzeno) e uma grande concentração de componentes aromáticos, o que o torna bastante estável termicamente. Dadas estas características, o alcatrão gera problemas nos tratamentos posteriores do gás de síntese. Tais problemas vão desde desativação de catalisadores por deposição de carbono, até entupimento de tubulações por condensação e corrosão de superfícies [13].

Milne, Evans e Abatzoglou [10] apresentam a classificação para o alcatrão originado de biomassa, como segue:

a) alcatrão primário: originado diretamente da decomposição do material lignocelulósico;

b) alcatrão secundário: produzido a partir das reações do alcatrão primário – neste grupo, destaca-se as olefinas e os compostos fenólicos;

c) alcatrão terciário: caracterizado pelos compostos aromáticos metilados como tolueno, metilnaftaleno, xilenos e terciários condensados, como os hidrocarbonetos poliaromáticos.

Cada uma dessas classes apresenta maior ou menor ocorrência dependendo do nível de severidade térmica no gaseificador. Os alcatrões primários tendem a se formar em temperaturas mais baixas (400°C a 650°C); os secundários, em temperaturas intermediárias (650°C a 850°C); e os terciários são produzidos principalmente a partir de 850°C [10]. A Tabela 1 mostra as principais substâncias dependendo da temperatura de formação.

Tabela 1 – Principais grupos de compostos presentes no alcatrão.

Temperatura da pirólise (°C)			
450 a 500	600 a 650	700 a 800	900 a 1000
Ácidos	Benzenos	Naftalenos	Naftalenos
Aldeídos	Fenóis	Acenafitlenos	Acenafitlenos
Cetonas	Catecósis	Fluorenos	Fenantrenos
Furanos	Naftalenos	Fenantrenos	Fluorantenos
Álcoois	Bifenis	Benzaldeídos	Pirenos
Oxigenados complexos	Fenantrenos	Fenóis	Acefenantrilenos
Fenóis	Benzofuranos	Naftofuranos	Benzantrenos
Guaiacósis	Benzaldeídos	Benzantrenos	Benzopirenos
Siringóis			
Fenóis complexos			

Fonte: Adaptado de [10].

A Tabela 2 mostra que a remoção do alcatrão do gás de síntese é de importância crucial para viabilizar a utilização do gás de síntese de biomassa em processos químicos e processos de recuperação de energia. Os gaseificadores operam produzindo gás de síntese com teor de alcatrão na faixa de 100 a 100.000 mg/Nm³ [9], que está muito acima dos valores admissíveis por quase a totalidade das aplicações desse gás.

Tabela 2 – Limites de teor de alcatrão para o aproveitamento do gás de síntese.

Teor típico de alcatrão no gás de biomassa	0,1-100 g/m ³
Aplicação do gás	Teor máximo de alcatrão aceitável
Estação de geração com vapor	Sem importância, mas deve-se evitar condensação
Motor a gás	<100 mg/m ³
Turbina a gás	<50 mg/m ³
Célula de combustível de carbonato fundido	<2.000 ppmV
Célula de combustível com membrana de troca de prótons	<100 ppmV
Síntese de Fisher-Tropsch	<1 ppmV

Fonte: Adaptado de [9].

1.4 Eliminação do alcatrão

Considerando as dificuldades impostas pela presença de alcatrão, busca-se sua eliminação por meio de separação ou pela sua decomposição. As técnicas estudadas, em sua maioria, envolvem métodos físicos, térmicos e catalíticos. Os métodos físicos concentram-se na remoção do alcatrão por vias físicas como condensação, filtração, precipitação eletrostática, instalação de ciclones etc. Os métodos térmicos focam na sua degradação por alta temperatura, fazendo-o

reagir com outros componentes do gás ou quebrar-se em componentes mais leves. Já os métodos catalíticos buscam também destruir o alcatrão, mas sem recorrer a níveis térmicos tão severos quanto aqueles empregados pelos métodos térmicos [13].

Um método catalítico amplamente utilizado é a reforma a vapor do alcatrão. Essa técnica apresenta como vantagens a degradação do alcatrão, tendo-se hidrogênio e monóxido de carbono como produtos [13]. Assim, além da eliminação do alcatrão, tem-se um aumento na quantidade de gás de síntese produzido. Contudo, o desenvolvimento de catalisadores capazes de atuar de maneira eficaz na reforma a vapor do alcatrão ainda é um desafio. Elevadas conversões do alcatrão já foram obtidas com catalisadores a base de níquel, mas o principal problema que afeta o desempenho dos catalisadores é a desativação, seja por deposição de carbono, seja por envenenamento [13].

1.5 Motivação e objetivos

Este trabalho é motivado pela importância do processo de gaseificação para a viabilização do uso da biomassa como fonte de diversos produtos de interesse energético. Não obstante, a necessidade de produzir gás de síntese de biomassa com alto nível de pureza também é a razão pela qual se deseja estudar o processo de gaseificação.

A galharia fina e ponteiros de eucalipto são resíduos que têm importância relevante na silvicultura, chegando a atingir uma produção de 17 toneladas/ha em massa seca. Esse valor representa 8,5% da produção total em massa de uma floresta de eucalipto de 7 anos [14]. Considerando que o Brasil possui aproximadamente 5,7 milhões de hectares plantados em eucalipto [15], fica clara a importância dos resíduos de ponteiros e galharia fina no âmbito nacional.

De maneira complementar, o estudo e a melhoria da unidade de gaseificação de bancada é fundamental para o desenvolvimento de trabalhos futuros que venham a focar na purificação do gás de síntese. Portanto, este trabalho também é motivado pela sua contribuição em permitir estudos futuros nas diversas áreas de remoção de alcatrão e demais impurezas.

Dadas essas circunstâncias motivadoras, este trabalho visa estudar o processo de gaseificação da biomassa de eucalipto com vistas a identificar potenciais melhorias do arranjo experimental para produção de gás de síntese. Não obstante, procura-se gerar, em laboratório, uma corrente de gás de síntese com características semelhantes àquelas que seriam obtidas industrialmente e, assim, possibilitar estudos futuros de condicionamento e purificação desse gás.

2. Materiais e Métodos

A construção da unidade de gaseificação se deu a partir de um gaseificador de leito fixo *downdraft* em escala de bancada. Esse gaseificador foi dimensionado para atender a produção de gás de síntese em escala

laboratorial com a finalidade de proporcionar meios para pesquisas de condicionamento e purificação de gás de síntese. Portanto, dispunha-se de um gaseificador já construído, mas nenhum teste havia sido realizado, e nenhum método ou mecanismo de análise havia sido instalado no gaseificador. Suas principais dimensões são: diâmetro interno de 10 cm, altura total de 70 cm e ponto de injeção de ar 3 cm acima da grelha.

Manômetros do tipo Bourdon e medidores de volume (medidor de gás do fabricante LAO, modelo G1 para a entrada e modelo G2,5 para a saída) foram instalados na entrada e na saída da unidade. Termopares tipo K foram instalados para a medição da temperatura na saída do gaseificador e no interior do leito.

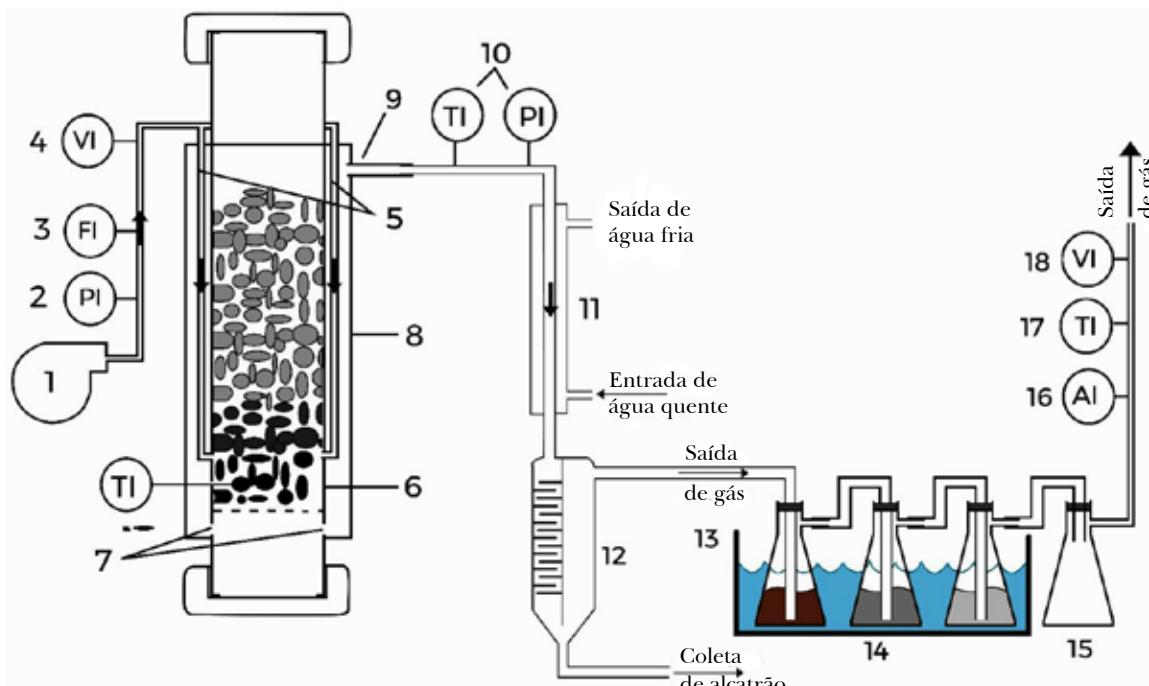


Fig. 6 – Esquema da montagem para estudo do processo de gaseificação. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Testes preliminares revelaram que o gás produzido não poderia ser analisado por cromatografia gasosa, já que as amostras apresentavam elevado teor de vapores que se condensavam e poderiam danificar o equipamento. Assim, foram tomados certos cuidados:

- instalação de condensador;
- instalação de trecho sinuoso para colapsar as partículas líquidas;

c) instalação de borbulhadores com isopropanol e *trap*.

A Fig. 6 mostra esquema da unidade de gaseificação: o ar é fornecido por um compressor (1) e alimentado na parte superior da camisa do gaseificador, passando pelos medidores de pressão (2), de vazão (3) e pelo medidor integrador de volume (4). O ar flui na tubulação (5) (sem contato com a biomassa) em contracorrente com os gases quentes efluentes da região de reação.

O ar aquecido é então injetado no leito de biomassa (6), onde ocorrem as reações do processo de gaseificação. Os gases provenientes das reações fluem em sentido descendente até encontrarem os furos abaixo da grelha (7), que dão acesso à camisa do gaseificador (8). Uma vez na camisa, o gás de biomassa flui ascendenteamente até a tubulação de saída (9), em contato com os instrumentos de medição de pressão e temperatura (10). Através da tubulação de saída, os gases passam pelo trocador de calor (11), onde a temperatura da corrente é reduzida para valores menores que 30°C. A fim de colapsar a névoa produzida pela condensação do alcatrão e demais vapores, utiliza-se o separador de partículas (trecho sinuoso) (12).

Em princípio, a fração de alcatrão na mistura gasosa deveria sedimentar quando resfriada e condensada. Contudo, foi observado experimentalmente que o condensado forma uma suspensão de partículas líquidas muito finas que não se aglomeram tão facilmente. Por esse motivo, o separador (12) foi instalado com a função de recuperar o alcatrão, bem como outros componentes condensáveis.

Os borbulhadores (14) foram implementados para reter eventuais resquícios de alcatrão que não foram retidos pelo separador (12). Os borbulhadores foram preenchidos com isopropanol e submetidos a banho termostático a -5°C (13).

O recipiente acumulador (*trap*) (15) destina-se a conter arrastes de solvente que possam, eventualmente, ocorrer nos borbulhadores. Após passar pelos sistemas de purificação, o gás é analisado (16). O volume de gás é medido por meio de um integrador de volume (18) e sua temperatura medida por termopar (17).

Em resumo, durante o processo de gaseificação, são gerados quatro produtos: a) cinzas, pela base do gaseificador; b) condensados, pela base do separador de partículas; c) solução de alcatrão em isopropanol, nos borbulhadores; e d) gases oriundos da gaseificação da madeira, pela saída do recipiente acumulador (15).

A matéria-prima a ser gaseificada foi parte da galharia fina de eucalipto picado conforme apresentado na Fig. 7.



Fig. 7 – Galho de eucalipto picado empregado nos testes de gaseificação. Fonte: Acervo dos autores.

As características do material são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Característica dos materiais usados no estudo da gaseificação.

Comprimento médio (cm) (95% de confiança)	1,66±0,16
Diâmetro médio (cm) (95% de confiança)	1,03±0,22
Densidade aparente (g/cm³)	0,349
Poder calorífico superior [16]	4.501 kcal/kg
Composição elementar [17]	47,3% (C); 5,8%(H); 46,2%(O); 0,7% (N);

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os valores mostrados na Tabela 3 foram obtidos por amostragem casual simples. As amostras foram de 150 g de eucalipto. O poder calorífico e composição elementar foram assumidos como sendo constantes, de acordo com a literatura [16, 17].

Um medidor integrador de volume acoplado à entrada do gaseificador registra a quantidade volumétrica total de ar (V) injetado no sistema. Conhecido o volume de ar, a temperatura ambiente (T) e a pressão do sistema (P), calcula-se a massa de ar (M_{ar}) pela Equação 22, segundo o modelo para gases ideais.

$$M_{ar} = \overline{MM}_{ar} \frac{PV}{RT} \quad (22)$$

A constante $\overline{M}M_{ar}$ é a massa molar média do ar e R é a constante dos gases ideais.

As massas das cinzas, do condensado, e da batelada de biomassa foram determinadas por pesagem, com precisão de milésimos de grama. Portanto, a única corrente indeterminada é a corrente do gás produzido, cuja massa pode ser calculada por diferença, conforme Equação 23:

$$M_{gás} = M_{biomassa} + M_{ar} - M_{cinzas} - M_{condensados} \quad (23)$$

Ao final da gaseificação, determinou-se a quantidade de alcatrão. Para tal, foram recolhidas e pesadas as quantidades de alcatrão presentes na solução dos borbulhadores e nos condensadores.

Os condensados receberam duas fases, uma orgânica e outra aquosa. A fase aquosa foi separada por decantação e reservada para tratamento. A fase orgânica permaneceu no condensador.

Devido ao resfriamento da corrente de saída, o alcatrão contamina as paredes de todo o equipamento e condutos a jusante do gaseificador, sendo necessária a limpeza do gaseificador utilizando o isopropanol contido nos dois últimos borbulhadores. As soluções de lavagem foram, então, reunidas à solução do primeiro borbulhador, obtendo todo o alcatrão em isopropanol.

Nesta etapa, foram obtidos dois resíduos principais de alcatrão: em isopropanol e em solução aquosa. As frações foram pesadas e filtradas.

A recuperação do alcatrão dissolvido tanto em meio aquoso quanto em meio orgânico foi feita por roto-evaporação, utilizando um balão de fundo redondo de 250 mL, com 90 g de solução. Neste processo, foram seguidos os passos abaixo listados:

a) Passo 1: realizou-se a evaporação em um roto-evaporador com banho termostático. A temperatura do banho foi ajustada para 85°C, a pressão, para 160 mmHg (abs), e a rotação foi de 60 rpm.

b) Passo 2: observou-se visualmente o desprendimento de bolhas indicando a ebulição do solvente. Cessado o desprendimento, fez-se a primeira pesagem do balão e determinou-se a massa do resíduo por diferença.

c) Passo 3: reposicionou-se o balão no roto-evaporador e a evaporação continuou por mais 10 minutos, e, então, realizou-se nova pesagem e determinou-se a massa de resíduo de alcatrão por diferença.

d) Passo 4: o passo 3 foi repetido até que a massa de resíduo obtida não variasse mais do que 2% entre as repetições.

e) Passo 5: a última massa obtida foi considerada como a massa final de resíduo de alcatrão.

Os passos de 1 a 5 foram realizados utilizando amostras representativas de cada solução, ou seja, coletadas após perfeita homogeneização da mistura.

A massa total de resíduo de alcatrão (M_{Alc}) foi calculada pela Equação 24.

$$M_{Alc} = m_{Alc} \frac{M_s}{m_s} \quad (24)$$

Onde M_s é a massa total de solução, m_s é a massa amostral de solução utilizada na roto-evaporação, e m_{Alc} é a massa residual amostral de alcatrão obtida ao fim da evaporação.

A soma da massa total residual de alcatrão na fase aquosa ($M_{Alc(aq)}$) com a massa total residual de alcatrão na fase orgânica ($M_{Alc(org)}$) fornece a massa total de resíduo de alcatrão produzido no experimento ($M_{Alc(total)}$), como indica a Equação 25.

$$M_{Alc(total)} = M_{Alc(aq)} + M_{Alc(org)} \quad (25)$$

Um cromatógrafo Varian CP3800 equipado com um detector TCD, coluna ShinCarbon ST 100/120 da Restek (2 m de comprimento, 1 mm de diâmetro) e hélio como gás de arraste foi utilizado para a determinação da composição do gás produzido. Para tanto, uma fração amostral do gás de síntese foi continuamente direcionada à válvula de amostragem do cromatógrafo, sendo as amostragens nesta válvula feitas a cada 20 minutos.

A calibração do cromatógrafo foi realizada a partir de misturas dos gases H₂, CO, CH₄ e CO₂ de concentração conhecida. Foi feita a correlação da intensidade dos sinais com a fração conhecida de cada componente.

A quantidade molar dos componentes H₂, CO, CH₄ e CO₂ foi calculada a partir da integração numérica do produto da fração molar de cada componente pelo elemento de volume. A fração molar foi obtida por cromatografia, e o elemento de volume foi obtido por gasômetro acoplado na saída do gaseificador.

Dessa forma, foi possível analisar a concentração de H₂, CO, CH₄ e CO₂. O N₂ foi considerado inerte no processo de gaseificação e foi quantificado com base na quantidade admitida na entrada do reator. A água foi condensada e determinada por pesagem. O oxigênio não foi quantificado já que a coluna cromatográfica utilizada não possibilita a separação entre nitrogênio e oxigênio. Assim, o oxigênio e outros componentes não identificados foram contabilizados em uma única fração denominada de “outros”. O fator de ar foi calculado como a razão entre a quantidade de oxigênio utilizada na gaseificação e a quantidade estequiométrica de oxigênio para a combustão completa, ambas calculadas para uma mesma massa de combustível.

Três vazões de ar foram utilizadas com o objetivo de se determinarem os efeitos da variação da entrada de ar no processo de gaseificação. As vazões molares médias de ar empregadas nos testes foram de $5,62 \times 10^{-3}$ mol/s, $7,03 \times 10^{-3}$ mol/s e $9,96 \times 10^{-3}$ mol/s. Para eliminar os efeitos de variações de temperatura e pressão, todas as vazões foram calculadas em base molar e não em base volumétrica.

3. Resultados e Discussão

3.1 Fator de ar

Observou-se que o fator de ar não apresenta relação direta com a vazão molar de ar. Isto é, um aumento da vazão de ar não interfere significativamente no fator de ar, visto que, à medida em que a vazão de ar aumenta, o tempo de experimento diminui.

A Fig. 8 ilustra o comportamento experimental da taxa média de consumo da biomassa em função da vazão molar de ar empregada.

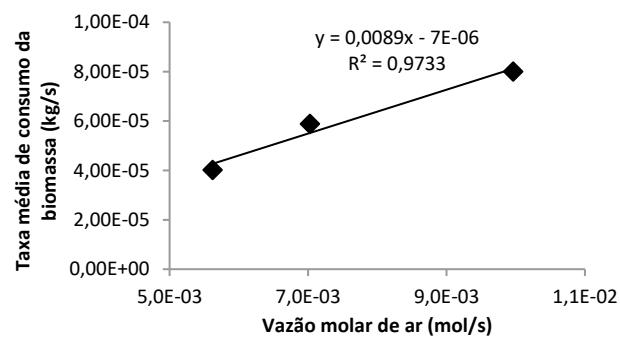


Fig. 8 – Taxa média de consumo da biomassa em função da vazão molar de ar. **Fonte:** Elaborada pelos autores.

Como mostrado na Fig. 8, aumentando a vazão de ar, aumenta-se também o consumo da biomassa, fazendo com que a razão O₂ fornecido por biomassa consumida fique constante, justificando a pequena variação do fator de ar em relação à vazão de ar no intervalo estudado, já que a razão mássica entre O₂ estequiométrico e a biomassa consumida permanece constante.

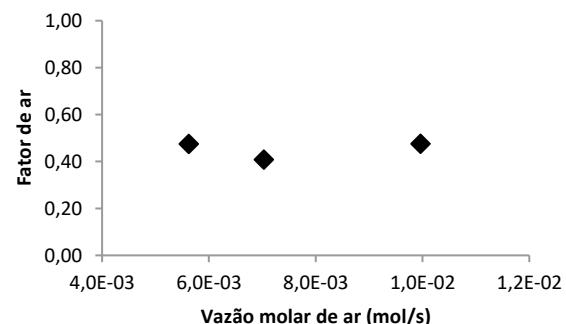


Fig. 9 – Fator de ar em função da vazão molar de ar. **Fonte:** Elaborada pelos autores.

Desta maneira, o estudo do processo de gaseificação se deu em uma faixa estreita de fator de ar, visto que esta variável apresenta pouca sensibilidade à variação da vazão. Nos testes realizados, o maior valor obtido foi de 0,48 e o menor de 0,41, conforme Fig. 9. Ma *et al.* [18] realizaram estudos na faixa de 0,16 a 0,30, enquanto Olgun, Ozdogan e Yinesor [7] conseguiram abranger a faixa de 0,20 a 0,50, ambos para o fator de ar em gaseificadores do tipo concorrente em leito fixo. A faixa estreita de fatores de ar não representa

um fator negativo, mas, sim, uma característica do equipamento estudado.

3.2 Teor de alcatrão

A produção de alcatrão obtida foi de 12 a 24 g/m³ de gás (a 25°C e 1 atm). A Fig. 10 apresenta os valores obtidos experimentalmente para diferentes valores de vazão de ar.

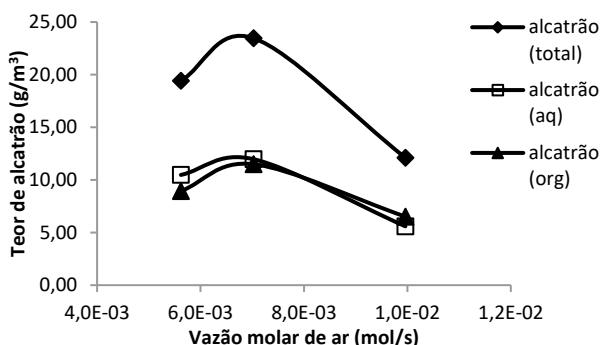


Fig. 10 – Fator de ar em função da vazão molar de ar. **Fonte:** Elaborada pelos autores.

Segundo Stevens [19], os gaseificadores do tipo concorrente possuem uma produção de alcatrão na faixa de 0,04 a 6 g/m³ de alcatrão. Verifica-se, então, produção elevada de alcatrão em relação ao citado na literatura. Porém, cada gaseificador normalmente pode gerar resultados diferentes, em especial, os projetados para bancada. A existência de fatores como tamanho, tecnologia de gaseificação, tipo de material utilizado, gás utilizado, uso de vapor, região de extração da biomassa, tornam o processo de gaseificação de difícil comparação com a literatura.

A produção elevada de alcatrão em relação à literatura pode estar relacionada à distância reduzida entre o ponto de injeção do ar e a base do leito da biomassa. Olgun, Ozdogan e Yinesor [7] posicionaram os pontos de injeção a 250 mm acima da base do leito de biomassa, enquanto Nisamaneenate *et al.* [20] utilizaram a posição de 200 mm. No equipamento utilizado neste trabalho, o ar foi injetado a apenas 30 mm acima da base do leito de biomassa, proporcionando tempos de residência no leito menores.

3.3 Estudo do comportamento térmico do leito

O gaseificador foi monitorado com quatro termopares ao longo do leito, dispostos a cada 5 cm verticalmente, partindo-se da base. Os gráficos de temperatura *versus* tempo foram convertidos em gráficos de altura do leito *versus* tempo. Dividiu-se o eixo da temperatura em 5 regiões, sendo:

- Região **a** (de 100 a 120°C): faixa de perda de água por secagem;
- Região **b** (de 180 a 250°C): decomposição de extrativos e da parte mais reativa da hemicelulose [21, 22];
- Região **c** (de 250 a 300°C): degradação predominante da celulose, hemicelulose e parte da lignina [22];
- Região **d** (de 300 a 550°C): degradação da lignina e partes residuais da celulose [19];
- Região **e** (de 900 a 1300°C): degradação térmica do alcatrão [5, 9].

Assim, torna-se possível verificar quais partes do leito de biomassa se encontram sob as condições das regiões **a**, **b**, **c**, **d** ou **e** por meio das isotermas de 100, 120, 180, 250 e 550°C em relação à altura do leito. Os resultados obtidos para tais isotermas são apresentados na Fig. 11.

O movimento descendente da biomassa pode fazer com que, em alguns momentos, a temperatura medida sofra grandes variações, tendo em vista a possibilidade de não haver contato da biomassa com termopar. Assumindo, neste caso, que a velocidade descendente do leito seja constante, as medidas acima da linha tracejada na Fig. 11 não são representativas do leito.

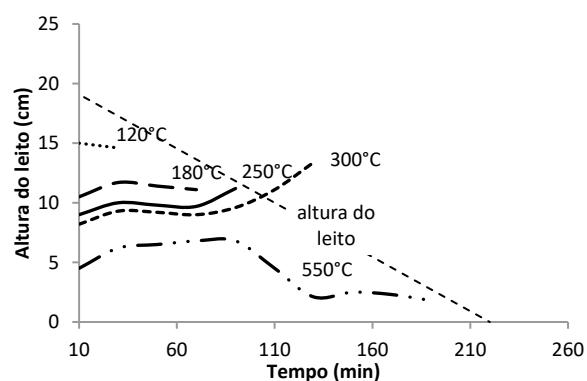


Fig. 11 – Isotermas chaves para a pirólise da madeira para a vazão de ar de $5,62 \times 10^{-3}$ mol/s. **Fonte:** Elaborada pelos autores.

No teste para a vazão de ar de $5,62 \times 10^{-3}$ mol/s, verifica-se que a maior parte do leito já tinha passado pelo processo de secagem após 10 minutos, visto que praticamente todo o leito já se encontrava acima de 120°C. A partir de 30 minutos, toda a biomassa já se encontrava plenamente seca. A pirólise ocorre mais intensamente entre o início do experimento e os 90 minutos – região entre as isotermas de 180 e 550°C. A partir desse período, a fração do leito sujeita à pirólise diminui devido à redução na altura do leito.

A mesma análise feita para a Fig. 11 na vazão de ar $5,62 \times 10^{-3}$ mol/s foi feita para as demais vazões testadas. De maneira geral, os mesmos perfis de comportamento são observados nos testes. Com a análise das isotermas para as três vazões testadas, construiu-se a Tabela 4 e, por meio desta, revelou-se uma distorção temporal dos efeitos de secagem e pirólise para cada valor de vazão de ar.

Tabela 4 – Intervalos de tempo característicos da degradação do leito de biomassa nos testes de variação da vazão de ar.

Componente perdido ou degradado	Vazão (mol/s)		
	$5,62 \times 10^{-3}$	$7,03 \times 10^{-3}$	$9,96 \times 10^{-3}$
	Faixa de tempo (minutos)		
Água (secagem)	0 a 30	0 a 30	0 a 10
Extrativos	0 a 70	0 a 70	0 a 50
Hemicelulose + celulose	0 a 90	0 a 70	0 a 50
Lignina	0 a 170	0 a 110	0 a 90
Tempo de experimento	0 a 220	0 a 150	0 a 130

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com base nas faixas de temperatura descritas, é possível fazer duas observações. Primeiro, desde os minutos iniciais do experimento, todo o leito já se encontra em processo de secagem. A maior parte da umidade da biomassa é eliminada já nos primeiros 30 minutos de experimento. Segundo, a máxima temperatura do leito – medida na parte inferior – raramente atinge a faixa de decomposição térmica do alcatrão, indicando a formação de elevadas quantidades de alcatrão nos três experimentos.

3.4 Composição do gás

A Fig. 12 apresenta as composições em base seca do gás produzido no sistema de gaseificação.

