



REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA



Versão impressa: ISSN 0102-3543

Volume XXXVIII - 2º Trimestre de 2021

ENGENHARIA MILITAR

**Mobilidade,
Contramobilidade e
Proteção**

Combate automático às Fake News nas mídias sociais virtuais: uma revisão do estado da arte – Pág 03

Avaliação de excessos termodinâmicos para fluidos de altas densidades em base à teoria perturbacional de esferas duras - KLRR – Pág 13

Efeitos do plano-terra finito sobre a impedância e o ganho de uma antena monopolo de quarto de onda – Pág 18

Modelagem dinâmica pelo método dos elementos finitos para análise de vibrações em estruturas espaciais sujeitas a esforços externos – Pág 28

Síntese de controlador H^∞ para sistema de armas de um carro de combate – Pág 36

Absorção de micro-ondas por nanopartículas de ferritas mistas de cobalto e cério – Pág 49

Resistência ao ataque químico em placas cerâmicas de revestimento sustentáveis produzidas a partir de resíduo vítreo – Pág 54





REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

COMANDANTE DO EXÉRCITO:

Gen Ex Paulo Sérgio Nogueira de Oliveira

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA:

Gen Ex Décio Luís Schons

DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO E CULTURA DO EXÉRCITO:

Gen Ex Tomás Miguel Miné Ribeiro Paiva

BIBLIOTECA DO EXÉRCITO:

Cel Art Eduardo Biserra Rocha

CORPO REDATORIAL:

• Comandante do IME: Gen Bda Juraci Ferreira Galdino • Editor geral: Marcelo de Miranda Reis – IME (SE/2) • Editor adjunto: Paulo Henrique Coelho Maranhão – IME (SE/4) • Editor executivo: Cel R1 Leocir Dal Pai – BIBLIEx • 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

COMPOSIÇÃO:

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

REVISÃO, PROGRAMAÇÃO E DIAGRAMAÇÃO:

Coordenador: Rubenildo Python de Barros • Revisores: Giana Elvira de Oliveira Marquês; Juniellen de Oliveira Seipel; Diego Ribeiro Ferreira Serpa • Plataforma OJS: Lucas Sebastião de Paula; Vanessa Ferreira Belchior • Diagramador: Luiz Tadeu Carqueija Mota

PROJETO GRÁFICO:

BIBLIEx

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: divmcl@graficadoexercito.eb.mil.br



REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA - Volume XXXVII

2º Trimestre de 2021

Direção, edição e distribuição:

BIBLIOTECA DO EXÉRCITO

EDITORA (BIBLIEx)

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

3º andar - Ala Marcílio Dias

Centro - Rio de Janeiro-RJ

CEP 20.221-260

Tel.: (21) 2519-5707

ACESSE NOSSAS REVISTAS DIGITAIS



Nossa capa:

Homenagem ao Corpo de Engenheiros





Caros leitores interessados em assuntos relacionados à Ciência e Tecnologia, é com grande satisfação que damos publicidade à segunda edição de 2021. Nesta edição, trazemos aos nossos leitores sete artigos com temas em cinco áreas da engenharia.

Dentre os vários estudos abordados nessa edição, a área da Engenharia de Computação nos apresentava com um tema super atual e relevante tratando das diversas formas de combate as Fake News. A Engenharia Mecânica nos brinda com duas pesquisas, a primeira versando sobre a implementação da teoria perturbacional de esferas duras KLRR para a avaliação de excessos termodinâmicos de fluidos a altas densidades e pressões e a segunda apresenta em detalhes os passos para a modelagem dinâmica de uma estrutura espacial utilizando o método dos elementos finitos (MEF). No campo da Engenharia Elétrica temos um artigo que propõe uma análise numérica dos efeitos do tamanho e da forma geométrica do plano-terra nos parâmetros de performance da antena. A Engenharia de Materiais também nos traz dois artigos, o primeiro confirmando as conclusões de dois estudos anteriores que sugerem que a dopagem com cério aumenta a absorção de microondas pela ferrita de cobalto, e, além disso, determinando a causa da redução dessa absorção para frações molares de Ce maiores que certo limite. O segundo trata sobre a resistência ao ataque químico em placas cerâmicas de revestimento sustentável produzidas a partir de resíduo vítreo. Por fim, no âmbito da Engenharia de Defesa, apresentamos um estudo que propõe uma sistemática ao projeto de sistemas de controle para o armamento principal de carros de combate.