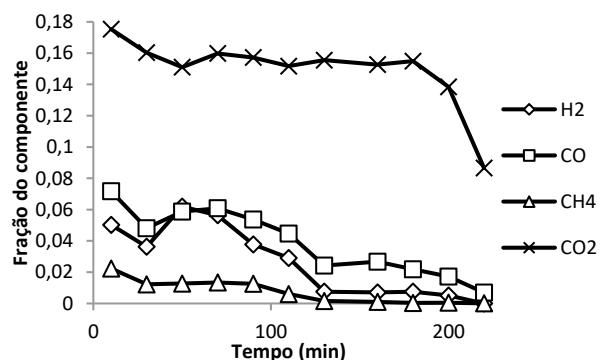


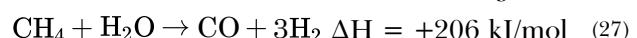
Fig. 12 – Composição do gás para a vazão molar de ar de $5,62 \times 10^{-3}$ mol/s. **Fonte:** Elaborada pelos autores.

Para a organização do trabalho, foram nomeados três períodos térmicos característicos para a gaseificação em batelada ou semibatelada: (1) período da secagem, (2) período da pirólise e (3) período da gaseificação do carvão. Estes períodos foram definidos pela análise dos perfis de temperatura com o uso de isotermas (Fig. 11).

De maneira geral, os experimentos revelaram um padrão comum entre si para a produção de H₂ e CO. Observando o comportamento da composição do gás produzido e comparando com a análise dos perfis térmicos, é possível notar que há uma correlação entre o comportamento térmico do leito e a composição do gás produzido.

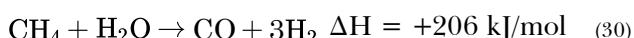
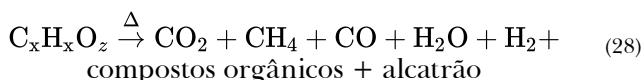
O período da secagem e o período da pirólise tendem a gerar altos teores de CO e H₂, enquanto o período de gaseificação do carvão gera mais CO e CO₂.

Nos minutos iniciais de gaseificação, as frações de H₂ e CO se mostram mais elevadas. É razoável assumir que o aumento da concentração destas espécies é fruto da liberação de água no leito devido ao processo de secagem. Essa maior quantidade de água favoreceu as reações de reforma a vapor no interior do gaseificador. É conveniente lembrar que o CO também pode ser produzido em outros processos além da reforma a vapor, portanto, nem sempre uma maior disponibilidade de água ocasionará maior produção de CO. As Equações 26 e 27 são favorecidas pela presença de água:



O efeito da secagem sobre a produção de H₂ e CO, no entanto, ocorre somente nos momentos iniciais dos experimentos. No caso da maior vazão de ar estudada ($9,96 \times 10^{-3}$ mol/s), este efeito nem chega a ser detectado, pois a secagem ocorre antes mesmo da primeira amostragem do gás.

Um pico de produção de H₂ e CO é observado desde o fim da secagem até o fim da pirólise. Neste período, associa-se a maior produção de H₂ e CO ao próprio fenômeno da pirólise (Equação 28) e às reações de reforma a vapor que são possibilitadas pela liberação de água pela pirólise, conforme mostrado pelas Equações 29 e 30.



Por fim, quando ocorre a pirólise completa da biomassa, resta apenas o carvão, que prossegue no processo de gaseificação. Devido ao seu alto teor de carbono, o carvão gera principalmente CO e CO₂ como produtos quando é utilizado ar seco para gaseificação. Assim, nesta fase, as reações mais importantes são as de combustão de carbono (Equações 31 e 32) e a reação de Boudouard (Equação 33).



Nos três experimentos, a fração de CO₂ se manteve aproximadamente constante com o tempo de teste. Pequenas reduções no teor de CO₂ aconteceram em função da diluição por CO e H₂. Além disso, a fração de CO₂ não foi afetada pela alteração da vazão de ar, mantendo-se entre 15% e 16% para todas as vazões de ar empregadas.

A quantidade de metano se manteve a valores abaixo de 2% na maioria das vezes para todas as vazões de ar testadas. É difícil avaliar por qual rota o metano é produzido, isto porque este gás está envolvido em muitas reações como combustão, reforma a vapor, reforma seca, pirólise da madeira, metanação etc.

Contudo, a redução no teor de metano é notória à medida em que o leito atinge o período de gaseificação do carvão, certamente devido à escassez do elemento hidrogênio no material do leito (Tabela 5).

Tabela 5 – Composição global do gás produzido nos testes de variação da vazão de ar.

Fator de ar	Vazão de ar (mol/s)		
	$5,62 \times 10^{-3}$	$7,03 \times 10^{-3}$	$9,96 \times 10^{-3}$
H ₂	2,85%	4,38%	5,36%
CO	4,10%	6,46%	6,73%
CH ₄	0,78%	0,96%	0,81%
CO ₂	15,27%	15,32%	12,60%
N ₂	71,35%	66,86%	73,20%
Outros	5,64%	6,02%	1,30%

Fonte: Elaborada pelos autores.

A integração da quantidade produzida de cada componente desde o instante inicial até o instante final de cada experimento permitiu calcular a composição do gás produzido, conforme apresentado na Tabela 5.

A Tabela 5 mostra que, para a vazão de ar igual a $9,96 \times 10^{-3}$ mol/s, são produzidas maiores concentrações molares de CO e H₂. Nessa vazão, chega-se a atingir um máximo de 12,8% de H₂ e 14,8% de CO e valores médios de 5,36% de H₂ e 6,73% de CO.

3.5 Desempenho energético

Utilizando o gaseificador na sua carga máxima de biomassa e a vazão de ar em $7,03 \times 10^{-3}$ mol/s, o poder calorífico superior (PCS) do gás foi de 1.617 kJ/m^3 , e o poder calorífico inferior (PCI) foi de 1.491 kJ/m^3 . Ma *et al.* [18] obtiveram um gás com o PCI de 4.440 kJ/m^3 para a gaseificação de cascas de arroz, e Altafini, Wander e Barreto [23] conseguiram produzir gás de síntese com o PCS de 5.276 kJ/m^3 . Utilizando o mesmo gaseificador empregado neste trabalho, França [24] obteve um PCI de 1.167 kJ/m^3 para a gaseificação de caroço de açaí.

Esta diferença significativa era esperada em função da alta concentração de CO₂ no gás produzido neste trabalho, bem como das altas perdas térmicas observadas para um gaseificador com razão área superficial por volume elevada, o que é típico de equipamentos de pequeno porte.

4. Conclusão

O arranjo instrumental para medição de temperaturas do leito de biomassa, apesar de muito simples e barato, permitiu o mapeamento do leito de biomassa através das isotermas mais importantes nos processos de pirólise e gaseificação. Dessa forma, foi possível avaliar e detectar os fenômenos ocorrentes no leito, seja em função do tempo, seja em função da posição longitudinal no leito.

O fator de ar apresentou pouca sensibilidade à variação da vazão molar de ar para a faixa de $5,62 \times 10^{-3}$ a $9,96 \times 10^{-3}$ mol/s. Como consequência, as variações de vazão dentro dessa faixa resultaram numa faixa bem estreita de fator de ar.

Para todos os experimentos, o período da secagem e o período da pirólise tendem a gerar altos teores de CO e H₂, enquanto o período de gaseificação do

carvão gera principalmente CO e CO₂. A secagem oferece uma maior quantidade de água, que intensifica as reações de reforma a vapor no interior do gaseificador. Já a pirólise é responsável pelo aumento da produção de H₂ e CO, seja pela produção direta desses componentes, seja pelas reações de reforma a vapor que são possibilitadas pela liberação de água nesse processo.

Face ao exposto, conclui-se que a unidade testada, apoiada por sua instrumentação, serviu ao estudo do processo de gaseificação. O gaseificador produziu efetivamente gás de síntese com todos os componentes que se esperava, apresentando valores comparáveis aos da literatura. Os equipamentos utilizados garantiram a medição de todas as grandezas e parâmetros necessários ao estudo do processo e possibilitaram que os balanços de massa e energia fossem realizados com sucesso.

Referências

- [1] LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. *Novos Estudos*, n. 78, p. 15–21, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0101-33002007000200003>.
- [2] SILVA, G. A.; CARMO, J. S.; SANTOS, M. S. M.; BATISTOTE, M. Biomassa: conhecer para transformar. *Revista Conexão UEPG*, v. 13, n. 3, p. 462–473, 2017. <https://doi.org/10.5212/Rev.Conexao.v.13.i3.0009>.
- [3] NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: métodos e benefícios ambientais. In XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica; XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação; VI Encontro de Iniciação à Docência. São José dos Campos: Univap, 2016. Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/0859_1146_01.pdf. Acesso em: 13 dez. 2020.
- [4] SOUZA, R. C. R.; SANTOS, E. C. S. Incentivos ao uso de biomassa para geração de eletricidade na Amazônia. In III Congresso Brasileiro de Regulação dos Serviços Públicos Concedidos. Brasília, DF: ABAR, 2003.
- [5] LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; MARTÍNEZ ÁNGEL, J. D.; LEITE, M. A. H.; ROCHA, M. H.; SALES, C. A. V. B. et al. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e Biocombustíveis. In LORA, E. E. S; VENTURINI, O. J (ed.). Biocombustíveis. Rio de Janeiro: Interciênciac, 2012. p. 411–498.
- [6] MÜLLER, R.; VON ZEDTWITZ, P.; WOKAUNA, A.; STEINFELD, A. Kinetic investigation on steam gasification of charcoal under direct high-flux irradiation. *Chemical Engineering Science*, v. 58, n. 22, p. 5111–5119, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.08.018>.
- [7] OLGUN, H.; OZDOGAN, S.; YINESOR, G. Results with a bench scale downdraft biomass gasifier for agricultural and forestry residues. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 1, p. 572–580, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.028>.
- [8] DEVI, L.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. *Biomass and Bioenergy*, v. 24, n. 2, p. 125–140, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00102-2).
- [9] RICHARDSON, Y.; BLIN, J.; JULBE, A. A short overview on purification and conditioning of syngas produced by biomass gasification: catalytic strategies, process intensification and new concepts. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 38, n. 6, p. 765–781, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.12.001>.
- [10] MILNE, T. A.; EVANS, R. K.; ABATZOGLOU, N. Biomass gasifier “tars”: their nature, formation, and conversion. *Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory*, 1998. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25357.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2014.

- [11] HIMMELBLAU, D. M.; RIGGS, J. B. Engenharia Química: princípios e cálculos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- [12] FORTUNATO, B.; BRUNETTI, G.; CAMPOREALE, S. M.; TORRESI, M.; FORNARELLI, F. Thermo-dynamic model of a downdraft gasifier. *Energy Conversion and Management*, v. 140, p. 281–294, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.061>
- [13] QUITETE, C. P. B.; SOUZA, M. M. V. M. Remoção do alcatrão de correntes gaseificação de biomassa: processos e catalisadores. *Química Nova*, v. 37, n. 4, p. 689–698, 2014. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140110>.
- [14] FOEKEL, C. Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. In *Eucalyptus Online Book*. Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2016. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/>. Acesso em: 13 dez. 2020.
- [15] INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório 2019. Indústria Brasileira de Árvores. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2020.
- [16] QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. *Revista da Madeira*, n. 89, p. 100–06, 2005.
- [17] ZANUNCIO, A. J. V.; NOBRE, J. R. C.; MOTTA, J. P.; TRUGILHO, P. F. Química e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden termorretificada. *Revista Árvore*, v. 38, n 4, p. 765–770, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000400020>.
- [18] MA, Z.; YE, J.; ZHAO, C.; ZHANG, Q. Gasification of rice husk in a downdraft gasifier: the effect of equivalence ratio on the gasification performance, properties, and utilization analysis of byproducts of char and tar. *BioResources*, v. 10, n. 2, p. 2888–2902, 2015. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.2888-2902>.
- [19] STEVENS, D. J. Hot gas conditioning: recent progress with larger-scale biomass gasification systems – Update and summary of recent progress. Golden CO: National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [20] NISAMANEENATE, J.; ATONG, D.; SORNAKDE, P.; SRICHAROENCHAIKUL, V. Fuel gas production from peanut shell waste using a modular downdraft gasifier with the thermal integrated unit. *Renewable Energy*, v. 79, p. 45–50, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.046>.
- [21] POLLETO, M.; ZATTERA, A. J.; SANTANA, R. M. C. Thermal decomposition of wood: kinetics and degradation mechanisms. *Bioresource Technology*, v. 126, p. 7–12, 2012.
- [22] SOARES, V. C. Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla X Eucalyptus Grandis* em diferentes idades. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- [23] ALTAFINI, C. R.; WANDER, P. R.; BARRETO, R. M. Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model. *Energy, Conversion ang Management*, v. 44, n. 17, p. 2763–2777, 2003.
- [24] FRANÇA, R. R. Desenvolvimento de unidade de gaseificação de bancada para produção de gás de síntese a partir de biomassa. Dissertação (Mestrado em Físico-Química) – Instituto Militar de Engenharia, 2017.

Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas para Detecção Autônoma de Entidades Terrestres Móveis em Áreas Restritas

Ricardo Maroquio Bernardo^{*a}, Luis Claudio Batista da Silva^b, Paulo Fernando Ferreira Rosa^c

^aInstituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, ricardo.maroquio@ifes.edu.br

^bCentro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, luis.silva@cefet-rj.br

^cInstituto Militar de Engenharia, rpaolo@ime.eb.br

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

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

PALAVRAS-CHAVE: SARP. Robótica. Vigilância.

KEYWORDS: RPAS. Robotics. Surveillance.

1. Introdução

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

O rápido crescimento do uso de ARPs nos últimos anos em diversas aplicações pode ser explicado pela facilidade de acesso a equipamentos anteriormente inacessíveis, seja por questões geográficas, técnicas ou econômicas. Os componentes para construção de ARPs têm tido melhorias em precisão, miniaturização, tempo de resposta e robustez, além de terem alta

disponibilidade no mercado e custo cada vez mais reduzido, fomentando seu uso e construção.

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

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

2. Fundamentação teórica

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

2.1 Robótica móvel

Grande parte das técnicas usadas na solução proposta são pertinentes à área da robótica móvel. Os conceitos aqui apresentados foram sintetizados a partir de [14]. Os robôs móveis podem ser terrestres, aquáticos e aéreos, sendo esse último o tipo adotado como plataforma para desenvolvimento da solução aqui proposta. Os robôs aéreos podem ser de asa fixa, de asa rotativa ou mais leves do que o ar. A solução proposta faz uso de quadricópteros, que são robôs aéreos de múltiplas asas rotativas.

O grau de autonomia de um robô móvel para a realização de uma tarefa depende do aparato

computacional, sensorial e de atuação embarcados. A percepção do ambiente é realizada através do processamento de dados oriundos de sensores como câmeras e sonares. Alguns sensores também podem ser necessários para aplicações específicas, como sensores de CO₂ ou a própria câmera.

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

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

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

2.2 Aeronaves remotamente pilotadas

Esta subseção apresenta conceitos operacionais e construtivos de ARP's do tipo quadricóptero, que no contexto deste trabalho é tratado como um tipo de robô aéreo.

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

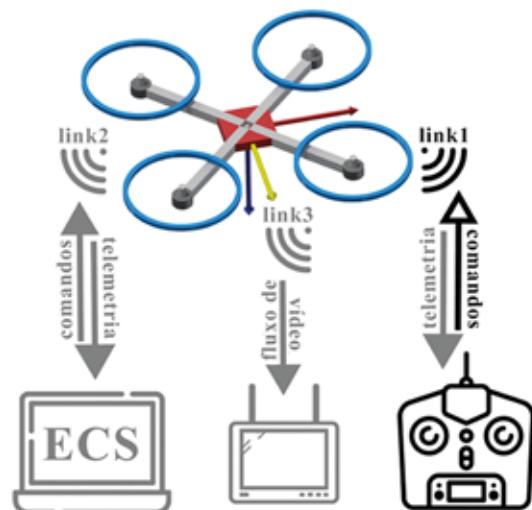


Fig. 1 – Operação básica de uma ARP do tipo quadricóptero.

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

A controladora de voo, representada pelo retângulo tracejado central, recebe os dados dos sensores em sua unidade de processamento para computar a posição e a orientação da ARP em relação a um referencial fixo.

A unidade de processamento é dedicada à execução do software de controle da aeronave. O retângulo pontilhado à direita representa os componentes usados para aplicações específicas, enquanto o retângulo pontilhado à esquerda corresponde aos componentes usados no modo de pilotagem em primeira pessoa, em que o operador visualiza em tempo real as imagens captadas por uma câmera embarcada.

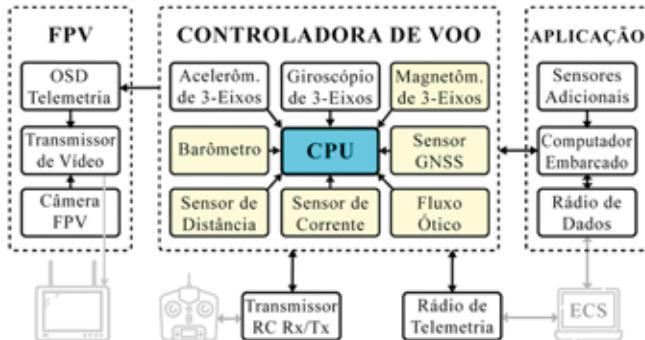


Fig. 2 – Organização básica dos componentes internos e externos do quadricóptero.

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

2.3 Visão computacional

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

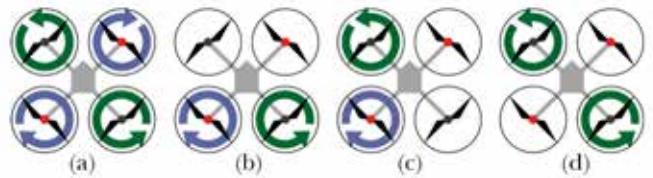


Fig. 3 – Dinâmica básica de voo de um quadricóptero em função da rotação de cada propulsor. a) subida; b) inclinação para a frente; c) inclinação para a direita; d) guinada para a direita.

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

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

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

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

No método de subtração de plano de fundo, um quadro inicial é mantido como referencial e atualizado a cada novo quadro, mantendo uma representação viável do plano de fundo. A cada quadro vindouro, a subtração é feita e a diferença é considerada um OIM. Esse método identifica bem OIMs, mas requer

a atualização adequada do quadro de referência. O rastreamento de um OIM consiste no registro de sua posição ao longo do tempo, identificando continuamente os objetos correspondentes entre os quadros da sequência. Problemas temporários, como oclusão de objetos, podem ser contornados usando técnicas de predição.

3. Revisão de literatura

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

Tabela 1: Comparação das principais características de aeronaves remotamente pilotadas utilizadas nos trabalhos acadêmicos citados.

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

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

No artigo [30], que compartilha três autores com o presente trabalho, foi proposto um sistema para controlar várias ARPs de pequeno porte para a vigilância de uma área predefinida. A solução proposta visa ao controle de posicionamento e deslocamento das aeronaves dentro da área alvo da vigilância, sendo que tal área é decomposta em células hexagonais com diferentes prioridades de cobertura. Uma política de distribuição de ARPs baseada nas prioridades define a frequência de visitação de cada célula. A solução

permite que um único operador comande uma frota de ARPs autônomas usando uma interface de usuário de alto nível, de forma que não há necessidade de controle manual individual das ARPs.

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

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

Em [33], os autores apresentam uma solução que usa um enxame de ARPs comerciais para vigilância aérea semiautônoma. Um operador define manualmente trajetórias circulares para as ARPs de acordo com um método que evita a sobreposição das imagens capturadas pelas câmeras embarcadas. Essas imagens são então enviadas continuamente para uma estação em solo que, por sua vez, processa as imagens para detectar objetos de interesse, que não são necessariamente objetos móveis. A quantidade de ARPs e a frequência de cobertura podem variar de acordo com o tamanho da área.

A vigilância de fronteiras usando drones e uma rede de sensores estacionários em solo é tema do trabalho apresentado em [34]. Uma rede de sensores em terra composta por sonares e sensores infravermelhos é usada para detectar movimentos no ambiente. Quando um movimento é detectado,

uma ARP é acionada para ir até o local e capturar imagens da região. Tais imagens são transmitidas a uma estação em terra que, por sua vez, processa as imagens buscando encontrar pessoas.

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

4. Formalização do problema

A Figura 4 mostra uma representação 3D em alto nível de um cenário de vigilância simplificado, em que um carro adentra uma área restrita que envolve uma edificação. Os muros no entorno da edificação definem a área restrita. No topo, está a ARP de vigilância com uma câmera apontada para baixo, processando continuamente as imagens capturadas. O campo de visão da câmera é representado pelo volume piramidal semitransparente entre a ARP e o solo. Pode-se notar que o campo de visão abrange todo o círculo que representa a área restrita. Na estrada que dá acesso à edificação, há um veículo dentro da área restrita, que representa uma ETM.

4.1 Formalizações preliminares

Em síntese, os elementos relevantes para o problema são a área restrita a ser vigiada, as entidades terrestres

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

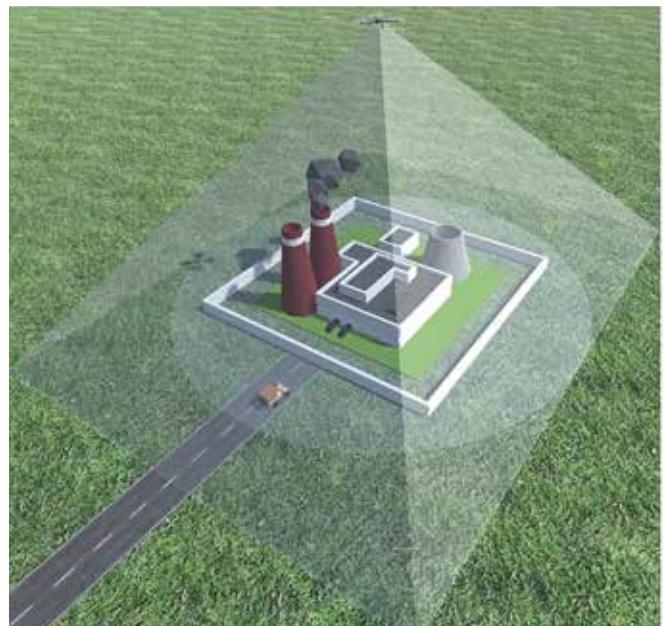


Fig. 4 – Representação 3D de um cenário de vigilância.

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

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

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

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

4.2 Formalização da detecção

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

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

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

uma vez que o mecanismo de navegação de ARP é baseado em um sensor de localização por satélites.

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

4.3 Formalização do rastreamento

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

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

$$(E_{det}^t, R^t) = \left(\left\{ \left(x_{e_{det}^i}^t, y_{e_{det}^i}^t \right) \right\}, \left\{ R_{e_{det}^i}^t \right\} \right); \\ (E_{det}^t, R^t) \leftarrow f_{track}(E_{det}^t, E_{det}^{t-1}, R^{t-1}) \mid 1 \leq i \leq n_{det}^t \quad (2) \\ 2 \leq t \leq t_{curr}$$

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

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

4.4 Restrições, premissas e requisitos adicionais

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

5. Solução proposta

A Figura 5 apresenta uma visão simplificada da arquitetura do SARP (Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada) usado na solução proposta. Ele é composto por uma ARP estacionária e uma estação de controle em solo que se comunicam por um canal bidirecional entre si. A ARP detecta e rastreia ETMs invasoras usando somente o aparelho embarcado no veículo, transmitindo continuamente à ECS dados referentes às ETMs (posição, velocidade e tamanho) e dados de telemetria (bateria, posição, inclinação e estado dos sensores).

Complementando a Figura 5, a Figura 6 apresenta uma visão comportamental do SARP ao longo de uma missão, destacando as tarefas de alto nível envolvidas na solução do problema e a sequência em que tais tarefas são executadas. O retângulo tracejado corresponde às

coordenadas dos vértices que definem um polígono correspondente ao perímetro da área restrita, que são fornecidas pelo operador da missão como dados de entrada. O sistema então inicia computando a posição e orientação (pose) ideais da ARP, de forma a manter cobertura visual total da área restrita.

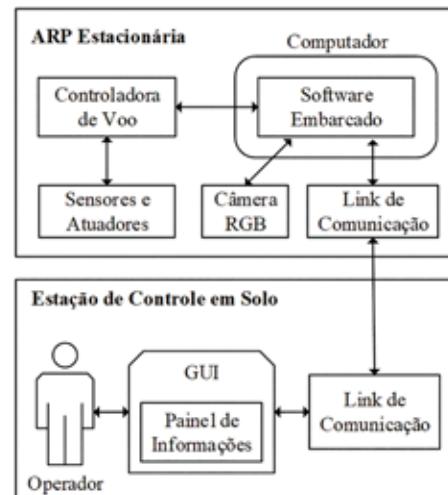


Fig. 5 – Arquitetura simplificada do SARP aplicado na solução.

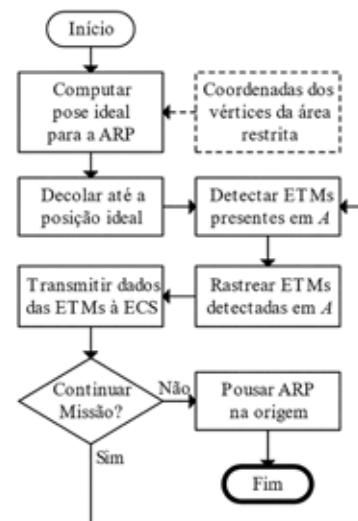


Fig. 6 – Visão em alto nível das tarefas executadas pelo SARP.

Com a pose computada, a ARP decola e navega até alcançá-la. Em seguida, o algoritmo de detecção de ETMs é iniciado, obtendo um quadro de referência e processando os quadros vindouros em busca de alterações que caracterizem OIMs presentes na imagem. Com os resultados da detecção, o algoritmo de rastreamento entra em ação visando manter um registro temporal do

posicionamento das ETMs detectadas. Concluindo um ciclo, informações estáticas e dinâmicas referentes às ETMs são transmitidas para a ECS.

Caso a missão deva prosseguir, um novo ciclo de detecção-rastreamento-transmissão é iniciado. A missão pode ser finalizada de forma deliberada pelo operador ou de forma automática mediante o estado da ARP. As subseções seguintes apresentam detalhes das tarefas de alto nível apresentadas nesta subseção.

5.1 Posicionamento da ARP

Para maior utilidade das imagens capturadas, a *ARP* deve pairar sobre a área restrita A de forma que o campo de visão seja ajustado para que a área restrita comprove a maior quantidade possível de pixels, visando maximizar a relação pixels/área. Dessa forma, ETMs que adentrem A ocuparão mais pixels, facilitando a detecção. Considerando que o sensor da câmera é retangular, para maximizar a relação pixel/área, primeiramente, é computado um retângulo *Rect* de área mínima que envolve toda a área restrita A .

Então, a latitude e longitude da *ARP* devem coincidir com o centro de *Rect*, e a orientação da *ARP* deve ser definida de forma que o lado de maior comprimento do retângulo computado e o lado de maior comprimento da imagem capturada sejam paralelos e os centros sejam coincidentes. Com a pose da *ARP* computada, é necessário calcular a altitude em que a aeronave deve pairar para que a câmera tenha abrangência completa da área restrita. Nesse caso, considera-se que os parâmetros relacionados à lente da câmera são previamente conhecidos.

Conforme a equação 3 [38], as dimensões (W, L) da área de cobertura de uma câmera planar ao solo a uma altitude h podem ser calculadas da seguinte forma, onde α corresponde ao ângulo de abertura vertical da câmera e β ao ângulo de abertura horizontal da câmera:

$$\begin{aligned} W &= 2h * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ L &= 2h * \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

Portanto, a altitude mínima h_{min} admitida para a câmera da *ARP*, de forma que ela faça a cobertura total de A , pode ser derivada da equação 3, como segue:

$$\begin{aligned} h_W &= \frac{W}{2 * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \\ h_L &= \frac{L}{2 * \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)} \\ h_{min} &= \max(h_W, h_L) \end{aligned} \quad (4)$$

Esses cálculos desprezam deslocamentos horizontais e verticais provocados por intempéries do ambiente e erros nos sensores da *ARP*. Portanto, é recomendado usar uma margem de segurança para evitar a possível falta de cobertura de regiões próximas às bordas de A . A Figura 7 apresenta uma imagem de uma área restrita fictícia a ser vigiada.



Fig. 7 – Área restrita fictícia a ser vigiada e representações da área de abrangência da câmera em diferentes situações.

Na Figura 7, o polígono com arestas sólidas verdes escuras corresponde à área restrita A . O retângulo com arestas sólidas amarelas corresponde ao retângulo de área mínima que envolve a área restrita. O retângulo com arestas em pontilhado azul corresponde à área coberta pela câmera da *ARP* quando a aeronave está na pose computada previamente, representada pelo círculo branco com borda vermelha. Para fins de comparação, o retângulo maior, com arestas

pontilhadas amarelas, corresponde à imagem capturada pela câmera na *ARP* quando a aeronave estiver pairando na posição horizontal da pose computada, mas a uma altitude superior e com uma orientação diferente.

O retângulo de arestas vermelhas dentro da área restrita corresponde a um objeto de interesse aleatório. Na imagem compreendida pelo retângulo pontilhado azul, esse objeto ocupa cerca de 2,3% da imagem, enquanto ocupa 1,4% da imagem compreendida pelo retângulo pontilhado amarelo, ou seja, na imagem capturada a partir da pose ideal o objeto teria aproximadamente 64% mais pixels, tornando-o mais “visível” na fase de detecção de ETMs.

5.2 Estabilização de imagens

Vibrações provocadas por motores e movimentos causados por intempéries do ambiente ou por imprecisão de sensores estão entre os causadores de problemas em imagens capturadas a partir de ARPs. Manter o alinhamento dos quadros capturados pela câmera é crucial para algoritmos de detecção de OIMs. Este trabalho utiliza uma solução híbrida baseada em estabilização mecânica com um *gimbal* motorizado e estabilização por software. Para movimentos angulares de rolagem e arfagem, o *gimbal* é acionado. A técnica utilizada foi desenvolvida pelos mesmos autores deste artigo e é apresentada em [39].

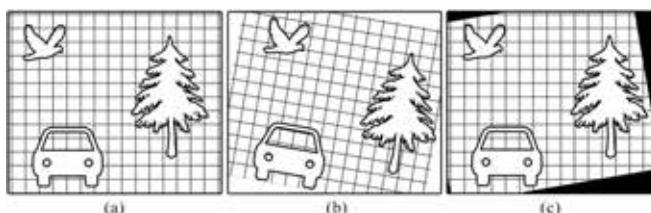


Fig. 8 – Geração de bordas inválidas causada pela transformação geométrica aplicada para correção dos movimentos indesejados da câmera. (a) quadro de referência; (b) quadro a ser alinhado; (c) quadro corrigido.

A Figura 8 mostra um exemplo de alinhamento que cria bordas inválidas, com (a) apresentando o quadro de referência, (b) apresentando o quadro a ser alinhado e (c) mostrando o quadro corrigido pela transformação

geométrica e as bordas pretas surgidas como efeito colateral. Vale mencionar que o tamanho das bordas pretas aumenta de forma proporcional aos movimentos da câmera, portanto, a manutenção de estabilidade da ARP é algo de fundamental importância.

5.3 Detecção e rastreamento de ETMs

A detecção e o rastreamento de ETMs consideram que o eixo ótico da câmera embarcada tem a mesma direção e sentido do vetor gravidade, graças ao recurso de estabilização de imagens. Portanto, as imagens capturadas do solo são coplanares, facilitando a etapa de detecção de ETMs. O diagrama da Figura 9 apresenta uma visão geral do algoritmo de detecção e rastreamento de ETMs.

Um ciclo de detecção e rastreamento inicia-se a partir do **fluxo de vídeo** da câmera embarcada em *ARP*. Esse ciclo se repete para cada quadro processado. Primeiramente, captura-se um quadro para usar como **quadro de referência**. Cada novo quadro, representado no diagrama pelo bloco com o rótulo **quadro atual**, passa, primeiramente, por um processo de alinhamento, de forma que a imagem do quadro atual coincida com a imagem do quadro de referência. Em seguida, o quadro atual é subtraído do quadro de referência e o resultado é submetido a um limiar que vai determinar se cada pixel resultante deve ser desprezado (0) ou considerado (1), gerando uma imagem binária.

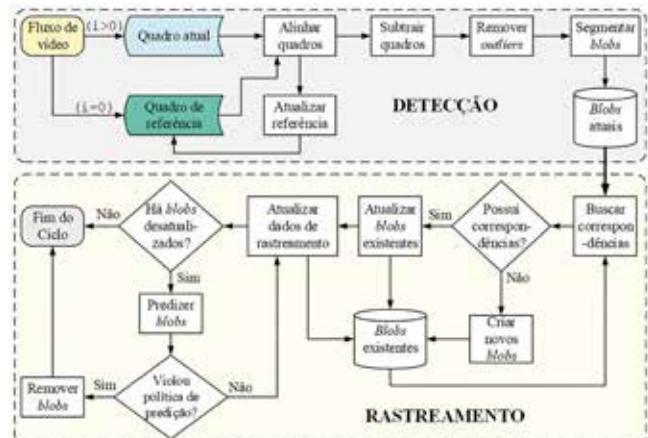


Fig. 9 – Visão geral do algoritmo de detecção e rastreamento de ETMs.

Os agrupamentos de pixels binários contíguos formam *blobs* (do inglês *binary large objects*). Os *blobs* de tamanho superior a um segundo limiar são mantidos, enquanto os menores são considerados *outliers* e removidos da imagem. Por fim, os *blobs* são devidamente segmentados do plano de fundo e armazenados na coleção ***blobs atuais***. Esses *blobs* são os candidatos às ETMs detectadas. A partir desse ponto é iniciada a fase de rastreamento.

No primeiro ciclo, os *blobs* passarão a constituir automaticamente a coleção de ***blobs existentes***. No ciclo seguinte, os *blobs* atuais são comparados com aqueles computados no ciclo anterior, de forma a se **buscar correspondências** entre as coleções de *blobs*. Assim, é possível manter um histórico de posições dos *blobs* ao longo do tempo.

Em vista da taxa de processamento de quadros, da resolução da câmera e da altitude da *ARP*, os *blobs* deslocam-se por poucos pixels entre um quadro e outro. Por conta disso, a busca por uma correspondência se resume a encontrar um *blob* na vizinhança que tenha as mesmas características físicas (razão de aspecto e área) e comportamentais (direção e velocidade) que o *blob* do quadro atual, sendo que o raio de busca é um parâmetro que influí no desempenho.

Quando algum dos *blobs* atuais não possui um *blob* existente correspondente, significa que ele é um novo *blob*, ou seja, trata-se de uma nova ETM que acabou de adentrar a área restrita. Os *blobs* atuais que tiveram *blobs* existentes correspondentes terão suas informações e dados de rastreamento atualizados. Caso algum *blob* existente não tenha correspondente, pode ser que ele tenha deixado a área restrita ou esteja passando por um evento de oclusão.

Os casos de oclusão são tratados através de uma política de predição, em que a próxima posição do *blob* ocluso é computada de acordo com seu comportamento dinâmico, baseado em seu histórico de posições ao longo do tempo. A política de predição pode excluir um *blob* ou atualizar seus dados de rastreamento com a nova posição estimada. A exclusão pode ocorrer quando a posição do *blob* indicar que ele deixou a área restrita ou quando ele está sem correspondência por um tempo acima de um limiar ajustável.

5.4 A ARP construída

Para a condução de experimentos de partes intrínsecas do SARP proposto, foi construída uma ARP com características que atendem a todas as premissas do problema. A metodologia construtiva evoluiu de um projeto anterior publicado em [40]. A ARP usa componentes de prateleira com alta disponibilidade comercial, sendo que cada componente foi criteriosamente selecionado a partir de testes empíricos, individuais e integrados, usando equipamentos computadorizados.

A ARP construída possui 330 mm de envergadura, autonomia de voo pairado superior a 40 minutos e peso final de 1080 g, enquanto seu antecessor tinha envergadura de 450 mm, voava até 23 minutos e pesava 1,5 kg. As evoluções na parte sensorial também foram relevantes. O ganho de autonomia deve-se, principalmente, à bateria de células de íons de lítio construída especificamente para esse veículo. Vale mencionar ainda que o *gimbal* usado para a estabilização mecânica também foi construído usando componentes de prateleira. A Figura 10 mostra uma foto real da ARP construída para este trabalho.



Fig. 10 – ARP de 330 mm construída para desempenhar o papel de ARP estacionária.

Para as tarefas de navegação e controle, foi desenvolvida uma biblioteca com funções em alto nível para movimentação da ARP, disponível em [41]. Ela é baseada em outra de abstração inferior chamada DroneKit [42], que utiliza um protocolo específico para comunicação com ARPs de pequeno porte chamado MavLink [43].

6. Resultados experimentais

Dada a complexidade de se criar um cenário real para validação integral do SARP em uma missão de vigilância, as partes intrínsecas do sistema foram validadas individualmente. Para validar a ARP construída, foram realizados testes de voo reais e simulados por computador. A simulação por computador utilizou uma arquitetura *Software in the Loop* (SITL) disponibilizada pela equipe que desenvolve o ArduPilot [44], que é o firmware da controladora de voo. A Figura 11 mostra os resultados obtidos.

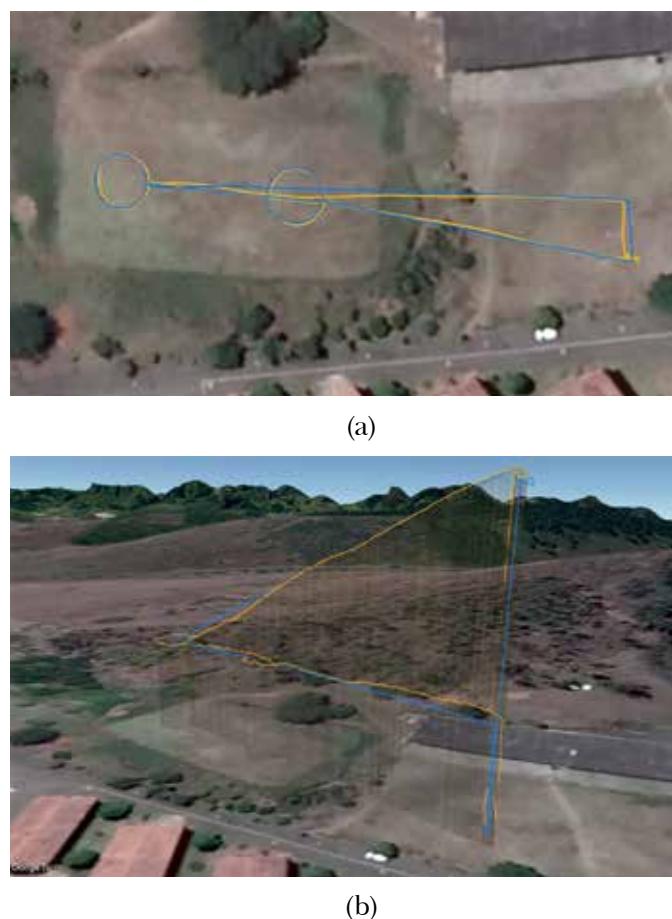


Fig. 11 – Trajetórias executadas pela ARP simulada com SITL (traço azul) e pela ARP em voo real (traço laranja). (a) visualização em 2D; (b) visualização em 3D.

Os gráficos da Figura 12 mostram a diferença de latitude, longitude e altitude entre os experimentos de voo real e por SITL. A diferença entre os resultados é desprezível para esse tipo de aplicação e demonstra

claramente que a precisão de navegação da ARP habilita o uso do simulador SITL para validação inicial de algoritmos de navegação.

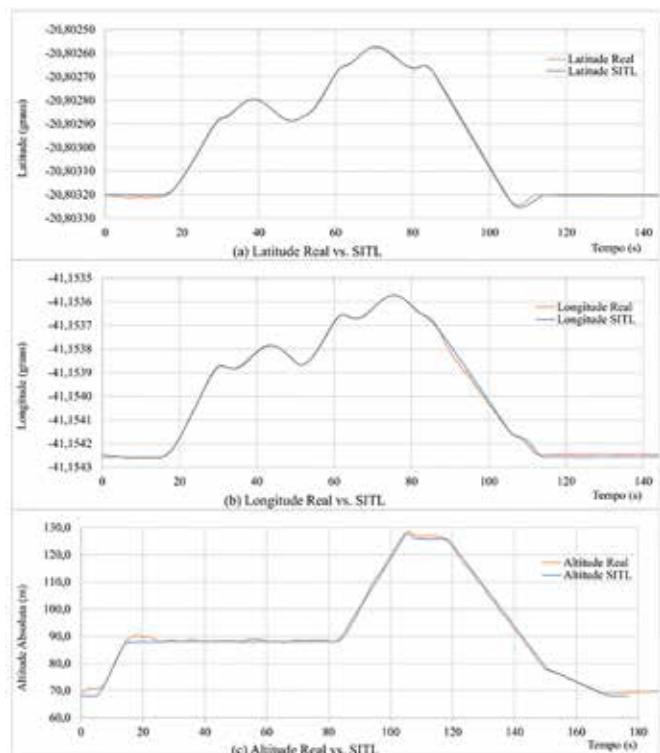


Fig. 12 – Latitude (a), longitude (b) e altitude (c) das trajetórias geradas pela simulação com SITL (linha azul) e com a ARP em voo real (linha laranja).

Para validar o algoritmo de detecção e rastreamento, um simulador computacional foi concebido para gerar animações de ETMs adentrando uma área restrita, passando por situações de oclusão e cruzando com outras ETMs. A Figura 13 mostra capturas de tela do algoritmo de detecção e rastreamento em ação. A primeira captura (a) mostra uma região verde correspondente ao terreno, retângulos marrons representando regiões de oclusão e um retângulo branco representando uma ETM. A segunda captura (b) mostra a imagem binária com a ETM destacada do plano de fundo. A terceira captura (c) mostra o rastro da ETM ao longo do tempo, incluindo posições determinadas por predição.

O simulador também gera dados de *ground truth*. O gráfico da Figura 14 mostra alguns resultados qualitativos do processo de detecção e rastreamento

comparando dados de rastreamento gerados pelo algoritmo com os dados de *ground truth* gerados pelo simulador.

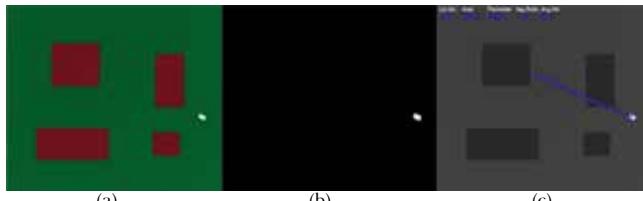


Fig. 13 – Resultado do algoritmo de rastreamento aplicado em animação gerada pelo simulador. (a) imagem original; (b) imagem subtraída do plano de fundo; (c) rastreamento computado.

Na legenda mostrada na parte superior do gráfico da Figura 14, “GT” significa “*ground truth*”, “Rast” significa “rastreamento”, “S.O.” significa “sem oclusão” e “C.O.” significa “com oclusão”. O gráfico possui oito linhas que representam trajetórias percorridas pelas respectivas ETMs ao longo da imagem, sendo quatro geradas pelos dados de *ground truth* (linhas grossas) e quatro computadas pelo algoritmo de detecção e rastreamento (linhas estreitas). Cada ponto gerador de tais linhas refere-se ao centroide da ETM que percorreu a trajetória representada pela linha. A linha relacionada ao *ground truth* foi alargada para facilitar a comparação, uma vez que o gráfico apresenta muitas sobreposições.

O primeiro experimento, representado na Figura 14 pelas linhas cinza e amarela, corresponde a uma ETM movendo-se em linha reta sem sofrer oclusão. A linha amarela sofre variações pequenas, mas não deixa de ocupar a região central da linha de *ground truth*. O segundo experimento, representado na Figura 14 pelas linhas preta e azul-clara, corresponde a uma ETM movendo-se em linha reta e sofrendo algumas oclusões. O rastreamento computado também ficou próximo ao *ground truth*, exceto pela região destacada, onde ocorreu uma situação de oclusão que demandou o uso mais intenso do mecanismo de predição.

O terceiro experimento, representado na Figura 14 pelas linhas vermelha e branca, simulou uma ETM em um trajeto com curvas sem sofrer oclusão. O rastreamento também ficou bem próximo ao *ground truth*. O quarto e último experimento, representado

na Figura 14 pelas linhas azul e verde, simulou uma ETM em uma trajetória com curvas e sofrendo oclusões em alguns pontos. Nesse experimento, o rastro computado ficou próximo ao *ground truth*, porém, destaca um trecho em que uma oclusão provocou um leve desvio na trajetória estimada pela política de predição.

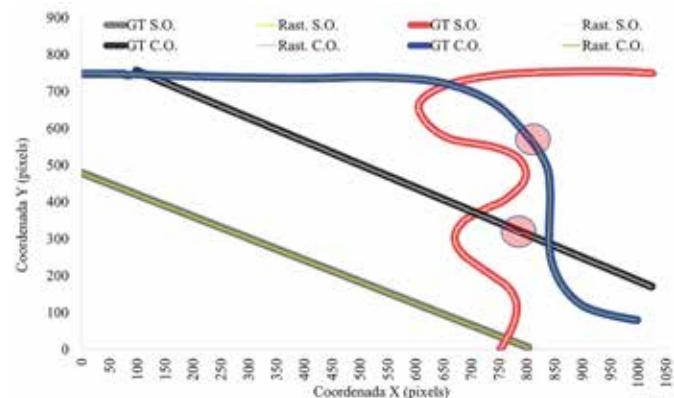


Fig. 14 – Comparação entre trajetórias *ground truth* e trajetórias computadas pelo algoritmo de detecção e rastreamento.

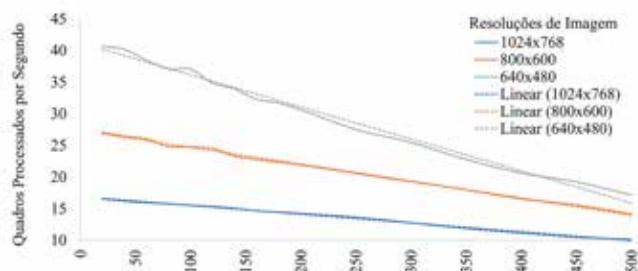


Fig. 15 – Influência da quantidade de ETMs e da resolução de vídeo na taxa de quadros processados por segundo.

Para validação do tempo de execução, foram geradas 16 animações simulando grupos de 20 a 500 ETMs passando simultaneamente pela cena. As animações foram capturadas em três resoluções de vídeo distintas, a saber, 1024×768 , 800×600 e 640×480 , representando diferentes resoluções de câmera. A Figura 15 mostra a relação entre a quantidade de ETMs e a taxa de quadros por segundo para cada resolução testada. As linhas pontilhadas são apenas para demonstrar uma tendência linear na complexidade do algoritmo.

Os experimentos foram executados em um Raspberry Pi 4B com 4GB de RAM, com temperatura mantida entre 41 e 45 graus Celsius. Uma observação já esperada é que o melhor caso ocorre com a presença de 20 ETMs, enquanto o pior caso ocorre com a presença de 500 ETMs. Para a resolução de vídeo 640×480 , a taxa de quadros por segundo variou entre 17,1 (pior caso) e 40,7 (melhor caso), incorrendo em um tempo de processamento por quadro de 58 ms e 24 ms, respectivamente. Na resolução de vídeo 800×600 , a taxa de quadros por segundo variou entre 14,1 e 27,1, demandando 71 ms e 37 ms por quadro, respectivamente. Com a resolução de 1024×768 , a taxa de quadros por segundo variou entre 10,1 e 16,5, demandando 99 ms e 61 ms por quadro, respectivamente.

Nota-se que quanto maior é a resolução do vídeo, menor é o impacto da quantidade de ETMs no tempo de processamento, indicando que o algoritmo passa a maior parte do tempo realizando processamento de imagem e menos tempo gerenciando as ETMs presentes na cena. A tendência linear e o fato da quantidade de ETMs presentes na cena ser menos impactante no tempo de execução do que as demais variáveis envolvidas contribuem para facilitar o dimensionamento dos recursos computacionais necessários para alguma aplicação específica que demande, por exemplo, vigilância de áreas extensas e o uso de câmeras de maior resolução.

Por fim, vale mencionar que, em termos qualitativos, o tamanho mínimo da ETM detectável varia de acordo com a quantidade de pixels que ela ocupa na imagem e com o contraste que ela possui em relação ao plano de fundo (solo). O algoritmo de detecção e rastreamento proposto se mostrou capaz de rastrear ETMs ocupando no mínimo quatro pixels nos vídeos gerados por simulação. Entretanto, em ambientes reais visualmente ruidosos, o tamanho mínimo da ETM detectável tende a aumentar na medida em que a intensidade dos ruídos aumenta, sendo que o estabelecimento dessa tendência demanda estudos mais específicos.

7. Considerações finais

Este artigo apresentou um SARP para detecção autônoma de ETMs em áreas restritas em ambientes abertos, pensado para situações em que os meios convencionais de vigilância, como CFTV e patrulhamento humano, mostram-se inviáveis do ponto de vista de tempo de estabelecimento, estrutura disponível, custo e logística operacional. A solução proposta pode trazer vantagens relevantes nesses aspectos, além de reduzir o risco a vidas humanas por demandar somente um operador agindo à distância.

No que diz respeito à ARP, os resultados obtidos experimentalmente demonstram a viabilidade do protótipo construído em atender às premissas estabelecidas, mostrando-se uma plataforma de baixo custo, portátil e de fácil operação e manutenção, desse modo, útil para diversas aplicações. Quanto ao software desenvolvido, os resultados de desempenho demonstram que a complexidade algorítmica admite execução em tempo real de forma totalmente embarcada na ARP, dispensando a necessidade de transmissão das imagens para processamento externo.

Uma limitação importante de se mencionar é o tempo de voo reduzido das ARPs portáteis do tipo quadricóptero, o que limitaria o tempo útil do sistema de detecção de ETMs e, consequentemente, a viabilidade de uso. Algumas soluções podem ser usadas para reduzir essa limitação. Uma possibilidade é o uso de múltiplas ARPs com substituição automática da ARP estacionária. Outra possibilidade é o uso de alimentação cabeada a partir do solo, como ocorre em [45]. Uma sugestão para trabalho futuro é a criação de um algoritmo para determinar o nível de ameaça de uma ETM de acordo com suas características físicas e comportamentais, como seu tamanho, velocidade, padrão de movimentação e direção.

Agradecimentos

Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código Financeiro 001.

Referências

- [1] HAERING, N.; VENETIANER, P. L.; LIPTON, A. The evolution of video surveillance: an overview. *Machine Vision and Applications*, v. 19, n. 5-6, p. 279–290, 2008.
- [2] NAYAR, S. K.; NARASIMHAN, S. G. Vision in bad weather. In *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. Piscataway: IEEE, 1999. p. 820–827.
- [3] WANG, H.; LI, S. Z.; WANG, Y. Face recognition under varying lighting conditions using self quotient image. In *Proceedings of the Sixth IEEE Int. Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*. Piscataway: IEEE, 2004. p. 819–824.
- [4] HAUTIÈRE, N.; TAREL, J. P.; AUBERT, D. Towards fog-free in-vehicle vision systems through contrast restoration. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Piscataway: IEEE, 2007. p. 1–8.
- [5] SEMSCH, E.; JAKOB, E. S. M.; PAVLÍCEK, D.; PECHOUCEK, M. Autonomous UAV surveillance in complex urban environments. In *IEEE Int. Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*. Piscataway: IEEE, 2009. p. 82–85.
- [6] NAIDOO, Y.; STOPFORTH, R.; BRIGHT, G. Development of an UAV for search & rescue applications. In *IEEE AFRICON 11'*. Piscataway: IEEE, 2011. p. 1–6.
- [7] GOTOVAC, D.; GOTOVAC, S.; PAPIC, V. Mapping aerial images from UAV. In *IEEE International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*. Piscataway: IEEE, 2016. p. 1–6.
- [8] WU, C.; QI, J.; SONG, D.; QI, X.; LIN, T.; HAN, J. Development of an unmanned helicopter automatic barrels transportation system. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Piscataway: IEEE, 2015. p. 4686–4691.
- [9] MERWADAY, A.; GUVENC, I. UAV assisted heterogeneous networks for public safety communications. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. Piscataway: IEEE, 2015. p. 329–334, 2015.
- [10] GRIPPA, P. Decision making in a UAV-based delivery system with impatient customers. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Piscataway: IEEE, 2016. p. 5034–5039.
- [11] BEST DRONE FOR THE JOB. Pro Photography. [2017]. Acesso em: 28 ago. 2021. Disponível em: <http://bestdroneforthejob.com/product-category/work-drones/pro-photography-drones/>.
- [12] DRONE RACING LEAGUE. The Drone Racing League. [2016]. 28 ago. de 2021. Disponível em: <https://thedroneracingleague.com/>.
- [13] GEORGE, E. A.; TIWARI, G.; YADAV, R. N.; PETERS, E.; SADANA, S. UAV systems for parameter identification in agriculture. In *IEEE Global Humanitarian Technology Conference*. Piscataway: IEEE, 2013. p. 270–273.
- [14] SIEGWART, R.; NOURBAKHS, I. R.; SCARAMUZZA, D. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2011. 472 p.
- [15] SABATELLI, S.; SECHI, F.; FANUCCI, F.; ROCCHI, A. A sensor fusion algorithm for an integrated angular position estimation with inertial measurement units. In *Design, Automation & Test In Europe Conference & Exhibition (DATE)*. Piscataway: IEEE, 2011. p. 1–4.
- [16] FRIEDRICH, S.; HEMMER, M.; KING, J.; SCHMIDT, C. The continuous 1.5 D terrain guarding problem: Discretization, optimal solutions, and PTAS. *Journal of Computational Geometry*, v. 7, n. 1, p. 256–284, 2016.
- [17] SZELISKI, R. *Computer vision: algorithms and applications*. Washington, DC: Springer, 2010.
- [18] AJMERA, J.; SIDDHARTHAN, P. R.; RAMARAVIND, K. M.; VASAN, G.; BALAJI, N.; SANKARANARAYANAN, V. Autonomous visual tracking and landing of a quadrotor on a moving platform. In *Third Int. Conference on Image Information Processing (ICIIP)*. Piscataway: IEEE, 2015. p. 342–347.
- [19] KAKVAND, P.; JABERZADEH, M.; INALLOU, M. M.; ALBORZ, Y. Smart onboard UAV system: using computer vision system to find a movable and stationary target. In *2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)*. Piscataway: IEEE, 2015. p. 694–699.
- [20] ZHANG, C. H.; CHEN, J. B.; SONG, C. L.; XU, J. H. An UAV navigation aided with computer vision. In *26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Piscataway: IEEE, 2014. p. 5297–5301.
- [21] GUPTA, S.; MOHANDAS, P. I. T.; CONRAD, J. M. A Survey of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles. In *Proceedings of IEEE Southeastcon*. Piscataway: IEEE, 2012. p. 1–6.