Esperamos que a leitura seja proveitosa e que ajude a aumentar a curiosidade científica em nossos leitores. Fomentar a ciência e a tecnologia é a pedra fundamental do desenvolvimento tecnológico de uma nação forte. Aproveitem esta edição!

Paulo Henrique Coelho Maranhão

SUMÁRIO

- 03** • Combate automático às Fake News nas mídias sociais virtuais: uma revisão do estado da arte
Paulo M. S. Freire, Ronaldo R. Goldschmidt
- 13** • Avaliação de excessos termodinâmicos para fluidos de altas densidades em base à teoria perturbacional de esferas duras - KLRR
Paulo Couceiro
- 18** • Efeitos do plano-terra finito sobre a impedância e o ganho de uma antena monopolo de quarto de onda
Fabiano Carvalho dos Santos Assumpção, Maurício Henrique Costa Dias
- 28** • Modelagem dinâmica pelo método dos elementos finitos para análise de vibrações em estruturas espaciais sujeitas a esforços externos
Ricardo L O Rosa, Maurício Gruzman
- 36** • Síntese de controlador H_∞ para sistema de armas de um carro de combate
Caio César da Mota Souza, Alberto Mota Simões e Maurício Gruzman
- 49** • Absorção de micro-ondas por nanopartículas de ferritas mistas de cobalto e cério
R S de Biasi, I C Gonçalves, A B S Figueiredo, C L Oliveira e J B Campos
- 54** • Resistência ao ataque químico em placas cerâmicas de revestimento sustentáveis produzidas a partir de resíduo vítreo
Daysianne K M Isidório, Francisco S B G Júnior, Maria I B Rorrigues, Breno P Bezerra

Combate automático às Fake News nas mídias sociais virtuais: uma revisão do estado da arte

Paulo M. S. Freire, Ronaldo R. Goldschmidt*

Instituto Militar de Engenharia (IME)

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

*ronaldo.rgold@ime.eb.br

RESUMO: Esta pesquisa mostrará o atual estado da arte dos estudos relacionados ao uso de ferramentas computacionais para o combate às Fake News em mídias sociais virtuais. O problema de combater as Fake News não é recente, mas sua complexidade aumentou devido ao uso de mídias sociais digitais. Com base na suposição de que o combate às Fake News é uma tarefa dividida em detecção e intervenção, este artigo fornecerá uma coleção sobre as áreas relacionadas ao combate às Fake News em mídias sociais virtuais, bem como ferramentas, conjuntos de dados e questões em aberto.

PALAVRAS-CHAVE: Fake News. Mídias sociais virtuais. Ferramentas computacionais.

ABSTRACT: This survey will show the current state-of-the-art of studies related to the usage of computational tools for Fake News combat on virtual social media. The problem of combating Fake News is not recent, but its complexity has increased due to the use of digital social media. Based on the assumption that Fake News combat is a task divided into detection and intervention, this paper will provide a collection about the areas pertaining to Fake News combat on virtual social media as well as tools, datasets and open issues.

KEYWORDS: Fake News. Virtual social media. Computational tools.

1. Introdução

Historicamente, a divulgação de notícias era restrita às mídias tradicionais, tais como: rádio, tv e veículos de comunicação impressos. Atualmente, há uma tendência das pessoas divulgarem e consumirem mais notícias online do que aquelas disponibilizadas por mídias tradicionais [1]. Essa migração para as mídias sociais virtuais tem como uma das principais causas, a crescente facilidade de acesso a baixo custo. Por outro lado, essa maior acessibilidade possibilita a qualquer um, independentemente da credibilidade da fonte, divulgar notícias falsas com um intenso poder de espalhamento [2].

Dessa forma, a divulgação de notícias falsas, apesar de ser um problema antigo, teve a sua complexidade aumentada, de forma significativa, com o uso das mídias sociais virtuais [3]. Um segmento ainda mais preocupante abrange as *Fake News*, que são as notícias falsas publicadas de forma intencional [2],

pois uma inverdade premeditada tende a ser mais bem elaborada e, consequentemente, mais eficaz no seu principal objetivo que é a mudança de opinião. Essa proliferação de notícias intencionalmente falsas, normalmente, não atinge somente a integridade jornalística, mas também causam perturbações em áreas sociais, políticas, econômicas, culturais, da saúde e da segurança [4,5, 41].