- [22] ARAGUÁS, G.; PAZ, C.; PAINA, G. P.; CANALI, L. Visual homography-based pose estimation of a quadrotor using spectral features. In Latin America Congress on Computational Intelligence (LA-CCI). Piscataway: IEEE, 2015. p. 1–6.
- [23] FOWERS, S.; LEE, D. J.; TIPPETTS, B. J.; LILLYWHITE, K. D.; DENNIS, A. W.; ARCHIBALD, J. K. Vision aided stabilization and the development of a quad-rotor micro UAV. In International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2007. p. 143–148.
- [24] TANG, D.; LI, F.; SHEN, N.; GUO, S. UAV attitude and position estimation for vision-based landing. In Proceedings of 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology. Piscataway: IEEE, 2011. p. 4446–4450.
- [25] JIN, Z.; WANG, X.; PAN, Q.; MORAN, B. Optimal UAV localisation in vision based navigation systems. In 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE, 2016. p. 1021–1025.
- [26] SUKANYA, C. M.; GOKUL, R.; PAUL, V. A survey on object recognition methods. International Journal of Science, Engineering and Computer Technology, v. 6, n. 1, p. 48–52, 2016.
- [27] POUNDS, P.; MAHONY, R.; CORKE, P. Modelling and control of a quad-rotor robot. In Proceedings of the 2006 Australasian Conference on Robotics and Automation. Sydney: ARAA, 2006.
- [28] NAVAJAS, G. H. T.; PRADA, S. R. Building your own quadrotor: A mechatronics system design case study. In III International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA). Piscataway: IEEE, 2014. p. 1–5.
- [29] TARIQ, A.; OSAMA, S. M.; GILLANI, A. Development of a low cost and light weight UAV for photogrammetry and precision land mapping using aerial imagery. In International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT). Piscataway: IEEE, 2016. p. 360–364.
- [30] SILVA, L. C. B.; BERNARDO, R. M.; OLIVEIRA, H. A.; ROSA, P. F. F. Multi-UAV agent-based coordination for persistent surveillance with dynamic priorities. In International Conference on Military Technologies (ICMT). Piscataway: IEEE, 2017. p. 765–771.
- [31] CHO, J.; SUNG, J.; YOON, J.; LEE, H. Towards Persistent Surveillance and Reconnaissance Using a Connected Swarm of Multiple UAVs. IEEE Access, v. 8, p. 157906–157917, 2020.
- [32] WU, Y.; WU, S.; HU, X. Cooperative Path Planning of UAVs & UGVs for a Persistent Surveillance Task in Urban Environments. In IEEE Internet of Things Journal, v. 8, n. 6, p. 4906–4919, 2021.
- [33] BANDARUPALLI, A.; SWARUP, D.; WESTON, N.; CHATERJI, S. Persistent Airborne Surveillance using Semi-Autonomous Drone swarms. In Proceedings of the 7th Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications. New York: ACM, 2021. p. 19–24.
- [34] SHARMA, M. K.; SINGAL, G.; GUPTA, S. K.; CHANDRANEIL, B.; AGARWAL, S.; GARG, D.; MUKHOPADHYAY, D. INTERVENOR: Intelligent Border Surveillance using Sensors and Drones. In 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT). Piscataway: IEEE, 2021. p. 1–7.
- [35] ABDEL-MALEK, M. A.; IBRAHIM, A. S.; MOKHTAR, M. Optimum UAV positioning for better coverage-connectivity tradeoff. In IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE, 2017. p. 1–5.
- [36] SUN, J.; MASOUROS, C. Drone Positioning for User Coverage Maximization. In IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE, 2018. p. 318–322.
- [37] NASRAOUI, L.; ROY, S. Optimal UAV Positioning for Terrestrial Users. In 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). Piscataway: IEEE, 2020. p. 1–5.
- [38] NAM, L. H.; HUANG, L.; LI, X. J.; XU, J. F. An approach for coverage path planning for UAVs. In IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC). Piscataway: IEEE, 2016. p. 411–416.
- [39] BERNARDO, R. M.; SILVA, L. C. B.; ROSA, P. F. F. Onboard Video Stabilization for Low Cost Small RPAS Surveillance Applications. In 7th Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS). Piscataway: IEEE, 2018. p. 450–455.
- [40] BERNARDO, R. M.; SILVA, L. C. B.; ROSA, P. F. F. Concepção de Uma Plataforma de VANT de Baixo Custo para Uso em Pesquisas. In V Workshop de Comunicação em Sistemas Embarcados Críticos (WoCCES). Rio de Janeiro: SBC, 2017.
- [41] BERNARDO, R. M. The DroneAPI Python Library. Disponível em: <https://github.com/mar quo/DroneAPI>. Acesso em: 20 jan. 2021.

- [42] DRONEKIT. Developer Tools for Drones. [2015]. Acesso em: 20 out. 2021. Disponível em: <https://dronekit.io/>.
- [43] MAVLINK. MAVLink Developer Guide. [2017]. Acesso em: 20 out. 2021. Disponível em: <https://mavlink.io/en/>.
- [44] ARDUPILOT. Open-Source Autopilot Software System. [2020]. Acesso em: 20 out. 2021. Disponível em: <https://ardupilot.org/>.
- [45] PAPACHRISTOS, C.; TZES, A. The power-tethered UAV-UGV team: A collaborative strategy for navigation in partially-mapped environments. In 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation. Piscataway: IEEE, 2014. p. 1153-1158.

Aplicação do método de solution blow spinning para a obtenção de nanofibras de polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM)

Karollyne G. C. Monsores^{*a}, Anderson O. da Silva^b, Ricardo P. Weber^c, Marcos L. Dias^d

^{a, b, c}Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia de Materiais – Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^dUniversidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Macromoléculas Professora Eloíza Mano Av. Horácio Macedo, 2030, 21941-598, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

*karollyne@ime.eb.br

anderson.q.ao@gmail.com

rpweber@ime.eb.br

mldias@ima.ufrj.br

RESUMO: A técnica de fiação de solução por sopro (solution blow spinning – SBS) é conceitualmente similar à eletrofiação (electrospinning), porém sem a aplicação de baixas correntes e de alta tensão, mas com resultados tão satisfatórios quanto para produção de micro e nano fibras. Este estudo objetivou, por meio da técnica SBS, produzir nanofibras de polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM). As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostram nanofibras, apresentando diâmetro médio de 200-325 nm. Os resultados obtidos indicam que a distância de trabalho, a pressão de injecção e a concentração são variáveis que influenciam diretamente no diâmetro médio das fibras, resultando em fibras com menores diâmetros para concentrações mais baixas.

PALAVRAS-CHAVE: Polietileno de ultra alto peso molecular. Nanofibras. Fiação de solução por sopro.

ABSTRACT: The solution blow spinning (SBS) technique is conceptually similar to electrospinning, but without the application of low currents and high voltage, however with results as satisfactory as for the production of micro and nanofibers. This study aimed to produce ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) nanofibers from the SBS technique. SEM images show nanofibers with an average diameter of 200 – 325 nm. The results obtained indicate that the working distance, injection pressure and concentration are variables that directly influence the average fiber diameter, resulting in fibers with smaller diameters for lower concentrations.

KEYWORDS: Ultra-high molecular weight polyethylene. Nanofibers. Solution blow spinning.

1. Introdução

O polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) é um polímero de engenharia de crescente produção industrial e elevado desempenho e valor econômico. Produzido similarmente a outros polietilenos, a partir do gás eteno, o tamanho da cadeia macromolecular pode ser 30 vezes maior que os demais. O PEUAPM possui massa molar na faixa de 3×10^6 g/mol, conferindo a esse polímero melhor resposta mecânica quando comparado a outros polímeros da mesma classe: elevada resistência ao impacto, à abrasão e a produtos químicos; baixo coeficiente de atrito e alta relação resistência/peso [1,2].

Essas características fazem com que atenda principalmente aplicações em ambientes agressivos ou corrosivos sujeitos a temperaturas moderadas [2].

Todavia, o PEUAPM apresenta elevada viscosidade no estado fundido, dificultando o escoamento em temperaturas acima da fusão ($\sim 135^\circ\text{C}$) e, consequentemente, seu processamento através dos métodos convencionais adotados para os polímeros termoplásticos [3]. Técnicas especiais de processamento como moldagem por compressão (a quente ou frio), extrusão RAM, calandragem e fiação em gel tem sido alternativa de processamento para o PEUAPM [4,5].

Mesmo com recursos de processamento limitados, há uma diversidade de áreas de atuação, como

em revestimentos, na indústria de construção civil, agrícola e mineradora; em artefatos inertes na indústria alimentícia; em peças estruturais, na indústria de bebidas, naval e automobilística; e, principalmente, na fabricação de fibras de alto desempenho para aplicações de alta resistência e em blindagens balísticas [4,6].

A conformação do PEUAPM em fibras e/ou fios permite não somente obter melhor resposta mecânica, atribuída principalmente à relação comprimento/diâmetro (L/D) da fibra, mas também o estudo de novos meios de processamento para esse e outros polímeros que apresentam elevada viscosidade e, consequentemente, difícil processamento por vias convencionais. No caso do PEUAPM, já existem fibras/membranas comerciais, como o Dyneema®, o Tensylon® e a Spectra®, produzidas por meio de fiação em gel do polímero [7,8], por extrusão de estado sólido [9,10] e processo de giro [11,12], respectivamente.

Com o advento da nanotecnologia, a produção de fibras poliméricas em escala nano tem despertado interesse para a ciência devido à potencialidade de aplicações de alto desempenho, atribuídas à elevada área superficial específica (área/unidade de massa) e à razão de aspecto, como já evidenciado para as fibras em dimensões macroscópicas. Sua produção em escala comercial tem como desafio a alta produtividade e o custo efetivo, por serem produzidas atualmente via *electrospinning* [13-15]. A saber, a técnica de fiação por *electrospinning* consiste na aplicação de um campo elétrico de alta voltagem em uma seringa contendo a solução polimérica. Quando superada a tensão superficial, um jato fino é direcionado para o coletor onde são depositadas as nanofibras. As fibras obtidas por tal método sofrem grande influência das variáveis físico-químicas que atuam sob as soluções empregadas, tais como: viscosidade, potencial dielétrico, distância da agulha em relação ao coletor, fatores ambientais etc. Sua morfologia e espessura estão sujeitas a essas variáveis. Outros fatores, como composição química, tanto do polímero quanto do solvente; peso molecular e distribuição do peso molecular; concentração das soluções, entre outros, podem atuar de forma variável

sobre as fibras que serão geradas [16-18]. Todavia, sua escalabilidade comercial ainda é baixa e novas rotas de processamento foram investigadas, como é o caso do sistema de *Solution Blow Spinning* (SBS) [19].

O método SBS é considerado eficiente para a produção de fibras finas em larga escala, pois, diferentemente do *electrospinning*, o SBS não necessita de um campo elétrico para direcionamento das fibras ao coletor. No SBS, o sistema é constituído de uma fonte de gás/ar equipada com um regulador de pressão, uma bomba de seringa, um aparelho de pulverização e um coletor [19]. Nesse, as fibras são estiradas por um fluxo de alta pressão gerado a partir de uma injeção controlada de ar comprimido. A solução polimérica é soprada em direção ao alvo de coleta, e as fibras são geradas durante a evaporação do solvente dentro da distância de trabalho entre o bico de injeção e o coletor [19,20].

Na Fig. 1 são apresentados dois esquemas dos sistemas de *electrospinning* e *solution blow spinning*.

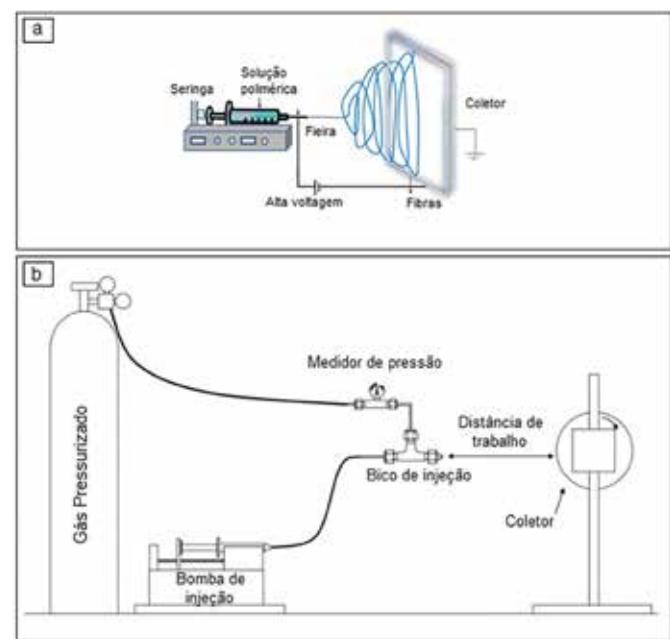


Fig. 1 – Representações esquemáticas dos sistemas de *electrospinning* (a) e *solution blow spinning* (b). Fonte: Adaptado de [19, 21].

O SBS também apresenta alguns parâmetros e variáveis de processo que influenciarão no formato do jato polimérico produzido, sendo eles o peso

molecular, a concentração e a viscosidade da solução polimérica, a pressão do gás e a taxa de fluxo da solução, afetando consequentemente o produto final [22]. De acordo com Silva *et al.* [23] no estudo para obtenção de nanofibras de PVC por SBS, o diâmetro médio das fibras é diretamente proporcional à concentração do polímero no solvente, corroborando outros estudos anteriores [24-26]. Paralelamente, o diâmetro médio das fibras tende a diminuir com uma menor viscosidade da solução polimérica [27]. De acordo com o estudo, esse comportamento está associado a uma maior mobilidade das cadeias.

Esses parâmetros e tendências ainda são pouco discutidos e relatados na literatura para materiais poliméricos de elevado peso molecular e consequentemente elevada viscosidade, como é o caso do PEUAPM.

Dentre as variáveis de processamento no SBS, destaca-se a temperatura de processamento, que é comumente realizado em temperatura ambiente ($\sim 31^{\circ}\text{C}$). No caso do PEUAPM, esse mantém forma de gel em temperaturas a partir de 120°C . Dessa maneira, não somente para o PEUAPM, ajustar essa variável mediante ao polímero empregado possibilita o controle da sua viscosidade e solubilidade.

Assim, devido à alta taxa de produção do sistema SBS e pela dificuldade de processamento do PEUAPM por vias convencionais, este estudo objetivou produzir nanofibras de polietileno de ultra alto peso molecular por meio do sistema de *Solution Blow Spinning*, avaliando o efeito das condições de fiação na morfologia e no diâmetro da fibra. A validação do processamento foi feita por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV-FEG).

2. Materiais e métodos

Para o delineamento desta pesquisa, foram utilizadas amostras em forma de pó de $10\ \mu\text{m}$ a $30\ \mu\text{m}$ de diâmetro de PEUAPM comercial, MIPELON® PM-200 da Mitsui Chemicals. Na Tabela 1 estão apresentados os valores das propriedades do PEUAPM fornecidos pela empresa.

Tabela 1 – Propriedades do PEUAPM comercial MIPELON®.

MIPELON®			
Propriedades	Método	Unidade	Valor
Massa Molar Média	Interno	$10^6\ \text{g/mol}$	1,8
Densidade	ASTM D-1505	g/cm^3	0,940
Resistência à tração na ruptura	ASTM D-638	Mpa	≥ 44
Alongamento na ruptura	ASTM D-638	%	> 350
Temperatura de fusão	ASTM D-2117	$^{\circ}\text{C}$	136

Fonte: [28].

A Fig. 2 apresenta um desenho esquemático do sistema adaptado de SBS empregado para a obtenção de nanofibras de PEUAPM. Diferentemente da Fig. 1b, o sistema montado para a obtenção de nanofibras neste trabalho conta com um sistema de aquecimento no reservatório que contém a solução polímero/solvente, assim como no bico de injeção.

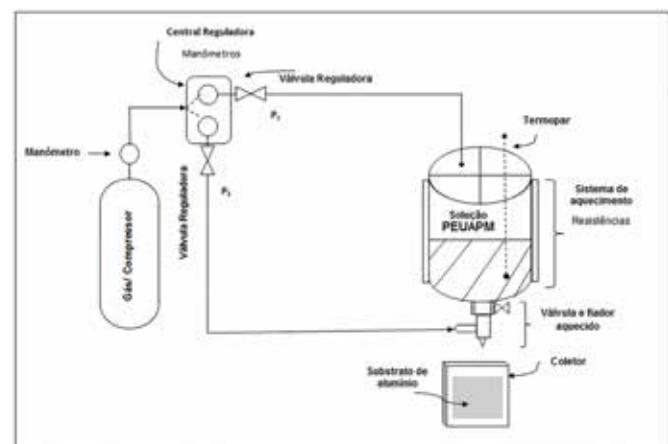


Fig. 2 – Representação esquemática do sistema SBS empregado para a obtenção de nanofibras de PEUAPM.

Para a solubilização do PEUAPM MIPELON®, utilizou-se o solvente Xileno P. A. Para verificar a influência da concentração e viscosidade da solução na obtenção das nanofibras, variou-se a concentração da solução no intervalo de 0,01-0,04% em peso de polímero. O conjunto PEUAPM/Xileno foi pré-misturado em uma chapa de aquecimento com agitação magnética sob a temperatura de 130°C . Adicionou-se essa solução de gel no reservatório do dispositivo experimental, aquecido à temperatura controlada (120 - 135°C). Para obtenção das nanofibras, o bico de injeção empregado consistiu em agulhas

metálicas concêntricas de cerca de 0,03 e 0,05 mm. Um sistema de aquecimento nas agulhas, com temperatura variando entre 90 e 150°C, foi adotado para evitar o entupimento do bico de injeção e auxiliar na evaporação do solvente contido na solução, assim que essa fosse soprada contra o coletor. Uma pressão de injeção foi aplicada ao bico, variando no intervalo de 40-60 Psi. A distância entre a agulha e o coletor fixo variou na faixa de 15 e 30 cm. O processo foi conduzido em condições ambientais, temperatura de ~25°C e umidade relativa de cerca de 55%. As nanofibras foram depositadas em um substrato de alumínio com dimensões 30 × 30 cm, formando membranas de tecido não tecido (TNT) (Fig. 3).

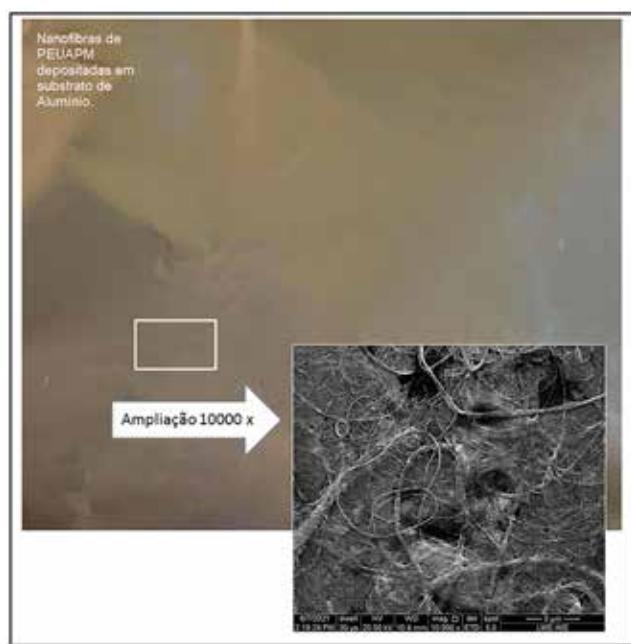


Fig. 3 – Fotografia de uma membrana de fibras não tecidas, fiadas por sopro de solução e coletadas em um coletor fixo 30 × 30cm.

Diante das variáveis adotadas (concentração, pressão e distância de trabalho) para ajustar melhores condições de processamento via SBS do PEUAPM, a Tabela 2 mostra os diferentes grupos de avaliação estudados.

A morfologia das nanofibras de PEUAPM foi analisada em um microscópio eletrônico de varredura FEG, MEV-FEG, operado a uma tensão de 10 kv. Com o auxílio do software Image J foi possível determinar

o diâmetro médio das nanofibras. Para cada grupo de avaliação estudado, foram feitas 50 medições diametrais.

Para verificar se o diâmetro médio para cada grupo avaliado apresentou diferenças significativas entre si, foram realizadas as análises estatísticas de Kruskal-Wallis e o teste de Dunn de comparações de médias. Assim, foi possível identificar a significância estatística dessas para um dado nível de confiança, pois valores- p iguais ou superiores a α (nível de significância do teste 0,05%) indicam que as variáveis de estudo não são estatisticamente significativas.

Tabela 2 – Grupos de avaliação.

GRUPOS	CONDICÕES
A	0,01 m/v% PEUAPM, 40 Psi e 30 cm do coletor.
B	0,03 m/v% PEUAPM, 40 Psi e 30 cm do coletor.
C	0,04 m/v% PEUAPM, 40 Psi e 30 cm do coletor.
D	0,01 m/v% PEUAPM, 50 Psi e 30 cm do coletor.
E	0,01 m/v% PEUAPM, 40 Psi e 15 cm do coletor.
F	0,01 m/v% PEUAPM, 50 Psi e 15 cm do coletor.

3. Resultados e discussões

3.1 Influência da concentração

Nanofibras de PEUAPM foram obtidas por SBS utilizando três concentrações diferentes, 0,01%, 0,03% e 0,04% m/v. Objetivando avaliar a morfologia e o diâmetro médio das fibras obtidas pelo método de fiação em função das concentrações utilizadas, fixou-se uma distância do coletor de 30 cm e pressão de injeção em 40 Psi. As Fig. 4, 5 e 6 apresentam as fotomicrografias e suas respectivas curvas de distribuição de diâmetro médio para as concentrações de 0,01%, 0,03% e 0,04%.

Observa-se que, para as três concentrações estudadas, foram obtidas fibras sem a presença de poros ou grânulos (*beads*), apresentando diâmetro constante ao longo do comprimento da fibra. Todavia, nota-se uma estrutura complexa formada por fibras com dois níveis dimensionais: micro e nano.

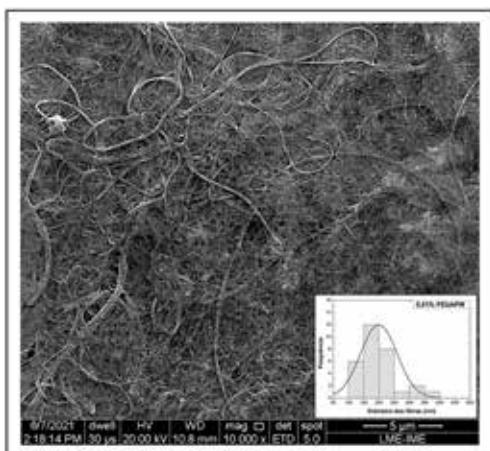


Fig. 4 – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição A. Concentração de 0,01% m/v, pressão de injeção de 40 Psi e distância do coletor fixo de 30 cm.

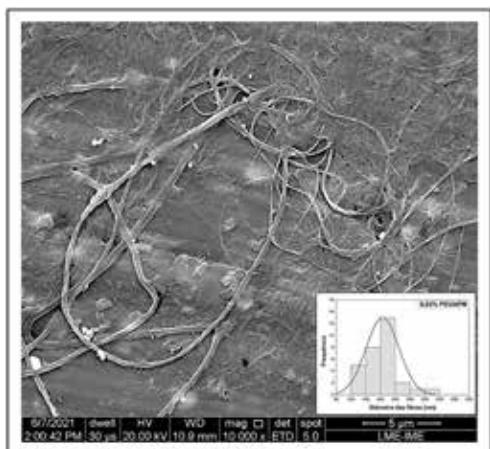


Fig. 5 – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição B. Concentração de 0,03% m/v, pressão de injeção de 40 Psi e distância do coletor fixo de 30 cm.

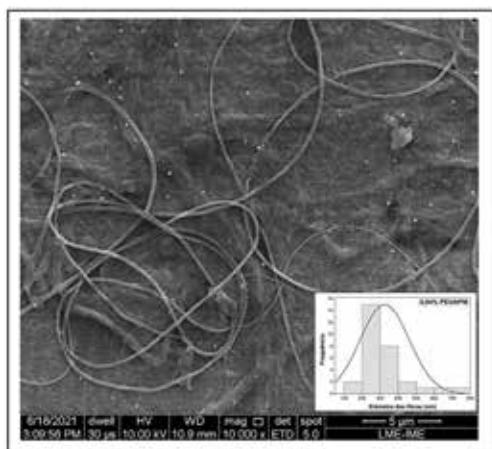


Fig. 6 – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição A. Concentração de 0,04% m/v, pressão de injeção de 40 Psi e distância do coletor fixo de 30 cm.

Esse comportamento foi reportado na literatura por vários pesquisadores [19,29,30], e foi observado que a distribuição das fibras para a técnica de SBS é menos uniforme quando comparada à técnica de *electrospinning*. Isso sugere que os feixes de fibras são mais suscetíveis de se formarem a partir do fornecimento de uma quantidade de solução mínima, como visto para a concentração de 0,01% m/v, em que a distribuição dos diâmetros é maior. Outra indicação para esse comportamento pode ser a turbulência produzida pelo jato de ar em torno da solução de gel fiada, resultando na formação de vários feixes de solução de gel que saem de um único bico e se cruzam no ar, produzindo feixes de fibras antes da completa evaporação do solvente [22]. As morfologias obtidas são similares ao padrão visual de nanofibras de PEUAPM obtidas via *electrospinning* [31-33].

O diâmetro médio encontrado para cada uma das condições é apresentado na Tabela 3. Nota-se um aumento progressivo simultâneo com a concentração, sendo de 5% para a concentração de 0,03% m/v (valor-*p* $6,65 \times 10^{-01}$) e de 64% para a concentração de 0,04% m/v (valor-*p* $3,96 \times 10^{-7}$) quando comparadas à concentração de 0,01%. Esse comportamento pode estar associado ao aumento da viscosidade das soluções empregadas, uma vez que o aumento da viscosidade das misturas polímero/solvente contribui para uniformidade e consequente aumento de diâmetro das fibras [34,35].

Contudo, é evidenciado que a partir da concentração de 0,03% m/v o aumento da concentração de polímero/solvente influencia muito o diâmetro das fibras fiadas de PEUAPM, quase dobrando o valor obtido na condição A.

Tabela 3 – Diâmetros médios obtidos a partir das condições A, B, C. Pressão de injeção 40 Psi e distância do coletor 30 cm.

Grupo	Concentração (%m/v)	Diâmetro médio (nm)
A	0,01	$199,66 \pm 60,13$
B	0,03	$207,86 \pm 55,82$
C	0,04	$325,90 \pm 136,27$

3.2 Influência da pressão de injeção

Como apontado anteriormente, a literatura propõe que a pressão de injeção é uma das variáveis do processamento que monitora o diâmetro médio das fibras e sua distribuição, em razão da orientação imposta à trajetória do jato, a estabilidade do cone de Taylor formado e, principalmente, pela área de deposição das fibras [36,37]. O efeito da pressão de injeção na morfologia e na distribuição dos diâmetros médios foi investigado a partir da concentração anterior, que reportou os menores valores de diâmetro, 0,01% m/v de PEUAPM. Para avaliar a influência desse parâmetro de processamento, fixou-se uma distância do coletor em 30 cm e variou-se a pressão em 40 Psi e 50 Psi. A Fig. 7 apresenta as fotomicrografias e suas respectivas curvas de distribuição de diâmetro médio para a pressão de injeção de 50 Psi, e na Tab. 4 são reportados os valores de diâmetro aferidos para cada uma das condições.

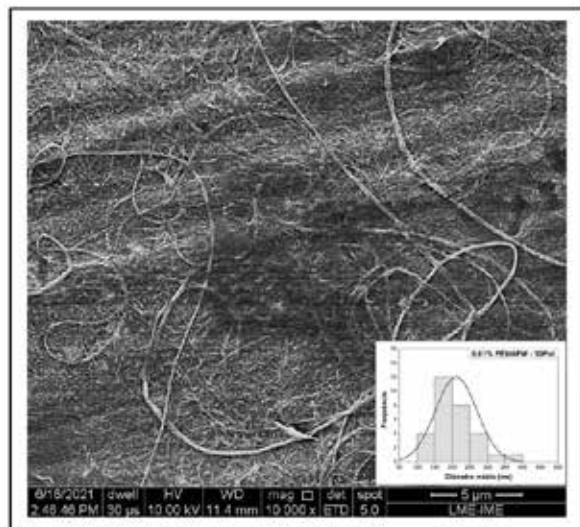


Fig. 7 – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição D. Concentração de 0,01% m/v, pressão de injeção de 50 Psi e distância do coletor fixo de 30 cm.

Tabela 4 – Diâmetros médios obtidos a partir das condições A e D. Concentração 0,01% wt e distância do coletor 30 cm.

Grupo	Concentração (%m/v)	Pressão (Psi)	Diâmetro médio (nm)
A	0,01	40	199,66 ± 60,13
D	0,01	50	211,51 ± 58,77

Para a técnica de SBS, a pressão de injeção de ar deve exceder a tensão superficial da solução polimérica, alongando-a em fibras ultrafinas [38–40]. As fibras obtidas com pressão de injeção de 50 Psi apresentaram aumento de diâmetro médio em 6% quando comparado ao valor de 40 Psi (valor- p $3,86 \times 10^{-01}$). Isso se deve ao fato de altos fluxos de ar gerarem fibras com diâmetros maiores, uma vez que os feixes de fibras são entregues em alta velocidade ao coletor, dificultando a volatilização completa do solvente. Por outro lado, baixos fluxos de ar não produzem fibras ou as produzem com diâmetros menores, visto que a força necessária para romper a tensão superficial da solução precisa ser alcançada. Esse fenômeno foi observado para o PLA, PTFE, PEO, PCLA, Nylon 6, entre outros [38,41-44]. Sendo assim, para pressões de injeção maiores, faz-se necessário o uso de distâncias de deposição maiores entre a ponta da agulha e o coletor, a fim de evitar esse fenômeno.

3.3 Influência da distância do coletor

O efeito da distância do coletor na morfologia e distribuição dos diâmetros médios foi investigado, fixando-se a concentração de 0,01% m/v e a distância do coletor em 15 cm. Confrontaram-se os resultados obtidos com os apresentados na seção anterior. As Fig. 8a e 8b apresentam as fotomicrografias e suas respectivas curvas de distribuição para as pressões de injeção de (a) 40 Psi e (b) 50 Psi, e na Tab. 5 são apresentados os valores de diâmetro aferidos para cada uma das condições.

A distância ótima de trabalho é compreendida no equilíbrio entre a mínima distância necessária para que as fibras sejam coletadas completamente secas, até uma distância máxima na qual não haja uma perda excessiva do material, aumentando assim a produção e formação de fibras com diâmetros menores [45]. A distância de trabalho não evidenciou alteração significativa no diâmetro médio e nem na morfologia obtida para a pressão de injeção de 50 Psi (valor- p $5,87 \times 10^{-01}$), provavelmente devido à velocidade de deposição ser muito alta. Em contrapartida, para a pressão de 40 Psi o diâmetro

médio aumentou em 44%, e consecutivamente a distribuição de tamanho, juntamente com a dispersão das fibras, foram modificadas (valor- p $8,33 \times 10^{-5}$).

Quando a distância de trabalho é muito curta, as fibras não têm a oportunidade adequada para serem alongadas suficientemente e para que ocorra a completa evaporação do solvente, produzindo assim maiores diâmetros e reduzindo a área de deposição e dispersão das fibras [19,46].

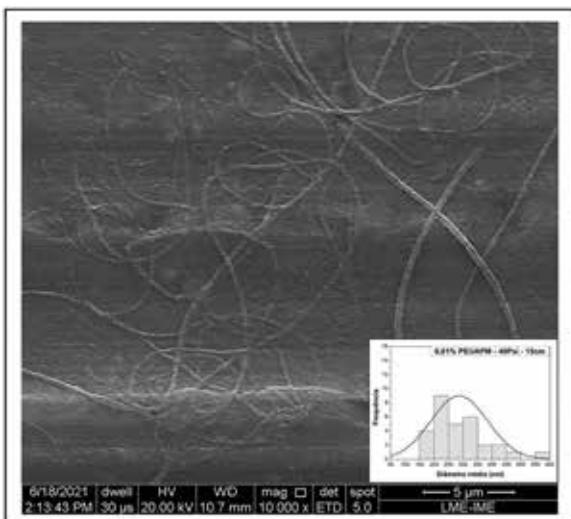


Fig. 8a – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição E. Concentração de 0,01% m/v, pressão de injeção de 40 Psi e distância do coletor fixo 15 cm.

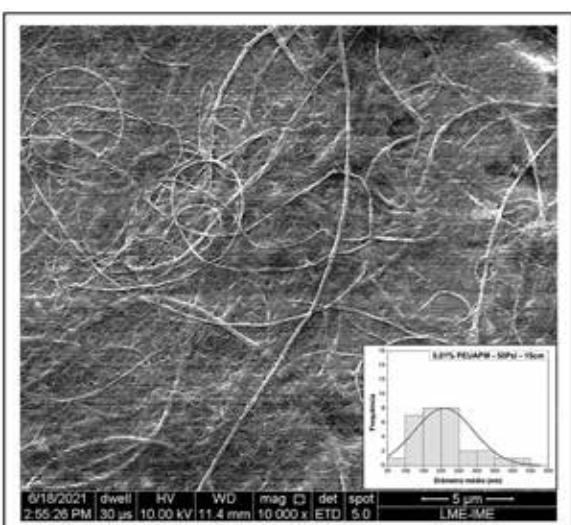


Fig. 8b – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição E. Concentração de 0,01% m/v, pressão de injeção de 50 Psi e distância do coletor fixo 15 cm.

Tabela 5 – Diâmetros médios obtidos a partir das condições E F. Concentração 0,01% m/v e distância do coletor 15 cm.

Grupo	Concentração (%m/v)	Pressão (Psi)	Distância do coletor (cm)	Diâmetro médio (nm)
E	0,01	40	15	287,01 ± 97,74
F	0,01	50	15	208,24 ± 82,46

3.5 Avaliação estatística

A análise estatística não paramétrica de Kruskal Wallis revelou que, para todas as variáveis estudadas (concentração, pressão de ar e distância do coletor) no processamento das nanofibras de PEUAPM, a variável resposta (diâmetro médio) apresenta diferença estatística indicada pelo valor $p = 6,20 \times 10^{-9}$, para o nível de significância de 0,05%. A fim de identificar especificamente quais condições apresentaram diferença, foi empregado o teste de comparações múltiplas de Dunn. Os valores calculados são apresentados na Tabela 6, e as combinações que diferem estatisticamente foram destacadas em cinza.

Tabela 6 – Resultado das comparações múltiplas obtidas pelo teste de Dunn.

Comparações	Valor- p
a-b	$6,65 \times 10^{-01}$
a-c	$3,96 \times 10^{-07}$
a-d	$3,86 \times 10^{-01}$
a-e	$8,33 \times 10^{-05}$
a-f	$7,46 \times 10^{-01}$
b-c	$3,53 \times 10^{-06}$
b-d	$6,65 \times 10^{-01}$
b-e	$4,64 \times 10^{-04}$
b-f	$9,12 \times 10^{-01}$
c-d	$2,63 \times 10^{-05}$
c-e	$2,56 \times 10^{-01}$
c-f	$2,06 \times 10^{-06}$
d-e	$2,16 \times 10^{-03}$
d-f	$5,87 \times 10^{-01}$
e-f	$3,05 \times 10^{-04}$

4. Conclusão

As avaliações dos resultados experimentais obtidos junto às informações contidas na literatura indicam que PEUAPM, quando processado por fiação de solução por sopro, é influenciado pela concentração

da solução, pressão de injeção e distância de trabalho, ocasionando modificação na morfologia e na distribuição de diâmetro médio.

- Para as três concentrações estudadas, a que ofereceu menor diâmetro médio das fibras foi a de 0,01% m/v.
- Quanto à pressão de injeção, os fluxos de ar menores produziram fibras com menores diâmetros, dependendo da distância entre a ponta da agulha e do coletor fixo.
- A distância de trabalho afetou principalmente a dispersão das fibras processadas, não evidenciando alteração para a pressão de 50 Psi.
- A condição de processamento que apresentou o menor diâmetro médio das fibras foi a condição A, com diâmetro médio de $199,66 \pm 60,13$ nm.

As condições de formação de fibras por meio desse método de fiação se dão por agentes físicos, como o tipo

de polímero, a concentração, a pressão de injeção e, portanto, a morfologia e o diâmetro médio das fibras. Por meio de análises estatísticas e experimentais, assim como foram realizadas, é possível se aproximar de uma condição ideal para o sistema PEUAPM/Xileno, certo de que limites de capacidade de fiação serão alcançados, possibilitando assim aumentar a produção e reduzir os efeitos indesejáveis – analisando sempre o efeito dos parâmetros de modo combinado, uma vez que existem interações entre as variáveis experimentais.

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem às agências brasileiras de apoio Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj) pelo financiamento.

Referências

- [1] SOBIERAJ, M. C.; RIMNAC, C. M. Ultra high molecular weight polyethylene: Mechanics, morphology, and clinical behavior. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 2, n. 5, p. 433–443, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2008.12.006>.
- [2] COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros*, v. 13, n. 1, p. 1–13, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005>.
- [3] KURTZ, S. M. *The UHMWPE Handbook*. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [4] BRASKEM. Polietileno de Ultra-Alto Peso Molecular (PEUAPM). Catálogo Prod UTEC 2015.
- [5] AGUIAR, V. O.; PITA, V. J. R. R.; MARQUES, M. F. V. Nanocomposites of ultrahigh molar mass polyethylene and modified carbon nanotubes. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 136, n. 19, p. 47459, 2019. <https://doi.org/10.1002/app.47459>.
- [6] ALVES, A. L. S.; NASCIMENTO, L. F. C.; MIGUEZ SUAREZ, J. C. Comportamento balístico de compósito de polietileno de altíssimo peso molecular: efeito da radiação gama. *Polímeros*, v. 14, n. 2, p. 105–111, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000200014>.
- [7] MARISSEN, R. Design with Ultra Strong Polyethylene Fibers. *Materials Sciences and Applications*, v. 2, n. 5, p. 319–330, 2011. <https://doi.org/10.4236/msa.2011.25042>.
- [8] PEIJS, T.; JACOBS, M. J. N.; LEMSTRA, P. J. High Performance Polyethylene Fibers. In CHOU, T. W.; KELLY, A.; ZWEBEN, C. *Comprehensive composite materials*, 1. Amsterdam: Elsevier, 2000. p. 263–301.
- [9] DUPONT. Polyethylene sheet and articles made therefrom 2021.
- [10] DUPONT. Materiais de alta performance. [2014]. Disponível em: <https://www.dupont.com.br/products/tensylon.html>. Acesso em: 8 set. 2021.
- [11] BHATNAGAR, A.; BRIAN, D. A.; TAN, C. B. C.; WAGNER, L. L. Enhanced ballistic Performance of Polymer Fibers, 2011.
- [12] HONEYWELL. SPECTRA FIBER. Products. 2020. Disponível em: <https://industrial.honeywell.com/us/en/applications/cut-resistant-fibers-and-materials/rope/spectra-fiber>. Acesso em: 8 set. 2021.

- [13] MERCANTE, L. A.; ANDRE, R. S.; MACEDO, J. B.; PAVINATTO, A.; CORREA, D. S. Nanofibras Eletrofiadas e suas Aplicações: Avanços na Última Década. *Química Nova*, v. 44, n. 6, p. 717–36, 2021. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170721>.
- [14] JAYARAMAN, K.; KOTAKI, M.; ZHANG, Y.; MO, X.; RAMAKRISHNA, S. Avanços recentes em nanofibras de polímero. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 12, n. 1-2, p. 52–65, 2004. <https://doi.org/10.1166/jnn.2004.078>.
- [15] STOJANOVSKA, E.; CANBAY, E.; PAMPAL, E. S.; CALISIR, M. D.; AGMA, O.; POLAT, Y. et al. A review on non-electro nanofibre spinning techniques. *RSC Advances*, v. 6, n. 87, p. 83783–83801, 2016. <https://doi.org/10.1039/c6ra16986d>.
- [16] BEACHLEY, V.; WEN, X. Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diameter and length. *Materials Science and Engineering: C*, v. 29, n. 3, p. 663–668, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.10.037>.
- [17] BUTTAFOCO, L.; KOLKMAN, N. G.; ENGBERS-BUIJTENHUIJS, P.; POOT, A. A.; DIJKSTRA, P. J.; VERMES, I. et al. Electrospinning of collagen and elastin for tissue engineering applications. *Biomaterials*, v. 27, n. 5, p. 724–734, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.06.024>.
- [18] MIRJALILI, M.; ZOHORI, S. Review for application of electrospinning and electrospun nanofibers technology in textile industry. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, v. 6, p. 207–213, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40097-016-0189-y>.
- [19] MEDEIROS, E. S.; GLENN, G. M.; KLAMCZYNSKI, A. P.; ORTS, W. J.; MATTOSO, L. H. C. Solution blow spinning: A new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 113, p. 2322–2330, 2009. <https://doi.org/10.1002/app.30275>.
- [20] WENDORFF, J.; AGARWAL, S.; GREINER, A. *Electrospinning. Materials, Processing, and Applications*. Hoboken: Wiley, 2012.
- [21] BHARDWAJ, N.; KUNDU, S. C. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*, v. 28, n. 3, p. 325–347, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>.
- [22] DARISTOTLE, J. L.; BEHRENS, A. M.; SANDLER, A. D.; KOFINAS, P. A Review of the Fundamental Principles and Applications of Solution Blow Spinning. *ACS applied materials & interfaces*, v. 8, n. 51, p. 34951–34963, 2016. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12994>.
- [23] SILVA, T. H.; OLIVEIRA, J. E.; MEDEIROS, E. S.; SILVA, T. H.; OLIVEIRA, J. E.; MEDEIROS, E. S. Obtenção de micro e nanofibras de PVC pela técnica de Fiação por Sopro em Solução. *Polímeros*, v. 25, n. 2, p. 229–235, 2015. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1694>.
- [24] COSTA, R. G. F.; OLIVEIRA, J. E.; PAULA, G. F.; PICCIANI, P. H. S.; MEDEIROS, E. S.; RIBEIRO, C. et al. Eletrofiação de Polímeros em Solução: parte I: fundamentação Teórica. *Polímeros*, v. 22, n. 2, p. 170–177, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000026>.
- [25] OLIVEIRA, J. E.; MEDEIROS, E. S.; CARDOZO, L.; VOLL, F.; MADUREIRA, E. H.; MATTOSO, L. H. C et al. Development of poly(lactic acid) nanostructured membranes for the controlled delivery of progesterone to livestock animals. *Materials Science and Engineering: C*, v. 33, n. 2, p. 844–849, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.10.032>.
- [26] OLIVEIRA, J. E.; MORAES, E. A.; MARCONCINI, J. M.; C. Mattoso LH, Glenn GM, Medeiros ES. Properties of poly(lactic acid) and poly(ethylene oxide) solvent polymer mixtures and nanofibers made by solution blow spinning. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 129, n. 6, p. 3672–3681. <https://doi.org/10.1002/app.39061>.
- [27] CARRIZALES, C.; PELFREY, S.; RINCON, R.; EUBANKS, T. M.; KUANG, A.; MCCLURE, M. J. et al. Thermal and mechanical properties of electrospun PMMA, PVC, Nylon 6, and Nylon 6,6. *Polym Adv Technol* v. 19, n. 2, p. 124–130, 2008. <https://doi.org/10.1002/pat.981>.
- [28] MITSUI CHEMICALS. Partícula fina de polietileno de ultra alto peso molecular MIPELON™ 2016. Disponível em: https://www.mitsuichemicalsbrasil.com/mipelon_prop.htm. Acesso em: 5 nov. 2018.
- [29] TUTAK, W.; SARKAR, S.; LIN-GIBSON, S.; FAROOQUE, T. M.; JYOTSNENDU, G.; WANG, D. et al. The support of bone marrow stromal cell differentiation by airbrushed nanofiber scaffolds. *Biomaterials*, v. 34, n. 10, p. 2389–2398. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.12.020>.
- [30] LI, J.; LUO, K.; YU, J.; WANG, Y.; ZHU, J.; HU, Z. Promising Free-Standing Polyimide Membrane via Solution Blow Spinning for High Performance Lithium-Ion Batteries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 57, n. 36, p. 12296–12305, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02755>.

- [31] REIN, D. M.; COHEN, Y.; LIPP, J.; ZUSSMAN, E. Elaboration of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene/Carbon Nanotubes Electrospun Composite Fibers. *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 295, n. 11, p. 1003–1008, 2010. <https://doi.org/10.1002/mame.201000157>.
- [32] REIN, D. M.; SHAVIT-HADAR, L.; KHALFIN, R. L.; COHEN, Y.; SHUSTER, K.; ZUSSMAN, E. Electrospinning of ultrahigh-molecular-weight polyethylene nanofibers. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, v. 45, n. 7, p. 766–773, 2007. <https://doi.org/10.1002/polb.21122>.
- [33] REIN, D. M.; COHEN, Y.; RONEN, A.; SHUSTER, K.; ZUSSMAN, E. Application of gentle annular gas veil for electrospinning of polymer solutions and melts. *Polymer Engineering & Science*, v. 49, n. 4, p. 774–782, 2009. <https://doi.org/10.1002/pen.21273>.
- [34] CUI, W.; LI, X.; ZHOU, S.; WENG, J. Investigation on process parameters of electrospinning system through orthogonal experimental design. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 103, n. 5, p. 3105–3112, 2007. <https://doi.org/10.1002/app.25464>.
- [35] PATRA, S. N.; EASTEAL, A. J.; BHATTACHARYYA, D. Parametric study of manufacturing poly(lactic) acid nanofibrous mat by electrospinning. *Journal of Materials Science*, v. 44, p. 647–654, 2009. <https://doi.org/10.1007/S10853-008-3050-Y>.
- [36] ZONG, X.; KIM, K.; FANG, D.; RAN, S.; HSIAO, B. S.; CHU, B. Structure and process relationship of electrospun bioabsorbable nanofiber membranes. *Polymer (Guildf)*, v. 43, n. 16, p. 4403–4412, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00275-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00275-6).
- [37] DALTON, P. D.; KLINKHAMMER, K.; SALBER, J.; KLEE, D.; MÖLLER, M. Direct in Vitro Electrospinning with Polymer Melts. *Biomacromolecules*, v. 7, n. 3, p. 686–690, 2006. <https://doi.org/10.1021/BM050777Q>.
- [38] BOLBASOV, E. N.; ANISSIMOV, Y. G.; PUSTOVYTOV, A. V.; KHLUSOV, I. A.; ZAITSEV, A. A.; ZAITSEV, K. V. et al. Ferroelectric polymer scaffolds based on a copolymer of tetrafluoroethylene with vinylidene fluoride: fabrication and properties. *Materials Science and Engineering: C*, v. 40, p. 32–41, 2014. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2014.03.038>.
- [39] ZHUANG, X.; YANG, X.; SHI, L.; CHENG, B.; GUAN, K.; KANG, W. Solution blowing of submicron-scale cellulose fibers. *Carbohydrate polymers*, v. 90, n. 2, p. 982–987, 2012. <https://doi.org/10.1016/J.CARB-POL.2012.06.031>.
- [40] SHI L.; ZHUANG, X. P.; CHENG, B. W.; TAO, X. X.; KANG, W. M. Solution blowing of poly(dimethylsiloxane)/nylon 6 nanofiber mats for protective applications. *Chinese Journal of Polymer Science*, v. 32, p. 786–792. <https://doi.org/10.1007/s10118-014-1452-7>.
- [41] ABDAL-HAY, A.; SHEIKH, F. A.; LIM, J. K. Air jet spinning of hydroxyapatite/poly(lactic acid) hybrid nanocomposite membrane mats for bone tissue engineering. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, v. 102, p. 635–643, 2013. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFB.2012.09.017>.
- [42] THOMPSON, C. J.; CHASE, G. G.; YARIN, A. L.; RENEKER, D. H. Effects of parameters on nanofiber diameter determined from electrospinning model. *Polymer*, v. 48, n. 23, p. 6913–6922, 2007. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2007.09.017>.
- [43] LOU, H.; LI, W.; LI, C.; WANG, X. Systematic investigation on parameters of solution blown micro/nanofibers using response surface methodology based on box-Behnken design. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 130, n. 2, p. 1383–1391, 2013. <https://doi.org/10.1002/app.39317>.
- [44] ZARGHAM, S.; BAZGIR, S.; TAVAKOLI, A.; RASHIDI, A. S.; DAMERCHELY, R. The Effect of Flow Rate on Morphology and Deposition Area of Electrospun Nylon 6 Nanofiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, v. 7, n. 4, p. 42–49, 2012. <https://doi.org/10.1177/155892501200700414>.
- [45] LI, J.; SONG, G.; YU, J.; WANG, Y.; ZHU, J.; HU, Z. Preparation of Solution Blown Polyamic Acid Nanofibers and Their Imidization into Polyimide Nanofiber Mats. *Nanomaterials*, v. 7, n. 11, p. 395, 2017. <https://doi.org/10.3390/NANO7110395>.
- [46] OLIVEIRA, J. E.; MATTOSO, L. H. C.; ORTS, W. J.; MEDEIROS, E. S. Structural and Morphological Characterization of Micro and Nanofibers Produced by Electrospinning and Solution Blow Spinning: A Comparative Study. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2013, p. 1–14, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/409572>.

Detecção de Ataques Cibernéticos utilizando Aprendizado de Máquina: uma revisão

Ricardo da Silveira Lopes*, Julio Cesar Duarte e Ronaldo Ribeiro Goldschmidt

Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça Gen. Tibúrcio, 80 – Urca, Rio de Janeiro – RJ, 22290-270

*ricardo.lopes@ime.eb.br

RESUMO: Com a disponibilização pública de bases de dados simuladas de detecção de intrusão, o Aprendizado de Máquina vem sendo empregado, cada vez mais, em estudos de detecção de ataques cibernéticos. Se, por um lado, tem-se destacado o desempenho (precisão e abrangência) obtido, por outro, tem havido uma carência na análise crítica sobre o que de fato foi aprendido pelo modelo, visando concluir se haverá ou não a manutenção desse desempenho em aplicações reais. Nesse sentido, técnicas de explicabilidade surgem como uma possibilidade promissora na execução dessa tarefa, uma vez que, usualmente, vem sendo negligenciada a análise da Taxa de Falso Positivo desses modelos, o que pode se tornar um problema importante, com o aumento da velocidade e quantidade de dados trafegados pela internet. Esta pesquisa se propõe a levantar discussões sobre esses problemas, apresentando alguns artigos a eles relacionados.

PALAVRAS-CHAVE: Detecção de Intrusão. Aprendizado de Máquina. Explicabilidade. Taxa de Falso Positivo.

ABSTRACT: With the public availability of simulated intrusion detection datasets, Machine Learning has been increasingly used in cyber attack detection work. Despite the fact that the performance (precision and recall) has been highlighted, on the other hand, there has been a lack of critical analysis of what was actually learned by the model, with the intention to conclude whether or not this performance will be maintained in real applications. In this sense, explainability techniques appear as a promising possibility in the execution of this task, since the analysis of the False Positive Rate of these models has usually been neglected. This can become an important problem, with the increase in speed and amount of data transmitted over the internet. This research proposes to raise discussions about these problems, presenting some articles related to them.

KEYWORDS: Intrusion Detection. Machine Learning. Explainability. XAI. False Positive Rate.

1. Introdução

O surgimento da internet revolucionou a vida moderna, possibilitando a realização de inúmeras atividades de forma online. Compras, transações bancárias, reuniões, aulas, cursos, interações via redes sociais, comunicação por texto, voz e vídeo, gerenciamento remoto etc., tornaram-se atividades cotidianas na sociedade [1]. Por outro lado, o aumento da utilização da informática e de ferramentas online trouxe consigo vulnerabilidades amplamente exploradas por indivíduos e organizações mal-intencionadas por meio de ações maliciosas no ciberespaço. Essas ações são conhecidas por ataques cibernéticos ou intrusões e causam considerável prejuízo a usuários e empresas que inevitavelmente utilizam a Internet. Normalmente, esses ataques possuem finalidades diversas, como, por exemplo, obter benefícios financeiros de forma ilícita, prejudicar instituições, propagar ideologias e até mesmo terrorismo [2].

Dessa forma, o ataque cibernético tem sido um problema cada vez maior conforme a sociedade vai se tornando mais dependente da tecnologia da informação. Dois fatores são responsáveis por esse problema: a existência de vulnerabilidades nos sistemas de informação e a presença de agentes com potencial para explorar tais vulnerabilidades. Esses agentes podem ser indivíduos, grupos e até mesmo nações.

Além disso, é inevitável a crescente inserção de computadores e redes de dados nos processos de gerenciamento, monitoração, automação e controle de infraestruturas críticas, tais como usinas de geração de energia, sistemas de transporte, estações de captação, armazenamento e distribuição de água, serviços de emergência etc. Nesse sentido, o problema pode se agravar consideravelmente nos casos relacionados a esse tipo de infraestrutura e, dependendo das vulnerabilidades nelas existentes e da criticidade do ataque, tal prejuízo pode ser catastrófico. Um exemplo disso ocorreu recentemente na Flórida, Estados Unidos,

onde um *hacker* obteve acesso ao sistema de tratamento de água, aumentando a proporção de soda cáustica e expondo a população local ao risco de contaminação química [3]. Felizmente, um funcionário local percebeu o ocorrido e reverteu a ação em tempo oportuno.

Dessa maneira, a detecção de ataque cibernético tem assumido um papel protagonista em assuntos relacionados à prevenção e mitigação de ameaças no campo da tecnologia da informação.

2. Detecção de ataque

Ataques cibernéticos são manobras ofensivas e maliciosas direcionadas a sistemas de informação, infraestruturas computacionais, redes de dados e equipamentos computacionais pessoais. Possuem o objetivo de expor, alterar, desabilitar, destruir, roubar ou obter acesso não autorizado a dados ou recursos computacionais [4]. Dessa forma, um ataque cibernético compromete pelo menos um dos três aspectos da segurança da informação: confidencialidade, integridade ou disponibilidade [5].

A detecção do ataque é uma tarefa desempenhada por um Sistema de Detecção de Intrusão (IDS, do inglês *Intrusion Detection System*) – neste contexto, os termos ataque e intrusão serão utilizados indistintamente. Essa detecção ocorre por meio da monitoração de eventos que ocorrem em um sistema de computador ou rede de dados. Esses eventos são então analisados no intuito de encontrar sinais de possíveis incidentes, representando violações ou iminente ameaça de violação de políticas de segurança [6]. Conforme ilustrado na **Figura 1**, existem dois métodos de detecção básicos:

- Detecção baseada em assinatura: detecção de traços, denominados de assinatura, que identificam de forma única um determinado ataque. Esses traços são armazenados em um banco de dados que precisa ser constantemente atualizado, conforme novos tipos de ataques surgem.
- Detecção baseada em anomalia: detecção de padrões que estão fora daqueles considerados normais ou aceitáveis. Esse comportamento normal pode ser definido por um especialista de segurança em redes de dados ou pode ser aprendido por alguma técnica de Aprendizado de Máquina (AM).

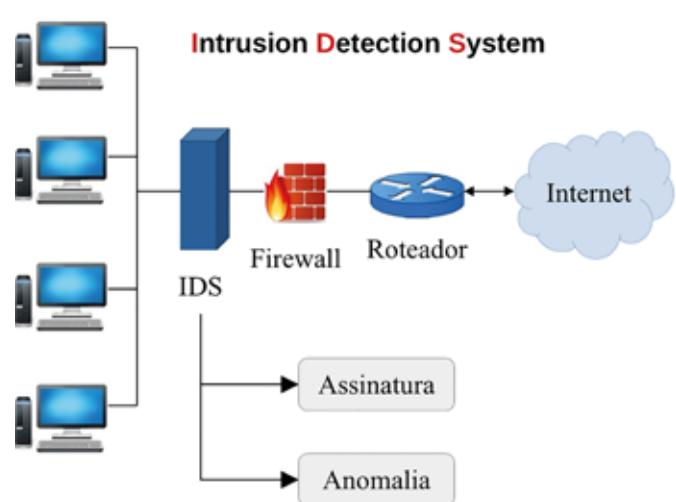


Fig. 1 – Exemplo de utilização de IDS. **Fonte:** Adaptado de [7].

O esquema na **Figura 1** mostra um IDS composto por apenas um equipamento em um local específico da rede, normalmente entre o *firewall* e a rede local a ser protegida. A vantagem desse esquema é que ele diminui consideravelmente a quantidade de dados maliciosos a ser analisada pelo IDS, uma vez que grande parte do tráfego considerado inapropriado é barrado no *firewall*. Além disso, instituições de maior porte costumam possuir uma rede local bastante extensa, muitas vezes composta por inúmeras sub-redes. Nesse caso, a implantação do IDS é mais complexa, exigindo a instalação de outros componentes, tais como:

- Sensores: equipamentos conectados em diferentes pontos da rede, para coletar dados, por exemplo, pacotes IP;
- Agentes: software com funções similares aos sensores, porém instalados em *hosts*. Dessa maneira, agentes monitoram computadores, podendo coletar outros dados além dos específicos de rede, por exemplo, acessos ao sistema de arquivo;
- Servidor de gerenciamento: responsável por receber, processar e correlacionar os dados enviados pelos sensores e agentes. Normalmente é neste equipamento onde é gerado o alerta de intrusão;
- Servidor de banco de dados: responsável por armazenar os dados coletados pelos agentes e sensores;
- Console: responsável por fornecer uma interface para os usuários e administradores do IDS.

Normalmente, o gerenciamento e os dados trocados entre esses equipamentos ocorrem em uma rede independente, o que proporciona maior proteção contra ataques dirigidos a um IDS. Essa rede independente pode ser, idealmente, uma segunda rede física, proporcionando mais segurança, porém, possui um custo de instalação maior. Uma alternativa é usar uma VLAN (do inglês *Virtual Local Area Network*) que compartilha a mesma rede física, ou ainda trafegar dados de gerenciamento sem o uso da VLAN, porém, com criptografia. Ambas as alternativas possuem um custo de instalação menor, embora aumentem o consumo de banda da rede de dados principal, além de reduzirem também a segurança dos equipamentos que compõem o IDS.

Independentemente do tamanho da rede e da quantidade de sensores e agentes, na prática, utilizam-se IDSs baseados em assinatura e anomalia em conjunto, visto que um tipo complementa o outro. Isso porque um IDS baseado em assinatura possui a vantagem de ter baixa Taxa de Falso Positivo (TFP), embora seja ineficiente na detecção de novos tipos de ataques. Essa ineficiência mantém-se mesmo quando esses novos ataques são apenas pequenas variações daqueles já catalogados. No caso de um IDS baseado em anomalias, ocorre o contrário: ele possui a vantagem de detectar novos ataques, porém, com uma tendência de maior TFP. Isso ocorre pois é difícil modelar precisamente o comportamento normal da rede, que pode variar consideravelmente dependendo do seu tamanho e da sua complexidade. Além disso, esse comportamento normal pode evoluir com o tempo, necessitando de revisões e atualizações do modelo que o representa.