Com base no exposto, surge um importante desafio que é combater a propagação de *Fake News* em mídias sociais virtuais [6,7,8,9,10], pois não basta verificar se a notícia é falsa, mas também é preciso determinar a intenção do divulgador em ludibriar os receptores [2,11]. Esse combate apresenta-se como não trivial, tanto pelo volume e velocidade das publicações, quanto pela notória dificuldade do homem em avaliar a veracidade das notícias [12,13,14]. Assim, o emprego de ferramentas computacionais, devido a sua maior velocidade de atuação, vem se destacando no combate às *Fake News* nas mídias sociais virtuais [13].

Apesar de ser um assunto relevante, até onde foi

possível observar, apenas duas pesquisas [2,3] fizeram um estudo sobre o estado da arte no combate às *Fake News* em mídias sociais virtuais. Como essa área é relativamente recente, essa pesquisa busca considerar alguns aspectos importantes não abordados pelos referidos trabalhos anteriores.

2. Caracterização de *Fake News*

A utilização do termo *Fake News* é relativamente recente, por isso surgem algumas divergências relativas ao seu significado. As *Fake News* são publicações em que a falsidade intencional é verificada [2,3,12,15]. Assim, o aspecto proposital é fundamental, haja vista que para uma determinada notícia *n* ser rotulada como *Fake News* há a necessidade de que *n* seja intencionalmente falsa.

Para enfatizar a diferença entre uma notícia falsa e uma intencionalmente falsa, pode-se utilizar dois termos denominados *misinformation* e *disinformation* [16,10]. A *misinformation* corresponde às notícias falsas publicadas pela falta da informação verdadeira, enquanto que a *disinformation* diz respeito às notícias propositalmente falsas, denominadas de *Fake News* [6].

Apesar da originalidade da expressão, as *Fake News* não surgiram com o uso das mídias sociais virtuais, pois, mesmo com as mídias tradicionais, já existiam pessoas ou Instituições procurando, de forma proposital, divulgar notícias falsas. Basicamente, essa divulgação pode ter o objetivo de ridicularizar e/ou enganar os receptores [16].

Independente do objetivo, a recente proliferação de notícias falsas e mal-intencionadas tem sido uma fonte de preocupação generalizada. Essa apreensão se deve pela constatação do poder de influência das *Fake News* na sociedade [8].

Somente nos Estados Unidos da América (EUA), mais de sessenta e dois por cento dos adultos recorrem às mídias sociais virtuais para receberem notícias.

Como consequência desse elevado percentual, pode-se destacar o caso ocorrido nos três meses finais das eleições presidenciais americanas de 2016. Nessa ocasião as notícias falsas publicadas no Facebook, que favoreceram qualquer um dos dois candidatos, foram compartilhadas 37 milhões de vezes [15].

Inclusive casos relacionados às *Fake News* não se limitam aos EUA, pois, em 2018 na Índia, o *WhatsApp*, após notícias falsas terem, supostamente, levado a linchamentos, anunciou um limitador para a quantidade de encaminhamentos de mensagem¹.

Como um último e atual exemplo do poder de influência das *Fake News*, pode-se destacar o caso da pandemia de COVID-19 (*Coronavirus Disease-19*), causada pelo patógeno SARS-Cov-2 e que já matou milhares de pessoas no ano de 2020 ao redor do mundo², inúmeras *Fake News* têm sido divulgadas em mídias sociais virtuais [41]. Essas divulgações têm dificultado, de forma significativa, o esclarecimento da população sobre a disseminação da pandemia e sobre as devidas medidas de enfrentamento da doença a serem adotadas a cada instante.

O poder de influência das *Fake News* na sociedade se potencializa por fatores inerentes ao ser humano [2], dentre eles podemos destacar que as pessoas:

- preferem receber informações que confirmem as suas opiniões sem, necessariamente, verificarem a veracidade da notícia;
- tendem a aceitar as informações não pela análise da verdade, mas pela relação de ganhos e perdas que a notícia vai trazer para elas;
- tendem a avaliar as informações não pela busca da veracidade, pois acabam acompanhando a aceitação dos outros.

Além da influência das *Fake News* ser potencializada pelas características humanas, outra razão que as fortalece nas mídias sociais virtuais é a facilidade dos usuários, também denominados de agentes, publicarem e/ou propagarem as notícias [3]. Um aspecto importante inerente a essa facilidade é a criação de contas digitais maliciosas por meio de

¹ BBC News - <https://www.bbc.com>

² www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019

agentes mal-intencionados de natureza humana e/ou computacional [2]. Esses agentes subdividem-se em:

- Bot que são robôs responsáveis por publicar e/ou propagar informações intencionalmente falsas;
- Trolls que são humanos com os mesmos objetivos dos Bots;
- Cyborgs já são mecanismos híbridos (humano/bot) que buscam disparar *Fake News*.

Existem ainda dois fatores importantes para incentivar essa disseminação das *Fake News*. O primeiro está relacionado à falta de legislação punitiva, devido à alegação de que as referidas leis poderiam cercear a liberdade de expressão. O segundo fator é o potencial ganho financeiro com a propagação da notícia [6].

Com base na facilidade de se publicar e propagar as notícias intencionalmente falsas nas mídias sociais virtuais, uma das principais formas de criação e disseminação de *Fake News* é se infiltrar em uma comunidade de pessoas engajadas em discutir um determinado assunto. Segundo MUSTAFARA [5], devem ser realizados os seguintes passos: Criar um domínio falso (*website*), criar contas anônimas, identificar comunidades e agentes interessados em um determinado assunto, contaminar esses agentes com a notícia falsa e incentivar a discussão para que as *Fake News* sejam espalhadas.

A partir da premissa de que a notícia falsa seja publicada e, em seguida, propagada, é importante caracterizar que uma notícia falsa pode ser criada no momento da publicação e, conseqüentemente, ser potencializada pela sua disseminação. Entretanto, uma notícia não *fake* pode ser publicada e se tornar *fake*, a partir do seu espalhamento, de acordo com as contribuições intencionalmente falsas feitas durante a sua propagação.

Com base na caracterização explicitada, o combate às *Fake News* pode se subdividir em detectar a notícia intencionalmente falsa e, posteriormente, intervir sobre a mesma. Essa intervenção objetiva mitigar os efeitos nocivos causados pela notícia na mídia social virtual.

3. Áreas relacionadas com *Fake News*

Como visto anteriormente, a utilização das mídias sociais virtuais não tem somente vantagens. Assim sendo, existem segmentos que atuam no combate aos problemas provenientes do uso dessas mídias. Portanto, esses serviços se tornam campos importantes de estudo devido ao seu relacionamento com o combate às *Fake News*. Algumas dessas áreas se encontram listadas a seguir, onde se procurou ordenar, de forma decrescente, essa lista de acordo com a similaridade das áreas com a detecção de *Fake News*, embora não exista consenso a respeito:

- *Fact Checking* (Checagem de fatos) - são *websites* ou *frameworks* responsáveis pela verificação, normalmente realizada com a ajuda de especialistas, da veracidade de fatos divulgados em mídias sociais virtuais [23,13,24]. A verificação da verdade dos fatos pode ser utilizada na tarefa de detecção de *Fake News*, assim como na criação de datasets;
- *Reputation and Trust System* (Sistemas de Reputação e Confiança) - são sistemas que buscam determinar o nível de confiança em mídias sociais virtuais baseados na obtenção de graus de reputação [25,26]. Com base na confiança, podem ser determinados riscos e recomendações, conforme ilustra a **figura 1**. A determinação de níveis de reputação e confiança, conseqüentemente riscos e recomendações, pode ser utilizada na tarefa de identificação de *Fake News*;
- *Rumor Classification* (Classificação de Rumores) - Rumor é uma informação em circulação cuja veracidade não foi verificada no momento da publicação. Um rumor pode ser classificado como verdadeiro, falso ou ainda não verificado [2,17,1,18]. Um rumor identificado como falso, após a sua publicação, é caracterizado como *Fake News*, caso haja intenção, conforme ilustra a **figura 2**. A tarefa mais relacionada com o combate às *Fake News* é a classificação de veracidade dos rumores;
- *Bot Detection* (Detecção de Bots) – procura identificar o envio automático de informações na mídia social por meio de robôs [20]. Esses envios podem acabar causando a propagação das *Fake News* [2,21,22,9];

- *Truth Discovery* (Descoberta da Verdade) - é a descoberta da verdade de fatos conflitantes entre diferentes fontes [2,19]. O combate às *Fake News* pode se beneficiar da Descoberta da Verdade para determinar a veracidade das afirmações, sendo, posteriormente, caracterizadas como *Fake News* as afirmações propositalmente falsas, conforme ilustra a **figura 2**;
- Clickbait Detection (Detecção de Iscas de Cliques) – procura identificar, nas páginas *WEB*, as chamadas iscas de cliques que, praticamente, forçam o agente a selecionar a opção apresentada. Nesse caso, o corpo do texto (bodytext) do artigo é, frequentemente, pobre e essa discrepância tem sido usada para identificar a inconsistência entre as linhas do cabeçalho (headlines) e o conteúdo da notícia, em uma tentativa de detectar *Fake News*. Sendo assim, o Clickbait pode ser usado como um indicador de *Fake News* [2].