Em resumo, o ideal é que o IDS forneça uma alta abrangência (também conhecida por sensibilidade, *recall*, Taxa de Verdadeiro Positivo (TVP) ou taxa de detecção), com uma baixa TFP. Essa característica é altamente desejável, sendo representada pela maior área possível abaixo da curva ROC (do inglês *Receiver Operating Characteristic*). Essa curva foi desenvolvida por operadores militares de radar, mostrando a relação de compromisso das características de TFP e abrangência do receptor do radar, o que explica sua

nomenclatura. A **Figura 2** caracteriza as curvas ROC de três classificadores diferentes. Pontos distintos pertencentes a uma mesma curva significam limiares de decisão distintos para um mesmo classificador. Note que os melhores classificadores conseguem obter uma maior abrangência com baixa TFP e que isso resulta numa maior área sob a curva ROC. Além disso, a menor área ocorre quando o classificador é puramente aleatório. Nesse caso, onde a área é igual a 0,5, o classificador possui sempre a mesma probabilidade de detecção, independentemente da amostra a ser classificada.

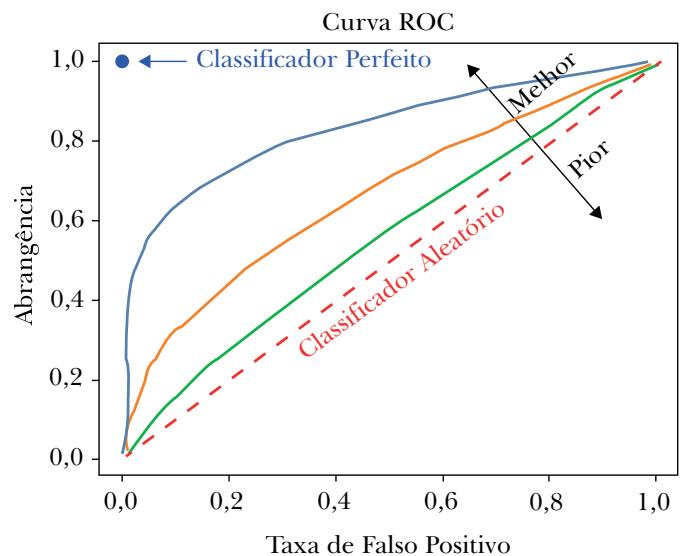


Fig. 2 – Exemplos de curva ROC. **Fonte:** Adaptado de [8].

3. Aprendizado de Máquina

O AM é um campo da Inteligência Artificial que está fortemente relacionado à estatística computacional, focando na atividade de predição por meio de métodos computacionais de otimização [9], o que possibilita a execução de tarefas de classificação ou regressão pelo computador. Classificar significa determinar a qual classe uma determinada amostra pertence. Como existe uma quantidade finita de classes, estas podem ser representadas por valores discretos. Um exemplo seria classificar e-mails em *spam* ou não-*spam*. Já na tarefa de regressão, a amostra é relacionada a um valor contínuo, como, por exemplo, previsão de valores de imóveis.

Tais amostras são representadas por suas características importantes, também chamadas de atributos. No caso de uma classificação em *spam*, por exemplo, cada e-mail é considerado uma amostra. Um possível atributo pode ser o número de vezes que determinada palavra, ou composição de palavras, aparece no e-mail. Exemplos de tais palavras são: incrível, satisfação, agora, bônus, ganhar, oferta, desconto etc. Já no caso dos imóveis, alguns exemplos de atributos são a área, o número de quartos, a localização e a idade.

Dessa maneira, algoritmos computacionais “aprendem”, de forma induativa, relações entre atributos existentes em uma base de dados [10]. As duas principais formas de aprendizado são: supervisionada e não supervisionada. No primeiro caso, são fornecidos exemplos, compostos por atributos e respostas, para que o modelo aprenda, de forma induativa e aproximada, a função alvo. Essa função representa o mapeamento entre os atributos e as respostas (também conhecidas por atributo alvo ou rótulos), sendo normalmente complexa e desconhecida [11]. Classificação de e-mails em *spam* e predição de valores de imóveis são tarefas supervisionadas, uma vez que os valores-alvo (*spam*, não-*spam* e preço do imóvel) são fornecidos. Já no aprendizado não supervisionado, não há o fornecimento de rótulos ao algoritmo. Nesse caso, o objetivo do modelo é aprender, por si só, alguma estrutura inerente à base de dados [11]. Por exemplo, existem técnicas de agrupamento de amostras baseadas em métricas de similaridade, conhecidas por clusterização. Técnicas de projeção, como Análise de Componentes Principais (PCA, do inglês *Principal Component Analysis*), também pertencem a essa categoria. Tais técnicas objetivam o agrupamento e a redução da dimensionalidade dos dados, dois pilares do aprendizado não supervisionado [12].

Para uma efetiva aplicação de AM, a base de dados é dividida em três conjuntos: treinamento, validação e teste. No conjunto de treinamento, algoritmos computacionais são aplicados de forma iterativa, com o objetivo de minimizar uma função conhecida por custo. Essa função indica se os valores preditos a partir dos atributos estão, em média, próximos

daqueles contidos nos rótulos [11]. Quanto menor o valor da função custo, maior será essa proximidade. Uma técnica bastante utilizada nessa minimização é o gradiente descendente, que ajusta os parâmetros do modelo de forma automática, com base no gradiente da função custo em relação a esses parâmetros.

O conjunto de teste é utilizado para verificar o desempenho do modelo em exemplos diferentes do conjunto de treino, indicando se a relação entre atributos e rótulos foi aprendida de forma adequada. Nesse caso ideal, o modelo consegue generalizar bem essa relação, sendo capaz de desconsiderar possíveis ruídos inerentes ao conjunto de treinamento.

Quando não ocorre essa situação ideal, é provável que o modelo esteja com um alto viés ou superajuste. Embora ambos degradem o desempenho no conjunto de teste, suas causas são bastante distintas. Alto viés ocorre quando o modelo é muito simples, incapaz de aproximar a função alvo, independentemente de qualquer ajuste em seus parâmetros. Tal problema é verificado quando o desempenho é baixo tanto no conjunto de treino quanto no de teste. Para resolvê-lo, é necessário substituir o modelo por outro mais complexo, podendo ser também necessário obter uma quantidade maior de atributos. Por outro lado, o superajuste ocorre quando o modelo é capaz de aproximar funções mais complexas que a própria função alvo [13]. Consequentemente, o modelo acaba gerando uma função que se ajusta demasiadamente ao conjunto treino, influenciada por ruídos e imperfeições, que não generalizam a função alvo adequadamente [10, 14]. Esse problema é verificado quando há um desempenho consideravelmente superior no conjunto de treino em comparação ao conjunto de teste. O superajuste pode ser reduzido com a obtenção de uma quantidade maior de exemplos de treinamento, ou, ainda, por técnicas de regularização.

Além dos parâmetros do modelo, que são ajustados de forma automática por algoritmos de otimização, existem outros que precisam ser ajustados de forma manual e empírica, denominados de hiperparâmetros. Alguns exemplos de hiperparâmetros são: profundidade da árvore de decisão, número de neurônios e camadas da rede neural, taxa de

aprendizado, taxa de regularização etc. A principal função do conjunto de validação é auxiliar no ajuste dos hiperparâmetros [15]. Estes recebem diferentes valores, que são utilizados para treinar o modelo no conjunto de treino, e, então, validados no conjunto de validação, onde são selecionados os hiperparâmetros que obtiveram o melhor desempenho. Tal procedimento pode ser realizado por meio de uma Busca em Grade (*grid search*).

Uma aplicação de AM que vem ganhando espaço no meio acadêmico é a detecção e classificação de ataques cibernéticos. Isso se deve principalmente à disponibilização de bases de dados públicas, conforme apresentado na seção 4.

4. Base de dados com tráfego anômalo

Bases de dados são essenciais para o AM, pois contêm a informação a ser aprendida de forma indutiva pelo modelo. Entretanto, existe uma grande ausência de bases de dados com qualidade, obtidas por coleta de tráfego real. Uma razão para isso é que empresas podem acabar expondo alguma vulnerabilidade ou informação sensível ao disponibilizar dados para pesquisa sobre uma eventual invasão sofrida. Outra razão se dá por ser complicado obter os rótulos de tráfegos reais. Um *hacker* provavelmente não teria a boa vontade de informar à vítima qual foi a classe do ataque empregado. Na verdade, ele sequer vai informar que fez um ataque. Uma alternativa é obter os rótulos por meio de um IDS de assinatura; entretanto, ataques desconhecidos (ainda sem assinatura) seriam rotulados como tráfego normal, influenciando negativamente o aprendizado do algoritmo.

Dessa forma, não é por acaso que praticamente todas as bases de dados públicas de ciberataque foram criadas por meio de simulação. Um fator importante a ser considerado nessas bases é o nível de semelhança em relação a uma situação real. Provavelmente, um IDS com alto desempenho em uma base não realista poderá não funcionar adequadamente em um emprego real.

Outro aspecto relevante se refere aos exemplos constantes nessas bases. Eles podem ser fornecidos em dados brutos (na forma de pacotes IP), ou em

dados processados (na forma de tráfego ou fluxo de rede). No primeiro caso, cada pacote IP representa um exemplo da base de dados. Alguns atributos são comuns a todos os pacotes, como, por exemplo, tamanho do cabeçalho, tamanho total do pacote, protocolo, endereço IP de origem e destino. Outros atributos são específicos do protocolo (TCP, UDP etc.) como, por exemplo, portas de origem e destino, que não existem em todos os protocolos. Esses pacotes podem ser capturados e armazenados no formato pcap, por meio de aplicações específicas. Algumas aplicações populares são o TCPDump, o Wireshark, o Snort e o Nmap [16].

Já na forma de fluxo de rede, esses pacotes IPs são processados e formatados de maneira que cada exemplo da base de dados consista em informações que definem uma sequência uni ou bidirecional de pacotes que compartilham os seguintes atributos: endereço IP de origem, endereço IP de destino, protocolo, porta de origem e porta de destino [16]. Conexões TCP são um exemplo de fluxo de dados bidirecional. Além disso, outros dados estatísticos podem se somar a esses atributos, como, por exemplo, quantidade de bytes emitidos pela origem, quantidade de bytes emitidos pelo destino, tempo médio entre pacotes, taxa de pacotes etc. Em comparação com bases de dados na forma de pacotes IP, bases de dados de fluxo de rede possuem um tamanho menor, pois desconsideram informações no *payload* dos pacotes.

A partir do ano de 1998, começaram a ser disponibilizadas bases de dados de intrusão, o que possibilitou a introdução de técnicas de AM no campo da segurança cibernética. Essas bases foram geradas por meio de simulação de tráfegos maliciosos e benignos. Algumas delas também incluíram tráfego de fundo, ou seja, tráfegos reais e anonimizados, os quais não se sabe precisamente se são benignos ou malignos. Em alguns casos, também são fornecidas as classes do tráfego maligno. As principais bases públicas disponíveis são:

- DARPA 1998/1999 [17]: *Defense Advanced Research Projects Agency* DARPA 1998 e DARPA 1999, criadas pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), sendo amplamente utilizadas

e discutidas em diversos artigos. A primeira foi obtida em uma simulação que durou nove semanas. As primeiras sete semanas deram origem ao conjunto de treinamento, e as duas últimas, ao conjunto de teste. Os atributos dessa base são fornecidos na forma de dados brutos, ou seja, pacotes IP. Um ano após, houve a disponibilidade de uma segunda base, intitulada de DARPA 1999. Ela foi gerada por uma simulação de cinco semanas, sendo as três primeiras de treinamento e as duas últimas para teste. Essa base possui uma quantidade significativamente maior de tipos de ataques em relação à primeira. Os atributos dessa base também são fornecidos por meio de pacotes IP.

- KDD Cup 1999 [18]: utilizada em uma competição de classificação de ataques cibernéticos, essa base possui 41 atributos orientados a fluxo de rede (NetFlow), sendo derivada da DARPA 1998. A base KDD Cup 1999, entretanto, possui sérias limitações [16] como, por exemplo, alta redundância de amostras e imprecisões derivadas de perda de pacotes durante sua criação, causada por excesso de tráfego de dados. Além disso, a grande maioria dos exemplos, tanto no conjunto de treino, como no conjunto de teste, era de fácil classificação, não exigindo modelos muito complexos [19].
- NSL-KDD [20]: foi construída em 2009 por uma amostragem cuidadosa da base KDD 1999, onde foram eliminadas as redundâncias e reduzido o número de exemplos fáceis. Dessa forma, altas acuráciais não eram mais possíveis de serem obtidas com modelos demasiadamente simples. Os principais ataques simulados nessa base são DoS (Negação de Serviço), acesso não autorizado de administrador (U2R – *User to Root*), acesso a um *host* da rede local por uma máquina remota não autorizada (R2L – *Remote to Local*) e varredura de informações de recursos da rede (*Probe* ou *Scan*).
- CTU-13 [21]: foi criada em 2011 pela Universidade de CTU, República Tcheca. O termo 13 advém dessa base possuir treze diferentes cenários onde ocorrem ataques de *Botnet*. Tais cenários variam bastante em nível de dificuldade de detecção de ataque. Os dados dessa base são fornecidos em dados brutos (pacotes IP) e dados processados (padrão NetFlow, WebLogs e outros). Delplace, Hermoso e Anandita [22] utilizaram essa base para verificar o desempenho de vários modelos de AM, além de analisar a importância relativa de cada atributo.
- CIC-IDS [23]: são bases públicas disponibilizadas pelo Instituto Canadense de Cibersegurança, localizado na Universidade de New Brunswick. Existem três: uma lançada em 2012, uma, em 2017, e outra, mais recente, em 2018. As duas últimas contêm tráfego benigno e ataques mais atuais. Os dados estão disponíveis na forma bruta (pcap) e na forma de fluxo de rede, através do processamento dos dados brutos por uma ferramenta própria desse Instituto, chamada de CICflowMeter. Essa ferramenta caracteriza o fluxo de rede através de seis atributos: *time stamp*, endereço IP de origem e destino, porta de origem e destino e protocolo. Uma característica interessante nessa base foi o método para gerar o tráfego benigno, que imita o comportamento de interações humanas, portanto sendo mais parecido com o tráfego real.
- AWID [24]: é um projeto da Universidade de Aegean, localizada na Grécia, onde são disponibilizadas duas bases de dados públicas rotuladas (AWID2 e AWID3), extraídas de tráfego Wi-Fi. Elas possibilitam desenvolver e analisar IDSs específicos para o ambiente sem fio, que apresenta vulnerabilidades diferentes do cabeado. A AWID2, disponibilizada em 2015, é considerada a primeira base pública de redes sem fio [25], e possui três categorias de ataque: injeção, negação de serviço e personificação, além de tráfego normal. Esses ataques foram projetados para explorar vulnerabilidades existentes no ambiente de autenticação, que utiliza WEP (*Wired Equivalent Protection*), WPA e WPA2 (*Wi-Fi Protected Access*). Já a AWID3, lançada em 2021, utilizou um ambiente de autenticação mais moderno, denominado EAP (do inglês *Extensible Authentication Protocol*), possibilitando o estudo de ataques projetados para explorar vulnerabilidades nesse novo ambiente. Também foram incluídos ataques multicamadas, que exploram vulnerabilidades da camada de link (802.11) e das camadas superiores.

- UNSW-NB15 [26]: é uma base pública de ataques cibernéticos lançada em 2015, disponível nos formatos pcap, BRO, Argus e csv. Os exemplos dessa base foram criados por meio de uma ferramenta intitulada IXIA *Perfect Storm*, pertencente ao Centro Australiano de Cibersegurança (ACCS, do inglês *Australian Center for Cyber Security*). Essa base possui nove tipos de ataque, disponibilizados na forma de 49 atributos, além do rótulo da classe. Está disponível na versão completa com um total de 2.540.044 exemplos, e, na versão reduzida, com os conjuntos de treino e de teste possuindo 175.341 e 82.332 exemplos, respectivamente.
- IoT-23 [27]: é uma base que contém tráfego capturado de 2018 a 2019, e foi publicada em janeiro de 2020, na Universidade de CTU, República Tcheca, sendo financiada pela empresa de antivírus Avast. O termo 23 advém dessa base possuir 23 diferentes cenários onde ocorrem ataques relacionados a equipamentos do tipo IoT (do inglês *Internet of Things*). É uma base rotulada, disponibilizada na forma de arquivos pcap e na forma de tráfego de dados, obtidos por meio do software Zeek. Possui oito tipos de ataques, além do tráfego benigno, que foi gerado por três equipamentos IoT sabidamente não infectados.
- USB-IDS-1 [28]: é uma base disponibilizada em 2021, pela Universidade de Sannio, Benevento (USB), Itália, constituída por uma variedade de ataques DoS (Hulk, TCPFlood, Slowloris e Slowhttptest) executados contra um servidor de páginas. Ela pode ser obtida por meio de dados brutos (formato pcap) ou de tráfego de dados (formato csv), este último gerado pela mesma ferramenta utilizada nas bases CIC-IDS: CICFlowMeter. Por esse motivo, os exemplos existentes na USB-IDS-1 possuem os mesmos atributos daquelas bases, permitindo testar a capacidade de generalização de modelos de AM em bases distintas. Um fato inovador na base USB-IDS-1 foi a inclusão de ferramentas e configurações defensivas no servidor de páginas, o que é muito comum em aplicações reais. Tais ferramentas alteram o perfil do tráfego, podendo diminuir a eficácia de algoritmos treinados em outros ambientes. Além disso, os autores mostraram que

essas ferramentas não garantem uma perfeita mitigação dos ataques, o que reforça a necessidade da utilização de IDS.

5. Explicabilidade

Recentemente, métodos que utilizam aprendizado profundo, como, por exemplo, redes convolucionais e recorrentes, vêm obtendo expressiva acurácia em tarefas de classificação de imagem e processamento de linguagem natural. Essa evolução foi aproveitada na área de detecção de intrusão, possibilitando uma elevada acurácia na detecção de ciberataques, com reduzida TFP [29]. Por outro lado, tais modelos são pouco transparentes, o que tem aumentado a importância no desenvolvimento de métodos que explicam de forma razoável as razões por trás das decisões tomadas por esses modelos. Entretanto, a grande maioria dos artigos nessa área ainda se preocupa exclusivamente com a obtenção de elevada acurácia, altas taxas de detecção e baixas TFPs, sem levar em consideração o entendimento dos mecanismos que levaram o modelo a realizar determinada classificação. Com o surgimento de bases de dados públicas, houve uma tendência a uma certa competição entre os autores de artigos dessa área. É muito comum encontrar frases do tipo: “O nosso método obteve uma acurácia superior, com uma menor taxa de falso positivo”. Também é muito comum, nesses artigos, a exibição de uma tabela listando o desempenho de vários outros métodos, extraídos de outros trabalhos, normalmente com desempenho inferior ao proposto.

Essa busca por um alto desempenho resultou em um aumento considerável na complexidade dos modelos, o que tornou praticamente impossível entender o mecanismo por trás da decisão desses algoritmos nas tarefas de detecção de intrusão. Isso não significa a inexistência de conhecimento a respeito de como o algoritmo realiza a classificação. Por exemplo, em redes MLP (do inglês *Multi Layer Perceptron*), também conhecidas por redes neurais, por mais profundas e complexas que sejam, as decisões do algoritmo continuam a ser geradas por uma intrincada combinação ponderada de funções camada a camada. O termo

“ponderada” se refere aos pesos que multiplicam os atributos e os valores de cada neurônio. Esses pesos são ajustados de forma automática, normalmente pela técnica do gradiente descendente ou alguma variação dela, de maneira a minimizar a diferença entre a classe predita e o rótulo a que de fato pertence cada exemplo da base de dados. O problema é que isso, por si só, não esclarece quais atributos e quais relações entre esses atributos levaram a uma determinada classificação. Para o algoritmo, o que importa é minimizar o erro, independentemente de qualquer racionalidade em relação às características dos exemplos.

Essa falta de transparência nos modelos complexos causa desconfiança especialmente em classificações não óbvias, que possam contrariar a opinião de um humano. Nesse caso, se a decisão do modelo não informa suas razões, fica difícil saber se houve erro ou se o modelo foi capaz de perceber algum detalhe importante que escapou à percepção humana. Esse problema é mais relevante em aplicações com baixa tolerância a falhas, como ocorre na detecção de uma intrusão. Nesse caso, há uma baixa tolerância a falsos negativos, pois nenhuma ação oportuna será tomada para interromper um ataque não detectado, cuja presença só será notada pelas suas consequências. Um modelo “opaco” não permite ao analista saber quando e por que determinados ataques não são detectados. A aplicação em intrusão de redes é bem distinta de, por exemplo, sistemas de recomendação. Nesse caso, não há tanta importância em se saber porque o modelo recomenda determinado produto a um usuário, desde que o algoritmo possua uma elevada acurácia. Esses casos em que o modelo erra, que são minoria, não trazem graves consequências, apenas fazendo com que o usuário desconsidere tais recomendações.

Além disso, o entendimento de decisões corretas tomadas por modelos complexos pode ajudar o especialista a descobrir relações não triviais entre os atributos e os ataques cibernéticos até então desconhecidas. Por outro lado, o entendimento de decisões errôneas possibilita o aperfeiçoamento do modelo. Finalmente, atacantes podem realizar mudanças específicas em seus ataques de maneira a se evadirem da detecção. Assim, o conhecimento do mecanismo de

classificação permite ao especialista realizar adaptações que robusteçam o modelo contra essa vulnerabilidade.

Consequentemente, surgiram novos estudos e novas ferramentas com o intuito de abrir essa caixa-preta e prover um entendimento mais racional dos fatores mais relevantes na tomada de decisão desses modelos. Esses estudos e ferramentas provêm o que se convencionou chamar de explicabilidade do modelo. Dessa forma, os trabalhos mais recentes que tratam sobre detecção de intrusão usando AM começaram a abordar não somente o desempenho do modelo, mas também a sua explicabilidade, permitindo ao analista verificar a razoabilidade das relações entre os atributos abstraídas pelo modelo na atividade de classificação. A **Figura 3** ilustra esse procedimento.

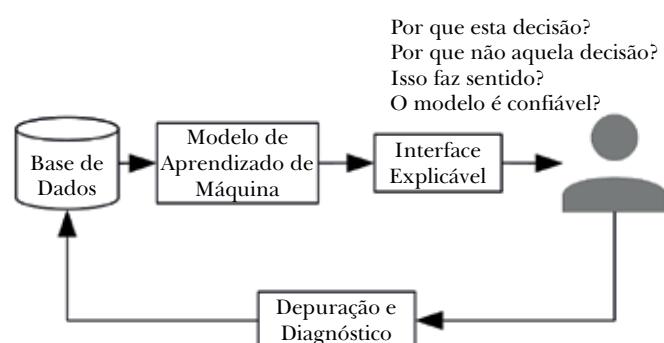


Fig. 3 – Interface explicável. Fonte: Adaptada de [30].

6. Trabalhos em IDS

Devido à importância desse assunto, foram publicados diversos artigos de revisão sobre detecção de intrusão utilizando AM. Alguns, com destacado número de citações [16, 31] sintetizam a maioria dos objetivos de revisão, além de oferecerem um relevante arcabouço teórico e de contribuírem com melhorias na divulgação e análise de resultados. Adicionalmente, Buczak e Guven [16] ressaltaram a variedade de técnicas de AM disponíveis para aplicação em IDS, mostrando como é complexo estabelecer qual delas seria a mais apropriada, levando-se em consideração o tipo de ataque que o sistema deverá detectar. Outra contribuição importante, apresentada por Khraisat *et al.* [31], é o estudo de técnicas de evasão

utilizadas por atacantes, um dos principais desafios à pesquisa de detecção de intrusão. Embora tais aspectos sejam essenciais, esses artigos de revisão não incluem trabalhos de análises por meio da explicabilidade, o que só pode ser encontrado em artigos de revisão de áreas distintas da cibernética. Uma segunda lacuna se refere à inclusão de trabalhos que abordam o potencial que modelos de IDS têm na geração de falsos positivos em aplicações reais. Assim, esta pesquisa procura complementar os artigos de revisão já existentes por meio da inclusão e análise desses dois tópicos. Dessa forma, a subseção 6.1 relaciona os trabalhos que utilizam AM, privilegiando o desempenho do algoritmo, porém, não apresentam uma análise crítica de outros fatores relevantes, como, por exemplo, os impactos relativos à TFP, ou, ainda, a explicabilidade do modelo. Tais fatores foram analisados pelos trabalhos constantes nas subseções 6.2 e 6.3, respectivamente. Finalmente, a subseção 6.4 apresenta um comparativo entre esses trabalhos.

6.1. Trabalhos com foco no desempenho

Buczak e Guven [16] reuniram trabalhos que procuram desenvolver IDS usando detecção por assinatura e por anomalia. Esta última tem despertado um maior interesse da comunidade científica por empregar técnicas clássicas de AM e mineração de dados. Também são de maior interesse os trabalhos que utilizaram bases públicas e que apresentaram alguma informação relativa ao desempenho. Deve ser levado em consideração que, nas bases DARPA e derivadas (à exceção da NSL-KDD), é comum serem obtidos resultados com desempenho muito elevado, fora do contexto de aplicações reais. Isso ocorre devido a uma grande quantidade de registros repetidos, além de uma predominância de ataques de fácil classificação [19]. Por outro lado, Khraisat *et al.* [31] realizaram uma pesquisa mais atual na área de detecção de intrusão, incluindo trabalhos que utilizaram bases mais recentes, em especial a CIC-IDS 2017. Os trabalhos mais relevantes dessas pesquisas constam na **Tabela 1**, sendo brevemente descritos no decorrer da subseção 6.1.

Tab. 1 – Trabalhos citados em artigos de pesquisa.

Artigos de Pesquisa	Trabalhos Relevantes
Buczak e Guven [16]	Fan <i>et al.</i> [32] Hu, Liao e Vemuri [33] Bivens <i>et al.</i> [34] Kruegel <i>et al.</i> [35] Shon e Moon [36] Tajbakhsh, Rahmati e Mirzaei [37] Amor, Benferhat e Elouedi [38]
Khraisat <i>et al.</i> [31]	Chen, Hsu e Shen [39] Adebawale, Idowu e Amarachi [40] Thaseen e Kumar [41] Ustebay, Turgut e Aydin [42]

Fonte: Elaborado pelos autores.

Fan *et al.* [32] usaram uma técnica de aprendizado indutivo de criação de regras intitulado RIPPER (do inglês *Repeated Incremental Pruning to Produce Error Reduction*). Os autores desenvolveram um gerador artificial de anomalias (ataques) para melhorar a habilidade de generalização do classificador. Foi utilizada a base DARPA 1998, obtendo-se uma abrangência de 94%, com uma TFP de 2%. Ainda nessa mesma base, Hu, Liao e Vemuri [33] utilizaram uma variação das máquinas de vetores de suporte, intitulada de RSVM (do inglês *Robust Support Vector Machine*). Essa técnica obtém uma média de hiperplanos discriminantes, suavizando a fronteira de classificação, além de obter o parâmetro de regularização e o classificador de forma automática. Foi obtido um bom desempenho mesmo na presença de ruído (apesar de alguns rótulos da base de treino estarem incorretos): 75% de abrangência sem alarmes falsos, e 100% de abrangência com uma TFP de 3%.

Bivens *et al.* [34] utilizaram SOM (do inglês *Self-Organizing Map*), para aprender o comportamento normal do tráfego, em conjunto com MLP, para classificar intrusões na base DARPA 1999. Os autores procuraram classificar ataques em diferentes categorias e relatam ter obtido 100% de TVN (Taxa de Verdadeiro Negativo) e uma TFP de 76%. Essa informação é um tanto inconsistente, uma vez que uma TVN de 100% implica em uma TFP igual a zero. Na verdade, o que os autores chamam de TFP é a proporção de ataques classificada de forma errônea em um outro tipo de ataque. Nessa mesma base, Kruegel *et al.* [35] utilizaram redes bayesianas, obtendo uma TFP ligeiramente maior que 0,2% e

uma abrangência de 100%. Por outro lado, Shon e Moon [36] utilizaram uma técnica de detecção de anomalias denominada SVM aprimorada (do inglês, *Enhanced SVM*), para detecção de ataques na base DARPA 1999. Essa técnica foi derivada da *One-Class SVM* e da *Soft-Margin SVM*. Para uma aplicação mais realista, o desbalanceamento da base foi aumentado, consistindo-se em 1% a 1,5% de ataques e 98,5% a 99% de tráfego normal. Obteve-se uma taxa de falso negativo (TFN) de 27,27%, com uma TFP de 10,2%. Embora a abrangência não tenha sido diretamente fornecida, é possível derivá-la da TFN, sendo, portanto, 72,73%.