Fig. 1 – Relação entre reputação e confiança.

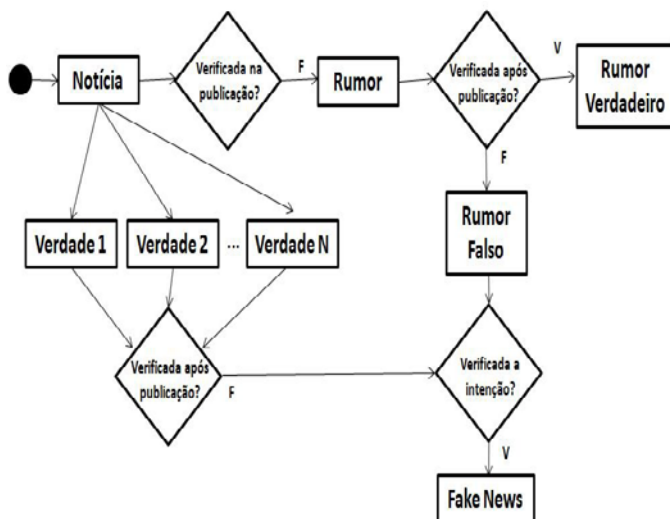


Fig. 2 – Relação entre descoberta da verdade, rumor, e *Fake News*.

4. Trabalhos relacionados ao combate automático às *Fake News*

Nesta seção são apresentados alguns trabalhos que desenvolveram ferramentas de combate automático às *Fake News*. Cabe destacar que a maioria desses trabalhos se enquadram na área de aprendizado de máquinas (AM) ao utilizarem os métodos tradicionais da AM [39,40]. Os referidos trabalhos são brevemente descritos, podendo seus detalhes serem consultados nas respectivas referências:

- *Automatic Detection of Fake News* [27]: Esse trabalho cria uma ferramenta de detecção de *Fake News* por classificação com *Support Vector Machines* (SVM), combinando informações léxicas, sintáticas, semânticas e de legibilidade. Também compara os resultados com a detecção humana;
- *Automatic Detection of Fake News on Social Media Platforms* [12]: Esse artigo implementa a detecção com os classificadores Binários *Logistic Regression*, *Support Vector Machines* (SVM), *Decision Tree*, *Random Forest* e *Extreme Gradient Boosting*. O referido trabalho compara os resultados entre os classificadores;
- *Automatically Identifying Fake News in Popular Twitter Threads* [28]: O trabalho apresenta um método para detecção de *Fake News* no *Twitter* que acumula, ao longo do tempo, as características de rede, agente e conteúdo da notícia com análise léxica e sintática para gerar uma regressão linear. Assim, a abordagem realiza a sua análise, levando em consideração os aspectos temporais relacionados à notícia;
- *Combining Neural, Statistical and External Features for Fake News Stance Identification* [29]: Nesse estudo a ferramenta, desenvolvida para o primeiro desafio (FNC-1) ³, não tem o objetivo de detectar se a notícia é *Fake News*. Nessa abordagem, as notícias são classificadas de acordo com a relação existente entre a manchete e o corpo do texto. A ferramenta combina as abordagens neural e estatística com recursos externos. Para isto, a solução implementa um modelo profundo

³ <http://www.fakenewschallenge.org/>

recorrente *Neural Embedding*, um modelo ponderado de características estatísticas *n-gram bag-of-words* e recursos externos criados à mão com a ajuda de uma heurística de engenharia de atributos. Por fim, usando uma rede neural profunda, todas as referidas abordagens são combinadas. Os resultados foram comparados com as demais ferramentas participantes do referido desafio;