Tajbakhsh, Rahmati e Mirzaei [37] utilizaram Mineração de Regras de Associação Fuzzy para encontrar padrões nos relacionamentos dos atributos da base KDD 1999. O artigo destaca alguns benefícios da técnica, como a criação de regras humanamente interpretáveis; entretanto, obteve uma TFP de 13% a uma abrangência de 100%. Ainda nessa mesma base, Amor, Benferhat e Elouedi [38] utilizaram o algoritmo Naive Bayes (NB), reportando uma abrangência de 89% e uma TVN de 98%. Embora não tenha sido reportada a TFP, pode-se inferir, baseado na TVN, que ela é de 2%.

Chen, Hsu e Shen [39] extraíram dados de chamadas de sistema da base DARPA 1998, codificando-os com o método tf-idf (do inglês *term frequency – inverse document frequency*), para, então, treinar um classificador SVM. Foi obtida uma abrangência de 100% com uma TFP de 8,53%.

Adebawale, Idowu e Amarachi [40] utilizaram SVM, MLP, NB e Árvores de Decisão (DT) para a detecção de intrusão na base NSL-KDD, obtendo as acurácia de 97,3%, 95,8%, 89,6% e 99,6%, respectivamente. O autor utilizou o Weka 3.6.7 (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*), um software desenvolvido em Java pela Universidade de Waikato, Nova Zelândia, que incorpora várias técnicas de AM. Não foi informado se os hiperparâmetros dos modelos foram os valores padrão, ou se houve algum ajuste para obter tais acurácia. Estas foram levantadas por meio de uma validação cruzada tipo 10-fold na base “NSL-KDD completa”. Embora a base NSL-KDD

seja fornecida em três conjuntos, 20% treino (apenas vinte por cento das amostras do conjunto treino), treino e teste, o autor não esclarece o que vem a ser a “NSL-KDD completa”. Uma possibilidade, portanto, é a de que ele juntou as partes de treino e teste numa única base e aplicou validação cruzada, somente com o objetivo de treinar e avaliar o desempenho dos modelos (e não de ajustar hiperparâmetros). As acurácia obtidas ficaram bem acima daquelas levantadas por Tavallaei *et al.* [19], que foram os criadores da base NSL-KDD. Provavelmente, a razão para isso foi que, neste último artigo, a base de treino usada foi de 20% do treino, e as acurácia foram levantadas no conjunto teste. Adebowale, Idowu e Amarachi [40] também forneceram os índices de detecção e TFP: o SVM obteve uma abrangência de 95,9% a uma TFP de 1,4%; já o MLP, o NB e o DT obtiveram, respectivamente, uma abrangência de 95,9% a uma TFP de 4,4%, uma abrangência de 87,7% a uma TFP de 8,8%, e uma abrangência de 99,6% a uma TFP de 0,4%.

Thaseen e Kumar [41] utilizaram a base NSL-KDD para testar todos os classificadores baseados em árvore, constantes no software Weka, sendo eles: ADTree, C4.5, J48graft, LADTree, NBTree, RandomTree, RandomForest e REPTree. Um pré-processamento foi realizado na base de dados, onde os atributos contínuos foram discretizados por uma técnica de filtragem supervisionada de atributos chamada *Discretize*. Além disso, houve uma redução de 41 para apenas 8 atributos, obtidos via análise CFS (do inglês *Correlation Feature Selection*). Trata-se de um método de seleção de atributos que privilegia aqueles com maior correlação com a variável de saída e, ao mesmo tempo, menor correlação com os demais atributos. Embora não tenha havido um ajuste de hiperparâmetros, em geral, os classificadores obtiveram elevada acurácia no conjunto de teste. NBTree foi o que obteve o melhor desempenho com uma abrangência de 97,8% a uma TFP de 4,8%.

Ustebay, Turgut e Aydin [42] obtiveram uma considerável redução nos atributos dos exemplos da base de dados CIC-IDS 2017, utilizando a eliminação recursiva de atributos com o algoritmo

Floresta Aleatória (RF, do inglês *Random Forest*). Assim, a quantidade total de atributos foi reduzida de 81 para apenas quatro, selecionados de acordo com a sua importância. Os autores levantaram um ponto relevante ao afirmar que os atributos *Flow_ID*, *Source_IP*, *Destination_IP*, *Timestamp* e *External_IP* não foram utilizados no treinamento, ou seja, nenhum deles estava presente nos quatro selecionados. Isso é um indício de que o classificador poderá ter um desempenho razoavelmente próximo ao ser aplicado em uma rede real, pois tais atributos são específicos da base CIC-IDS 2017 e não deveriam ser considerados na tarefa de classificação. Entretanto, não houve uma análise crítica do quão geral é o significado de cada um dos quatro atributos selecionados, ou seja, se eles se mantêm da mesma forma em redes reais. Após a seleção de atributos, a base foi particionada em 80% para treino e 20% para teste. Em seguida, utilizou-se uma MLP de três camadas com funções de ativação do tipo ReLu, com exceção da camada de saída, cuja função de ativação foi a Estimação de Momento Adaptativo. Ao analisar a curva ROC, é possível inferir uma TFP de 18% a uma abrangência de 100%.

Há também trabalhos que utilizaram redes neurais recorrentes na tarefa de detecção de intrusão. Le, Kim e Kim [43] utilizaram o algoritmo de predição de sequência LSTM (do inglês *Long Short Term Memory*) para realizar a classificação de ataques em DoS, Varredura, U2R e R2L. A base de dados empregada foi a KDD 1999, sendo que o resultado obtido foi uma abrangência de 98,95%, com uma TFP de 9,98%. Entretanto, os autores não detalham o método de aplicação do algoritmo.

Xu *et al.* [44] realizaram um trabalho similar ao de Le, Kim e Kim [43], porém, substituindo o algoritmo LSTM por uma Rede Neural Recorrente de predição de sequência denominada GRU (do inglês *Gated Recurrent Units*). Os autores sugeriram que GRU é superior ao LSTM para classificar ataques, e exemplificaram tal comparação através de uma aplicação isolada de ambos os algoritmos nas bases de dados KDD 1999 e NSL-KDD. Nas duas bases, o GRU realmente foi superior ao LSTM, embora não haja suporte teórico para generalizar tal superioridade em

outras aplicações. Além disso, tais algoritmos foram utilizados em conjunto com uma Rede Neural MLP. Os melhores resultados, obtidos com o GRU, foram uma abrangência de 99,42%, com uma TFP de 0,05%, para a base KDD 1999. Já no caso da base NSL-KDD, a abrangência foi de 99,31%, com uma TFP de 0,84%. Embora Le, Kim e Kim [43] tenham sido citados nas referências bibliográficas de Xu *et al.* [44], em nenhum momento os autores ressaltam o fato de terem obtido uma TFP extremamente reduzida, se comparada à do primeiro trabalho. Além disso, novamente, não há um detalhamento da metodologia de aplicação do algoritmo, onde poderiam ser apresentadas as sequências de atributos utilizadas, já que se trata de um algoritmo de predição sequencial.

Papamartzivanos [45] desenvolveu uma metodologia de indução de regras baseada numa combinação de algoritmos genéticos (GA, do inglês *Genetic Algorithm*) com árvores de decisão. Esse método, denominado *Dendron*, objetiva evoluir uma população de árvores de decisão, resultando num conjunto de regras para detecção e classificação de ataques. Segundo o autor, essa metodologia permite desenvolver um IDS baseado em assinatura com um desempenho balanceado, ou seja, com acurácia similar em todas as classes (inclusive as mais raras) nas quais os tráfegos de rede são classificados. Outra vantagem desse método é que, como ele utilizou árvores de decisão, as regras geradas para a classificação são humanamente inteligíveis, facilitando a tomada de decisão por especialistas em relação às contramedidas. O modelo foi testado nas bases KDD 1999, NSL-KDD e UNSW-NB15, obtendo, respectivamente, as seguintes métricas de desempenho: abrangência de 98,24%, com uma TFP de 0,75%; abrangência de 95,97%, com uma TFP de 1,08%; e abrangência de 63,76%, com uma TFP de 2,61%.

Ainda nesse mesmo trabalho, Papamartzivanos [45] baseou-se numa metodologia desenvolvida por Raina *et al.* [46], denominada STL (do inglês *Self-Taught Learning*), com o objetivo de tornar o IDS autoadaptável, permitindo que ele mantenha o desempenho mesmo na ocorrência de mudanças significativas no ambiente onde ele opera. Essas mudanças podem ter diferentes

causas, como a inserção e retirada de ativos da rede, inclusive equipamentos IoT, atualizações de software e surgimento de novos ataques. Portanto, diferente do que ocorre em IDSs de assinatura comuns (estáticos), não há a necessidade de atualizações manuais para adaptação a essas mudanças. Para demonstrar essa capacidade, o autor treinou um IDS numa base inicial contendo 10% de tráfego normal da base KDD 1999 e uma pequena parcela de ataques de cada classe dessa mesma base. O algoritmo utilizado foi uma rede DSAN (do inglês *Deep Sparse Autoencoder Network*) em conjunto com a regressão Softmax. O restante da base KDD 1999 foi utilizado para gerar 100 ambientes diferentes, por meio de amostragem aleatória. Cada ambiente poderia conter, ou não, classes ou instâncias pertencentes à base inicial; portanto, dependendo dessas diferenças, um determinado ambiente poderia ser pouco ou muito distinto da base inicial. Assim, partindo do IDS treinado, foram obtidos dados de desempenho nesses ambientes variados de duas formas: a primeira, mantendo o IDS estático, ou seja, sem alterá-lo após o treinamento inicial; e a segunda, utilizando o STL, para testar a capacidade do classificador em adaptar-se a mudanças. O IDS estático obteve, na média (considerando 100 ambientes diferentes), uma abrangência de 38,54%, bem inferior a 60,34%, que foi obtida pelo IDS autoadaptável. Um aspecto discordante nesse trabalho é que o experimento foi realizado em um IDS baseado em AM, utilizando DSAN e Softmax, sendo que o autor argumenta que essa técnica permite tornar um IDS baseado em assinatura autoadaptável.

Stefanova [47] desenvolveu um IDPS (do inglês *Intrusion Detection and Prevention Systems*), o qual possui duas camadas: a primeira, responsável por realizar a detecção por meio de AM, e a segunda, responsável por impedir ativamente o ataque detectado, por meio de Aprendizado por Reforço. Neste caso, o autor aplica uma aproximação do *Q-learning* no contexto de Teoria dos Jogos, onde o atacante e o defensor (da rede de dados) participam de um mesmo jogo cuja solução é um ponto de equilíbrio ótimo, do ponto de vista da defesa. A base utilizada foi a NSL-KDD. Com relação à primeira camada, houve uma seleção de atributos

utilizando ganho de informação, reduzindo-os de 41 para 30. A classificação foi realizada por uma RF, obtendo aproximadamente uma TFP de 0,16% e uma abrangência de 99,9%. Tais valores foram obtidos por inspeção da curva ROC presente no trabalho.

6.2. Trabalhos com foco na redução da TFP

Os trabalhos a seguir abordaram o problema da TFP, que é um dos principais obstáculos na implantação de um IDS em redes reais, principalmente naquelas com alta densidade de tráfego.

Subba, Biswas e Karmakar [48] propuseram um método de redução da TFP em IDS de assinatura, cuja ideia principal consiste em escanear todos os ativos pertencentes à rede local a ser protegida e levantar todas as vulnerabilidades existentes, criando um “perfil de vulnerabilidades”. Dessa forma, todos os alarmes referentes a ataques que exploram vulnerabilidades inexistentes nesse perfil são descartados, reduzindo consideravelmente a TFP, sem impactar na abrangência. O experimento utilizou o IDS Snort, cujo banco de dados de assinatura estava na versão Snort V2.8 com certificação VRT (do inglês *Vulnerability Research Team*), na configuração padrão com todas as assinaturas habilitadas. Levantaram-se, inicialmente, os dados de desempenho do IDS Snort na base de dados DARPA 1999 e, após isso, aplicou-se a técnica proposta para minimizar a TFP. O autor não deixou claro o quanto a TFP foi minimizada. Por outro lado, ele informou que, no caso de vulnerabilidades críticas, a acurácia do detector aumentou de 83,24% para 97,85%, sem alterar a abrangência, que se manteve em 37,47%. Já para o caso de vulnerabilidades não críticas, a acurácia aumentou de 71,31% para 95,56%, com uma pequena degradação na abrangência (de 35,67% para 32,43%). Assim, uma vez que a acurácia melhorou sem alterar significativamente a abrangência, pode-se dizer que houve uma diminuição na TFP.

Outro artigo que também utilizou o Snort para estudar o problema de falso positivo foi Tjhai *et al.* [49]. Neste caso, o IDS foi instalado para monitorar o tráfego de entrada e saída no servidor de páginas da Universidade de Plymouth (Reino Unido). Um dos

problemas dessa abordagem é que somente os eventos que geravam alarmes eram analisados. Isso significa que não houve conhecimento algum a respeito da quantidade de verdadeiros ou falsos negativos. Dessa forma, convencionou-se chamar de Taxa de Verdadeiro Positivo (TVP) a proporção de alarmes verdadeiros em relação à quantidade total de alarmes. Na verdade, essa proporção denota a precisão do IDS, e não a TVP. Analogamente, convencionou-se chamar de TFP a proporção de falsos alarmes em relação à quantidade total de alarmes, o que, na verdade, é o complemento da precisão. A despeito disso, os dados apresentados foram suficientes para mostrar a extensão do problema de falsos positivos, uma vez que estes foram consideravelmente mais numerosos em relação aos alarmes verdadeiros, nesse caso, em uma proporção aproximada de 24:1. Outro aspecto apresentado foi uma terceira categoria de alarmes (além de verdadeiro e falso positivo), denominada de irrelevante positivo, que, neste artigo (e em Subba, Biswas e Karmakar [48]), foi incluída na categoria de falso positivo. Um irrelevante positivo é um ataque sabidamente sem sucesso, pois explora vulnerabilidades inexistentes na rede em questão. Por exemplo, um ataque que explora uma determinada vulnerabilidade específica do SO Windows é um irrelevante positivo, caso todas as máquinas conectadas à rede rodem somente o SO Linux. Em resumo, percebeu-se que a grande maioria de falsos alarmes era gerada por três tipos de assinaturas. Dessa forma, por meio da análise de um especialista, foram feitos ajustes nas regras relacionadas a essas assinaturas, resultando na diminuição da proporção de falsos positivos (em relação a verdadeiros positivos) de 95,5% para 86,8%.

Zohrevand e Glässer [50] analisaram vários trabalhos que têm por objetivo diminuir a TFP de IDSs baseados em anomalia para níveis aceitáveis. De acordo com os autores, uma considerável atenção tem sido dada somente à obtenção de um modelo treinado em detecção de anomalias, sendo negligenciados aspectos relacionados à análise das decisões tomadas por esses modelos, especialmente as análises voltadas para mitigação de alarmes falsos, como, por exemplo, a “pontuação da anomalia”, que mede o nível de

diferença em relação a eventos normais, e ajuste do limiar de decisão. Dessa forma, diferentes formas de computar a pontuação da anomalia foram apresentadas, abordando probabilidades, correlações e similaridades entre anomalias. Infelizmente, a pesquisa não apresentou dados numéricos para fins de comparação.

6.3. Trabalhos com foco na explicabilidade do modelo

Nesta seção, serão apresentados trabalhos relacionados à explicabilidade de algoritmos aplicados em detecção de ciberataque. Normalmente, nesse caso, existem duas abordagens mais comuns: uma análise ampla dos atributos, onde são mostrados, de maneira geral, quais os mais importantes, e uma análise mais específica, onde, para uma determinada classificação (ou grupo de classificações), verificam-se quais os atributos que mais influenciaram. Além disso, dados de desempenho já não são tão relevantes como nos trabalhos citados na subseção 6.1. Assim, o foco de trabalhos com explicabilidade está mais voltado à interpretação dos atributos e o quanto é razoável a importância dada a eles pelo algoritmo em uma dada tarefa de classificação. Marino, Wickramasinghe e Manic [30] analisaram exemplos classificados de forma errônea pelo modelo através de um método denominado de Aproximação Adversária. A ideia dessa técnica é verificar qual a menor mudança possível nos atributos necessária para corrigir uma classificação errada. Esse método funciona para qualquer tipo de modelo (linear, rede neural, SVM etc.) desde que a função de perda – normalmente, a entropia cruzada para o caso de classificação – possua um gradiente definido em relação aos atributos de entrada. Note que um *hacker* pode usar esse mesmo método para fazer o oposto, ou seja, determinar qual é a menor mudança nos atributos de um ataque (que foi detectado) necessária para que o modelo passe a considerá-lo como um tráfego legítimo. Entretanto, existem correlações entre os atributos do ataque que impõem restrições capazes de impedir alterações de forma independente. Dessa forma, a menor alteração teórica pode resultar num ataque inviável, visto que

a técnica de Aproximação Adversária desconsidera relações de interdependência entre atributos.

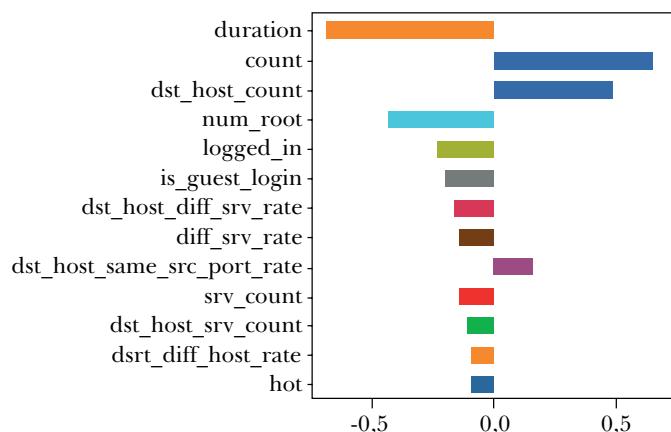


Fig. 4 – Amostras normais classificadas erroneamente como DoS.
Fonte: [30].

A **Figura 4** elucida uma aplicação de Aproximação Adversária referente a um caso particular da base de dados NSL-KDD. Trata-se das amostras de tráfego normal (legítimo) classificadas erroneamente como DoS por um modelo de rede neural já treinado, com acurácia de 95,5%. No eixo vertical, constam os atributos, e, no eixo horizontal, os valores mínimos, na média, que deveriam ser subtraídos desses atributos para que o modelo passasse a classificar corretamente essas amostras. Isso significa que, ao realizar tais alterações mínimas nos atributos, amostras erroneamente classificadas como DoS passariam a ser classificadas corretamente em tráfego normal. Como resultado, é possível explicar a classificação errada. Note que ocorreu relativamente um alto número de conexões para o mesmo host (*count*) e para o mesmo endereço de destino (*dst_host_count*), sendo que essas conexões tiveram baixa duração (*duration*). Além disso, houve poucas operações realizadas como *root* nessas conexões (*num_root*), bem como baixo percentual de amostras que conseguiram se logar com sucesso (*logged_in*, *is_guest_login*). Essas características são comuns em ataques de negação de serviço, daí a razão para a classificação errônea. Caberia ao analista verificar se houve um erro de rótulo na base, ou se ocorreu apenas uma coincidência, ou, ainda, se há

alguma razão lógica para registros rotulados como normais possuírem tais atributos.

Reyes *et al.* [51] utilizaram AM na detecção de intrusão em redes Wi-Fi, constantes na base AWID2. A detecção ocorre em dois estágios: o primeiro, por intermédio do RF, classificando os eventos em normal, inundação e personificação/injeção; e o segundo estágio separa a personificação da injeção, via NB. Esse modelo foi concebido como consequência de um trabalho anterior, onde os autores, ao classificarem os ataques num único estágio, perceberam que muitas amostras da classe personificação eram classificadas como injeção e vice-versa. Levando em consideração apenas a tarefa de detecção do primeiro estágio, ou seja, classificar em normal ou ataque, o modelo proposto obteve uma acurácia de 99,41%, uma abrangência de 94,1% e uma TFP de 0,13%. Adicionalmente, os autores dedicaram uma seção para a análise dos atributos utilizando a biblioteca SHAP (*SHapley Additive exPlanations*) [52], que oferece uma variedade de ferramentas para análise de explicabilidade global e local do modelo, inclusive de forma gráfica. Entretanto, esse trabalho não apresenta uma explicação de domínio, ou seja, qual o significado de cada atributo (ou, pelo menos, dos principais) e se é coerente ou não o comportamento do modelo, esclarecido pelas técnicas de explicabilidade. A despeito disso, os autores limitaram-se a citar quais atributos impactam positivamente ou negativamente na classificação de determinado rótulo. Entretanto, seria necessária uma análise mais profunda sobre a coerência desses impactos, o que só é possível com um conhecimento sobre o significado dos atributos envolvidos.

Wang *et al.* [53] também utilizaram SHAP para explicar as decisões de um IDS, além de reivindicar pioneirismo na aplicação dessa técnica de explicabilidade em detecção de intrusão. A base NSL-KDD foi utilizada para treinar dois modelos de rede neurais distintos: um contra todos e multiclasse, os quais obtiveram, respectivamente: acurácia de 80,6%, abrangência de 80,6% e TFP de 19,4%; acurácia de 80,3%, abrangência de 80,3% e TFP de 19,7%. Nesses modelos, foi feita uma análise de explicabilidade local referente aos ataques

DoS do tipo Neptune, que tenta saturar um servidor enviando uma elevada quantidade de pacotes SYN em todas as portas. Esses ataques possuem, portanto, uma alta taxa de conexões com erro SYN e, utilizando análise local SHAP, verificou-se que os modelos um contra todos e multiclasse classificaram os ataques Neptune em DoS com, em média, 93% e 89% de certeza, respectivamente. Entretanto, os atributos que direcionaram tal classificação foram bem distintos. De fato, o modelo um contra todos utilizou atributos mais razoáveis e diretamente relacionados ao Neptune. Tais atributos indicavam altas taxas de erro de conexão SYN, demonstrando que tal característica foi a principal responsável pela classificação. Já o modelo multiclasse não utilizou, de forma predominante, atributos relacionados a esse aspecto de erro SYN. Por isso, os autores concluíram que o modelo multiclasse não oferece razões consistentes para a confiança de um especialista nos resultados. Por outro lado, não houve uma análise crítica sobre os atributos que direcionaram a classificação feita pelo modelo multiclasse, ainda que eles não estivessem diretamente relacionados ao Neptune. Foi apresentada também uma análise global da importância dos atributos utilizando SHAP. A **Figura 5** mostra os 20 dentre os 41 atributos mais importantes para a classificação em DoS para o caso do modelo um contra todos. Cada linha na figura contém um atributo e

todos os exemplos do conjunto teste na forma de pontos, cuja cor varia do azul ao vermelho, representando os menores e maiores valores do atributo, respectivamente. A localização dos pontos indicada no eixo horizontal denota quanto o respectivo atributo contribuiu a favor ou contra a classificação em DoS.

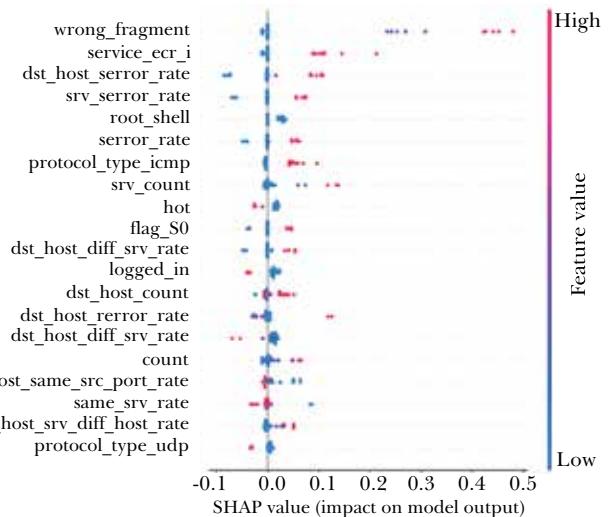


Fig. 5 – 20 atributos mais relevantes na classificação em DoS pelo modelo um contra todos. **Fonte:** [53].

A **Tabela 2** relaciona os quatro atributos mais relevantes da **Figura 5** com ataques do tipo DoS, demonstrando que, realmente, tais atributos são bastante pertinentes para uma efetiva classificação em DoS.

Tab. 2 – Tipos de ataque DoS.

Tipo	Descrição	Atributo
<i>Land</i>	Esse ataque trava o SunOS 4.1 pelo envio de um pacote TCP SYN mascarado, com o endereço de origem igual ao de destino.	
<i>Neptune</i>	Também conhecido por <i>SYN flood</i> ou ataque <i>half open</i> , ele inunda servidores web com pacotes TCP SYN mascarados, esgotando a memória. Consequentemente, novas conexões serão rejeitadas até o término da validade do tempo dessas conexões abertas pelos pacotes mascarados.	<i>srv_error_rate</i> <i>dst_host_error_rate</i>
<i>PoD</i>	Conhecido por “Ping da Morte” (do inglês <i>Ping of Death</i>), esse ataque envia pacotes IPs fragmentados, de maneira que, ao serem reconstruídos no <i>host</i> de destino, resultem em um pacote IP com tamanho acima de 65.535 bytes, que é o máximo permitido. Isso causa o travamento de sistemas operacionais antigos.	<i>wrong_fragment</i>
<i>Teardrop</i>	Esse ataque envia pacotes IPs fragmentados impossíveis de serem reconstruídos no <i>host</i> de destino, por haver sobreposições entre os fragmentos, causando o travamento de alguns sistemas operacionais.	
<i>Smurf</i>	Esse ataque envia pacotes ICMP do tipo <i>Echo Request</i> , conhecido como ping, para todos os <i>hosts</i> presentes na rede da vítima, via <i>broadcast</i> . Como o campo endereço de origem desses pacotes foi mascarado com o endereço IP da vítima, esta recebe uma quantidade excessiva de pacotes <i>Echo Reply</i> , vindos como resposta de todos os <i>hosts</i> contidos no endereço de <i>broadcast</i> .	<i>service_ecr_i</i>

Fonte: Adaptado de [53].

Uma abordagem ligeiramente diferente foi apresentada em Mahdavifar e Ghorbani [54]. Nesse artigo, os autores inicialmente treinaram uma rede neural DNN para detectar ciberataques e, posteriormente, derivaram dessa rede um modelo especialista, denominado DeNNes (do inglês *Deep*

Embedded Neural Network Expert System). Modelos especialistas são definidos como um programa de computador que desempenha uma tarefa normalmente realizada por uma pessoa especialista por meio de regras se-então [55]. Nesse caso, essas regras foram extraídas do modelo DNN, que é não interpretável,

para compor a base de conhecimento de um sistema especialista, que é interpretável. Para uma definição formal dessas regras, considere $T: \{X, y\} \rightarrow \{(\mathbf{x}^{(1)}, y^{(1)}), (\mathbf{x}^{(2)}, y^{(2)}), \dots, (\mathbf{x}^{(m)}, y^{(m)})\}$ uma base de dados com m exemplos $(\mathbf{x}^{(i)}; y^{(i)})$ onde $\mathbf{x}^{(i)}$ representa um vetor de atributos do exemplo i , e $y^{(i)}$ o rótulo da classe associada. $\mathbf{x}^{(i)}$ possui n atributos $x_k^{(i)}$, como se segue: $\mathbf{x}^{(i)} = \{x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}\}$; e $y^{(i)}$ é um número inteiro: $y^{(i)} \in \mathbb{Z}$.

Assim, uma regra de classificação r_i , com respeito a $(\mathbf{x}^{(i)}; y^{(i)})$, é definida como $r_i: P_i \rightarrow Q_i$, onde o antecedente da regra P_i é uma combinação de $l < n$ valores de atributos $\{k_1, k_2, \dots, k_l\}$:

$$P_i = \{x_{k_1}^{(i)} \wedge x_{k_2}^{(i)} \wedge \dots \wedge x_{k_l}^{(i)}\},$$

E o consequente da regra $Q_i = \{y^{(i)}\}$ é o rótulo da classe.