- *CSI: A Hybrid Deep Model for Fake News Detection* [13]: O trabalho procura melhorar a acurácia na detecção de *Fake News* por meio de um modelo híbrido de rede neural profunda chamado CSI que utiliza três características: o texto da notícia, a resposta do agente que recebeu a notícia e o agente fonte da notícia. Esse modelo trabalha com o comportamento temporal de agentes e artigo, como também o comportamento em grupo dos agentes propagadores. Esse modelo se divide em três partes: *Capture*, *Score* e *Integrate*. O primeiro módulo é baseado na resposta e no texto, por meio de uma rede neural recorrente (LSTM) para capturar um padrão temporal de atividades do agente sobre o artigo e a representação Doc2Vec do texto gerado nessa atividade. O segundo usa uma rede neural para aprender as características da fonte, baseado no comportamento dos agentes de acordo com suas interações, gerando um score por meio de um grafo. Os dois módulos são integrados com o terceiro para caracterizar ou não o artigo como *Fake News*. O trabalho pode ser usado em diferentes domínios, inclusive em bancos de dados. Os resultados foram comparados com técnicas criadas para detecção de rumores;
- *Data mining applied in fake news classification through textual patterns* [37]: Esse artigo propõe uma detecção de *Fake News* a partir da análise do texto da notícia. Portanto, essa pesquisa classifica uma notícia através de uma análise gramatical, léxica e de polaridade do texto. Para tanto, foram utilizados o léxico Sentilex (polaridade), a biblioteca *Spacy* (gramatical), assim como, os classificadores *Naive Bayes*, *SVM* e *AdaBoost*;
- *DistrustRank: Spotting False News Domains* [30]: Essa solução propõe uma estratégia de aprendizagem semi-supervisionada para separar automaticamente notícias falsas a partir de fontes não confiáveis de notícias. O trabalho utiliza como fonte experts de portais de checagem de fatos para classificar manualmente as notícias. A partir disso é criado um grafo de pesos com os ranks de confiança sobre os sites e as arestas representam sua similaridade. A pesquisa computa a centralidade, utilizando o *PageRank*, em busca de uma similaridade entre os sites não confiáveis. O resultado da análise é a classificação em *Trust* ou *Distrust* para a fonte da notícia. Essa abordagem comparou os seus resultados, executando outras técnicas sobre o mesmo dataset;
- *Evaluating Machine Learning Algorithms for Fake News Detection* [31]: Esse artigo explora técnicas de linguagem natural para a detecção de *Fake News*. O trabalho aplicou term *frequency-inverse document frequency* (TF-IDF) de bi-grams e probabilistic context free grammar (PCFG) para um conjunto de 11.000 artigos em um dataset obtido pela *Signal Media* e uma lista de fontes da *OpenSources.com*. Esse dataset foi testado com os algoritmos de classificação *Support Vector Machines*, *Stochastic Gradient Descent*, *Gradient Boosting*, *Bounded Decision Trees* e *Random Forests*. Os modelos com melhor desempenho foram os *Stochastic Gradient Descent*, treinados apenas no conjunto de recursos do TF-IDF;
- *Exploiting Tri-Relationship for Fake News Detection* (TriFN) [32]: Esse artigo explora, simultaneamente, as correlações da postura da notícia, o bias e engajamento do agente. Assim, é apresentado um Tri-Relacionamento para detecção de *Fake News* (TriFN). O trabalho propõe que, tanto informações partidárias, quanto níveis de confiança do agente nas mídias sociais virtuais podem trazer benefícios adicionais para prever notícias falsas. Além disso, os agentes tendem a formar relacionamentos com pessoas afins que podem aumentar o espalhamento das *Fake News*. Essa abordagem cita e compara os seus resultados com os trabalhos RST-SVM, LIWC e *Information Credibility*;
- *Fake News Detection in Social Networks via Crowd Signals* [33]: A ferramenta desenvolvida trabalha na detecção e, conseqüente, intervenção da *Fake News*. Essa solução possui um algoritmo, chamado de *Detective* que usa inferência Bayesiana para detectar *Fake News* a partir da opinião do usuário e da sua respectiva reputação em opinar. O objetivo é, com base nas opiniões dos usuários, detectar, de forma antecipada, uma notícia falsa e bloqueá-la. Os resultados foram comparados

com as soluções denominadas pelo artigo como Opt, Oracle, Fixed-CM e No-Learn;

- *Fake News Mitigation Via Point Process Based Intervention* [15]: Nesse artigo, o enfoque está na intervenção da Fake News. A proposta é intervir, mitigando a notícia falsa, fornecendo recompensas na forma de notícias verdadeiras para quem recebeu a Fake News. O modelo utilizado foi baseado em *least-squares temporal difference learning* (LSTD). Um dos experimentos foi real, com a criação de cinco contas no Twitter;
- *Liar, Liar Pants on Fire: A New Benchmark Dataset for