Dessa forma, Mahdavifar e Ghorbani [54] desenvolveram extensões do algoritmo MIJ (MACIE's *Inference Justification*) [55], com o objetivo de extrair essas regras do modelo DNN. Diferentes regras aplicadas a uma mesma amostra podem resultar em classificações diferentes. Assim, para realizar a classificação final baseada em regras, estabeleceu-se um sistema de votação, levando em conta todas as regras aplicáveis à amostra em questão. Além disso, o peso do voto de cada regra varia de acordo com a força da regra (η_{ri}), medida pelo produto de dois fatores: confiança (Cf_{ri}) e abrangência (Cr_{ri}), algo de certa forma análogo aos indicadores de desempenho precisão e abrangência de modelos classificadores. O primeiro fator é igual à proporção de exemplos que obedece à regra por completo em relação a todos que obedecem ao antecedente da regra. O segundo é igual à proporção de exemplos que obedece à regra por completo em relação a todos que obedecem ao consequente da regra. De maneira formal, tem-se:

$$\eta_{ri} = Cf_{ri} \cdot Cr_{ri},$$

$$\text{onde } Cf_{ri} = \frac{|\{(x^{(i)}, y^{(i)}) \in T \mid P_i \subseteq x^{(i)} \text{ e } Q_i = \{y^{(i)}\}\}|}{|\{(x^{(i)}, y^{(i)}) \in T \mid P_i \subseteq x^{(i)}\}|}$$

$$\text{e } Cr_{ri} = \frac{|\{(x^{(i)}, y^{(i)}) \in T \mid P_i \subseteq x^{(i)} \text{ e } Q_i = \{y^{(i)}\}\}|}{|\{(x^{(i)}, y^{(i)}) \in T \mid Q_i = \{y^{(i)}\}\}|}.$$

Foram utilizadas duas bases de dados para a aplicação dessa técnica: Phishing Websites, da Universidade da Califórnia Irvine (UCI), e uma base de malwares de Android, coletada por meio dos sites VirusTotal e Contagio Security Blog. Nessas bases, foram aplicados DNN, DeNNeS e algoritmos clássicos de AM. DeNNeS obteve o segundo melhor desempenho, ficando bastante próximo do modelo DNN, que obteve o melhor. Na base Phishing Websites, DeNNeS obteve uma acurácia de 97,5% e uma TFP de 1,8%, superando uma outra técnica de extração de regras conhecida por JRip, além de superar também outras técnicas de AM (RF, SVM, KNN e NB). Já na base de malware, DeNNeS alcançou uma acurácia de 95,8% e uma TFP de 8%; da mesma forma, superou o JRip e as demais técnicas de AM.

6.4. Comparação entre os trabalhos relacionados

A **Tabela 3** apresenta os dados de desempenho dos trabalhos constantes na subseção 6.1. Como alguns trabalhos da subseção 6.3 também disponibilizaram dados de desempenho [51, 53, 54], eles foram incluídos ao final dessa tabela. O objetivo dessa comparação de resultados é mostrar que, em geral, a TFP não é desprezível, podendo tornar-se um problema importante em casos de tráfego elevado e desbalanceado em favor de eventos legítimos. Além disso, há uma variação muito grande desses valores, inclusive em trabalhos que utilizaram a mesma base de dados. Como praticamente todos os artigos abordados não disponibilizam em detalhe a metodologia e todos os dados necessários para a replicação do experimento, não há como garantir uma comparação completamente justa.

Tab. 3 – Desempenho obtido em artigos de detecção de intrusão utilizando AM.

Artigo	Base	Técnica	Abrangência (%)	TFP (%)	Acurácia (%)
Fan <i>et al.</i> [32]	DARPA 1998	RIPPER	94	2	-
Hu, Liao e Vemuri [33]	DARPA 1998	RSVM	100	3	-
Bivens <i>et al.</i> [34]	DARPA 1999	SOM/MLP	-	76	-
Kruegel <i>et al.</i> [35]	DARPA 1999	Redes Bayesianas	100	0,2	-

(continua...)

Tab. 3 - Continuação

Artigo	Base	Técnica	Abrangência (%)	TFP (%)	Acurácia (%)
Shon e Moon [36]	DARPA 1999	SVM aprimorada	72,73	10,2	-
Tajbakhsh, Rahmati e Mirzaei [37]	KDD 1999	Regras Fuzzy	100	13	-
Amor, Benferhat e Elouedi [38]	KDD 1999	NB	89	2	-
Chen, Hsu e Shen [39]	DARPA 1998	SVM	100	8,53	-
Adebawale, Idowu e Amarachi [40]	NSL-KDD	SVM	95,9	1,4	97,3
		MLP	95,9	4,4	95,8
		NB	87,7	8,8	89,6
		DT	99,6	0,4	99,6
Thaseen e Kumar [41]	NSL-KDD	NBTree	97,8	4,8	-
Ustebay, Turgut e Aydin [42]	CIC-IDS 2017	MLP	100	18	-
Le, Kim e Kim [43]	KDD 1999	LSTM	98,95	9,98	-
Xu <i>et al.</i> [44]	KDD 1999	GRU/MLP	99,42	0,05	-
	NSL-KDD		99,31	0,84	-
Papamartzivanos [45]	KDD 1999	GA/DT	98,24	0,75	98,85
	NSL-KDD		95,97	1,08	97,55
	UNSW-NB15		63,76	2,61	84,33
Stefanova [47]	NSL-KDD	RF	99,9	0,16	-
Reyes <i>et al.</i> [51]	AWID	RF	94,1	0,13	99,41
Wang <i>et al.</i> [53]	NSL-KDD	MLP	80,6	19,4	80,6
Mahdavifar e Ghorbani [54]	Privada	DNN	-	1,8	97,5

Fonte: Elaborado pelos autores.

Ainda na **Tabela 3**, verifica-se que alguns trabalhos obtiveram uma TFP menor que 1%, com uma abrangência de 99%. Esse elevado desempenho ocorreu uma vez na base DARPA 1999, uma vez na KDD 1999 e três vezes na NSL-KDD. Os algoritmos utilizados foram Redes Bayesianas, DT, RF e uma combinação de GRU com MLP. Sem fazer uma análise de explicabilidade nesses modelos, não há como se ter uma ideia se haverá uma

manutenção de tais desempenhos em aplicações reais. Embora tenha sido de alta relevância o desenvolvimento dos métodos e os desempenhos alcançados, também é necessário entender se os atributos utilizados para detecção representam relações gerais que não estão restritas às bases de dados empregadas.

Ainda que tais desempenhos se mantenham em aplicações reais, mesmo a menor TFP obtida, no caso, 0,05% para a base KDD 1999, pode gerar uma quantidade considerável de falsos positivos em redes altamente velozes e desbalanceadas, ou seja, com uma quantidade de tráfegos benignos muito superior àquelas de tráfegos maliciosos. Lembrando ainda que a base KDD 1999, além de ser antiga, possui imperfeições que facilitam a tarefa de classificação do modelo [19]. Além disso, o artigo que a empregou [44] é bem mais recente que a data de construção dela. Isso tudo corrobora para um desempenho superestimado. Por outro lado, note que a abrangência de 100% obtida na base CIC-IDS 2017 só foi possível com uma TFP de 18%, bem acima de 0,05%. Já na base UNSW-NB15, disponibilizada em 2015, a TFP foi de 2,61%, porém, com uma baixa abrangência (63,76%). Certamente, um ajuste no limiar do detector para aumentar esta abrangência ocasionaria um considerável aumento na TFP. Entretanto, é necessário ampliar a pesquisa para obter mais dados a respeito de desempenhos obtidos em bases mais recentes.

A **Tabela 4** sumariza os trabalhos que apresentaram outras propostas, além de somente obterem alto índice de desempenho. À exceção de [45], constante na subseção 6.1, todos os trabalhos nessa tabela foram extraídos da subseção 6.2 e da subseção 6.3. Portanto, em geral, as propostas desses trabalhos relacionam-se a estratégias para tratar a ocorrência de falsos positivos, ou, então, a aspectos de explicabilidade, no intuito de obter conhecimento sobre quais combinações de valores de atributos representam de fato um ataque, e se há coerência nessa combinação.

Tab. 4 – Artigos sobre detecção de intrusão com outros objetivos além do desempenho.

Artigo	Bases	Técnica	Objetivo	Resultado
Papamartzivanos [45]	KDD 1999 e NSL-KDD	STL	Desenvolver um IDS baseado em assinatura autoadaptável.	IDS autoadaptável superou IDS estático em ambientes diversos.

(continua...)

Tab. 4 - Continuação

Artigo	Bases	Técnica	Objetivo	Resultado
Subba, Biswas e Karmakar [48]	DARPA 1999	Filtragem de detecção baseada em vulnerabilidades.	Redução da TFP em IDS de assinatura.	Aumento da acurácia, sem considerável degradação na abrangência.
Tjhai <i>et al.</i> [49]	Privada	Ajustes nas regras do IDS relacionadas às assinaturas que mais geram falsos positivos.	Redução da TFP em IDS de assinatura.	Diminuição na proporção de falsos positivos (em relação à quantidade total de alarmes) de 95,5% para 86,8%.
Marino, Wickramasinghe e Manic [30]	NSL-KDD	Aproximação Adversária	Entender o motivo da ocorrência de falso positivo em um grupo de exemplos, de tráfego normal, classificados em ataque DoS.	Obtenção dos atributos que mais contribuíram para a classificação errônea, bem como o quanto tais atributos deveriam ser alterados para uma correta classificação.
Wang <i>et al.</i> [53]	NSL-KDD	SHAP	Verificar quais atributos foram mais usados pelo modelo na classificação de ataques Neptune em DoS, e se há coerência nessa escolha de atributo.	Obtenção dos atributos que mais contribuíram para a classificação do Neptune em DoS. Houve mais coerência no modelo MLP um contra todos do que no MLP multiclasse.
Mahdavifar e Ghorbani [54]	Privada	Extração de regras do modelo	Substituir um modelo DNN não interpretável, por outro interpretável.	Obtenção de um modelo especialista, por meio de extração de regras do modelo DNN, com pouca degradação no desempenho.

Fonte: Elaborado pelos autores.

7. Conclusão

AM tem se mostrado um campo de pesquisa promissor na atividade de detecção de intrusão, em virtude do elevado desempenho obtido em bases de dados simuladas. Entretanto, não há garantias de que o mesmo nível de desempenho seja obtido em aplicações reais. São necessários, portanto, estudos que verifiquem o nível de semelhança entre bases simuladas e tráfegos reais. Um obstáculo que se apresenta é a possibilidade de exposição de informações sensíveis contidas nesse tipo de tráfego ao torná-lo público para estudos.

Outra abordagem para analisar possibilidades de manutenção do desempenho em aplicações reais seria

por meio da explicabilidade. Essa técnica permite verificar os fatores considerados mais importantes por modelos de AM complexos na tarefa de detectar intrusão. Assim, o estudo desses fatores pode concluir se eles realmente representam características gerais, relacionadas a ataques, ou tráfego benigno, independente do ambiente ser real ou simulado.

Finalmente, também foi verificado o problema da ocorrência de falso positivo, que pode levar à negligência de ataques verdadeiros, camuflados por uma quantidade excessiva de alarmes. IDSs que utilizam AM são mais suscetíveis a essas circunstâncias, o que, em geral, tem sido um obstáculo na implantação dessa tecnologia na detecção de intrusão.

Referências

- [1] ALYASIRI, H. Developing Efficient and Effective Intrusion Detection System using Evolutionary Computation. Dissertação (PhD em Ciência Computacional) – University of York, Heslington, 2018.
- [2] AKSU D.; AYDIN M. A. Detecting Port Scan Attempts with Comparative Analysis of Deep Learning and Support Vector Machine Algorithms. In International Congress on Big Data, Deep Learning and Fighting Cyber Terrorism (IBIGDELFT). Piscataway: IEEE, 2018. p. 77–80. <http://dx.doi.org/10.1109/IBIGDELFT.2018.8625370>.
- [3] HACKER tries to poison water supply of Florida city. BBC News, 8 fev. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/world-us-canada-55989843>. Acesso em: fev. 2021.
- [4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. Joint Technical Committee ISO/IEC JTC 1/SC 127. ISO/IEC 27032:2012(en) Information technology — Security techniques — Guidelines for cybersecurity. Whashington, DC: ISO; IEC, 2012. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:27032:ed-1:v1:en>. Acesso em: 24 set. 2021.

- [5] AMOROSO, E. G.; AMOROSO, M. E. From CIA to APT: An Introduction to Cyber Security. 2017.
- [6] SCARFONE, K. A.; MELL, P. M. NIST Special Publication 800-94 – Guide to Intrusion Detection and Prevention Systems (IDPS): Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [7] INDIAN CYBER SECURITY SOLUTIONS. Intrusion Detection System and its Detailed Working Function. ICSS, 2021. Disponível em: <https://indiancybersecuritysolutions.com/intrusion-detection-system-working-function>. Acesso em: 17 ago. 2021.
- [8] THOMA, M. Receiver Operating Characteristic (ROC) curve with False Positive Rate and True Positive Rate. Wikimedia Commons, 2018. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Roc-draft-xkcd-style.svg&oldid=491003296>. Acesso em: 7 jan. 2021.
- [9] XIN, Y.; KONG, L.; LIU, Z.; CHEN, Y.; LI, Y.; ZHU, H. et al. Machine Learning and Deep Learning Methods for Cybersecurity. IEEE Access, v. 6, p. 35365–35381, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2836950>.
- [10] KELLEHER, J. D.; NAMEE B. M.; D'ARCY, A. Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2020.
- [11] MUELLER, J. P.; MASSARON, L. Machine Learning for Dummies. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- [12] GHAHRAMANI, Z. Unsupervised Learning. In BOUSQUET, O.; VON LUXBURG, U.; RÄTSCH, G. (ed.). Advanced Lectures on Machine Learning. ML Summer Schools 2003. Amsterdam: Springer, 2003. https://doi.org/10.1007/978-3-540-28650-9_5.
- [13] EVSUKOFF, A. G. Inteligência Computacional: Fundamentos e Aplicações. Rio de Janeiro: E-papers, 2020.
- [14] VANDERPLAS, J. Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data. Sebastopol: O'Reilly, 2016.
- [15] RASCHKA S.; MIRJALILI, V. Python Machine Learning: Machine Learning and Deep Learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow. 2. ed. Birmingham: Packt Publishing, 2017.
- [16] BUCZAK, A. L.; GUVEN, E. A Survey of Data Mining and Machine Learning Methods for Cyber Security Intrusion Detection. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 18, n. 2, p. 1153–1176, 2016. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2494502>.
- [17] DARPA Intrusion Detection Evaluation Dataset. MIT Lincoln Laboratory, 1998/1999. Disponível em: <https://www.ll.mit.edu/r-d/datasets>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- [18] DATA – KDD Cup 1999: Computer network intrusion detection. SIGKDD, 1999. Disponível em: <https://www.kdd.org/kdd-cup/view/kdd-cup-1999/Data>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- [19] TAVALLAEE, M.; BAGHERI, E.; LU, W.; GHORBANI, A. A. A detailed analysis of the KDD CUP 99 data set. In IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA). Piscataway: IEEE, 2009. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/CISDA.2009.5356528>.
- [20] NSL-KDD DATASET. Canadian Institute for Cybersecurity. University of New Brunswick, 2009. Disponível em: <https://www.unb.ca/cic/datasets/nsl.html>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- [21] CTU-13 DATASET. A Labeled Dataset with Botnet, Normal and Background Traffic. Stratosphere Lab, 2011. Disponível em: <https://www.stratosphereips.org/datasets-ctu13>. Acesso em: 29 ago. 2021.
- [22] DELPLACE, A.; HERMOSO S.; ANANDITA, K. Cyber Attack Detection thanks to Machine Learning Algorithms. arXiv preprint, 2001.06309, 2020.
- [23] DATASETS. Canadian Institute for Cybersecurity, University of New Brunswick, 2020. Disponível em: <https://www.unb.ca/cic/datasets/index.html>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- [24] WIRELESS DATASETS. University of the Aegean, 2021. Disponível em: <https://icsdweb.aegean.gr/awid/download-dataset>. Acesso em: 23 dez. 2021.
- [25] KOLIAS, C.; KAMBOURAKIS, G.; STAVROU, A.; GRITZALIS, S. Intrusion Detection in 802.11 Networks: Empirical Evaluation of Threats and a Public Dataset. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 18, n. 1, p. 184–208, 2016. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2402161>.
- [26] MOUSTAFA, N.; SLAY, J. UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set). In Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS). Piscataway: IEEE, 2015. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MilCIS.2015.7348942>.
- [27] GARCIA, S.; PARMISANO, A.; ERQUIAGA, M. J. IoT-23: A labeled dataset with malicious and benign IoT network traffic (Version 1.0.0). Zenodo. Stratosphere Lab, 2020. Disponível em: <https://www.stratosphereips.org/datasets-iot23>. Acesso em: 23 dez. 2021.

- [28] USB-IDS-1. Università degli Studi del Sannio di Benevento, 2021. Disponível em: <http://idsdata.ding.unisannio.it/datasets.html>. Acesso em: 25 dez. 2021.
- [29] NISIOTI, A.; MYLONAS, A.; YOO, P. D.; KATOS, V. From Intrusion Detection to Attacker Attribution: A Comprehensive Survey of Unsupervised Methods. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 20, n. 4, p. 3369–3388, 2018. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2854724>.
- [30] MARINO, D. L.; WICKRAMASINGHE, C. S.; MANIC, M. An Adversarial Approach for Explainable AI in Intrusion Detection Systems. In 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE, 2018. p. 3237–3243. <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591457>.
- [31] KHRAISAT, A.; GONDAL, I.; VAMPLEW, P.; KAMRUZZAMAN, J. Survey of intrusion detection systems: techniques, datasets and challenges. *Cybersecurity*, v. 2, n. 20, 2019. <https://doi.org/10.1186/s42400-019-0038-7>.
- [32] FAN, W.; MILLER, M.; STOLFO, S. J.; LEE W.; CHAN, P. K. Using artificial anomalies to detect unknown and known network intrusions. In *IEEE International Conference on Data Mining*. Piscataway: IEEE, 2001. p. 123–130. <https://doi.org/10.1109/ICDM.2001.989509>.
- [33] HU, W.; LIAO, Y.; VEMURI, V. R. Robust Support Vector Machines for Anomaly Detection in Computer Security. In *International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*. Piscataway: IEEE, 2003. p. 168–174.
- [34] BIVENS, A.; PALAGIRI, C.; SMITH, R.; SZYMANSKI, B.; EMBRECHTS, M. Network-Based Intrusion Detection Using Neural Networks. In *Intelligent Engineering Systems through Artificial Neural Networks ANNIE-2002*, v. 12. New York: ASME Press, 2002. p. 579–584.
- [35] KRUEGEL, C.; MUTZ, D.; ROBERTSON, W.; VALEUR, F. Bayesian event classification for intrusion detection. In *19th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC)*. Piscataway: IEEE, 2003. p. 14–23. <https://doi.org/10.1109/CSAC.2003.1254306>.
- [36] SHON, T.; MOON, J. A hybrid machine learning approach to network anomaly detection. *Information Sciences*, v. 177, n. 18, p. 3799–3821, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.03.025>.
- [37] TAJBAKHSH, A.; RAHMATI, M.; MIRZAEI, A. Intrusion detection using fuzzy association rules. *Applied Soft Computing*, v. 9, n. 2, p. 462–469, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2008.06.001>.
- [38] AMOR, N. B.; BENFERHAT S.; ELOUEDI, Z. Naive Bayes vs decision trees in intrusion detection systems. In *Proceedings of the 2004 ACM Symposium on Applied Computing*, Association for Computing Machinery. New York: ACM Digital Library, 2004. p. 420–424. <https://doi.org/10.1145/967900.967989>.
- [39] CHEN, W. H.; HSU, S. H.; SHEN, H. P. Application of SVM and ANN for intrusion detection. *Computers & Operations Research*, v. 32, n. 10, p. 2617–2634, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.03.019>
- [40] ADEBOWALE, A.; IDOWU, S. A.; AMARACHI, A. A. Comparative study of selected data mining algorithms used for intrusion detection. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, v. 3, n. 3, p. 237–241, 2013.
- [41] THASEEN, I. S.; KUMAR, C. A. An analysis of supervised tree based classifiers for intrusion detection system. In *International Conference on Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering*. Piscataway: IEEE, 2013. p. 294–299. <https://doi.org/10.1109/ICPRIME.2013.6496489>.
- [42] USTEBAY, S.; TURGUT, Z.; AYDIN, M. A. Intrusion Detection System with Recursive Feature Elimination by Using Random Forest and Deep Learning Classifier. In *International Congress on Big Data, Deep Learning and Fighting Cyber Terrorism (IBIGDELFT)*. Piscataway: IEEE, 2018. p. 71–76. <https://doi.org/10.1109/IBIGDELFT.2018.8625318>.
- [43] LE, T. T. H.; KIM, J.; KIM, H. An Effective Intrusion Detection Classifier Using Long Short-Term Memory with Gradient Descent Optimization. In *International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon)*. Piscataway: IEEE, 2017. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PlatCon.2017.7883684>.
- [44] XU, C.; SHEN, J.; DU, X.; ZHANG, F. An Intrusion Detection System Using a Deep Neural Network with Gated Recurrent Units. *IEEE Access*, v. 6, p. 48697–48707, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2867564>.
- [45] PAPAMARTZIVANOS, D. C. Advanced machine learning methods for network intrusion detection. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of the Aegean, Mitilene, 2019.
- [46] RAINA, R.; BATTLE, A.; LEE, H.; PACKER B.; NG, A. Y. Self-Taught Learning: Transfer Learning from Unlabeled Data. In *Proceedings of the 24th International Conference on Machine Learning*, Association for Computing Machinery. New York: ACM Digital Library, 2007. p. 759–766. <https://doi.org/10.1145/1273496.1273592>.
- [47] STEFANOVA, Z. S. Machine Learning Methods for Network Intrusion Detection and Intrusion Prevention Systems. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of South Florida, Tampa, 2018.

- [48] SUBBA, B.; BISWAS, S.; KARMAKAR, S. False alarm reduction in signature-based IDS: game theory approach. *Security and Communication Networks*, v. 9, n. 18, p. 4863–4881, 2016. <https://doi.org/10.1002/sec.1661>.
- [49] TJHAI, G. C.; PAPADAKI, M.; FURNELL, S. M.; CLARKE, N. L. Investigating the problem of IDS false alarms: An experimental study using Snort. In *Proceedings of The Ifip Tc 11 23rd International Information Security Conference*, v. 278. Laxenburg: IFIP, 2008. p. 253–267.
- [50] ZOHREVAND, Z.; GLÄSSER, U. Should I Raise The Red Flag? A comprehensive survey of anomaly scoring methods toward mitigating false alarms. *arXiv preprint*, 1904.06646, 2019.
- [51] REYES, A. A.; VACA, F. D.; AGUAYO, G. A. C.; NIYAZ, Q.; DEVABHAKTUNI, V. A Machine Learning Based Two-Stage Wi-Fi Network Intrusion Detection System. *Electronics*, v. 9, n. 10, p. 1689, 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9101689>.
- [52] LUNDBERG, S. M.; LEE, S. I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. In *31th Conference on Neural Information Processing Systems*. New York: ACM Digital Library, 2017. p. 4768–4777.
- [53] WANG, M.; ZHENG, K.; YANG, Y.; WANG, X. An Explainable Machine Learning Framework for Intrusion Detection Systems. *IEEE Access*, v. 8, p. 73127–73141, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988359>.
- [54] MAHDAVIFAR, S.; GHORBANI, A. A. DeNNes: deep embedded neural network expert system for detecting cyber attacks. *Neural Computing and Applications*, v. 32, n. 18, p. 14753–14780, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04830-w>.
- [55] GALLANT, S. I. *Neural Network Learning and Expert Systems*. 3. ed. Cambridge: MIT Press, 1995.

Crédito Imobiliário Digital

Sua casa própria com as
melhores condições

**Juros baixos
para aquisição
de imóvel, terreno
e material de
construção*.**

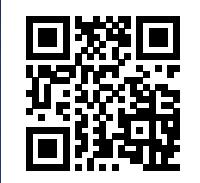


Diferenciais:

Teto IPCA – limite de 6,5% a.a. para a inflação.

Garante30 – possibilidade de alterar, em até 30 meses, a forma de atualização do contrato.

Idade limite – 85 anos.

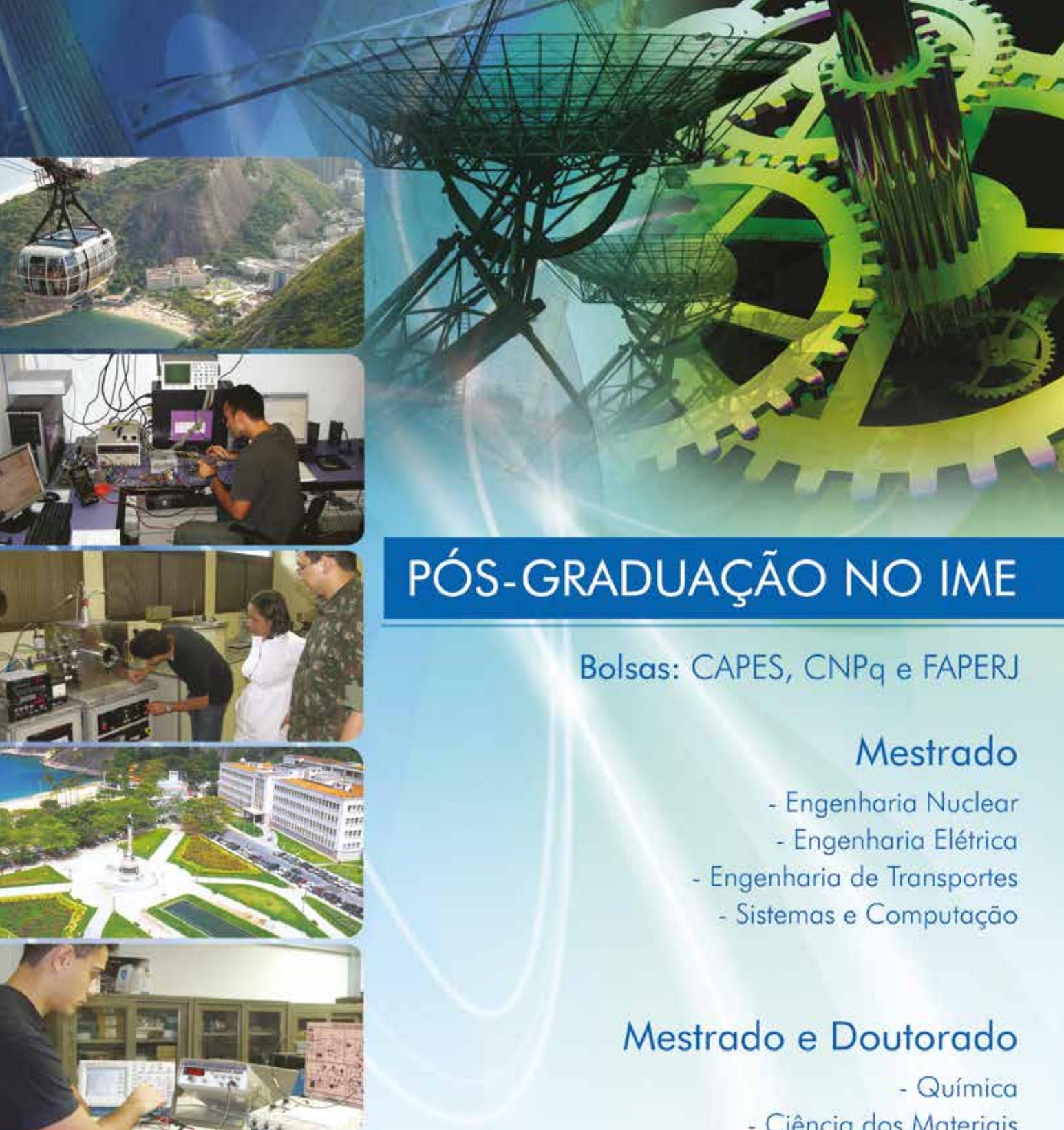


FHE

POUPEX

poupex.com.br
0800 061 3040

Consulte as normas e condições vigentes.
*Material de construção somente para militares das Forças Armadas e conveniados.



PÓS-GRADUAÇÃO NO IME

Bolsas: CAPES, CNPq e FAPERJ

Mestrado

- Engenharia Nuclear
- Engenharia Elétrica
- Engenharia de Transportes
- Sistemas e Computação

Mestrado e Doutorado

- Química
- Ciência dos Materiais
- Engenharia de Defesa

Apoio:



Matrículas: Fluxo Contínuo

Tel.: (21) 2546-7114 – Fax: (21) 2546-7089 – www.ime.eb.br – sd1@ime.eb.br

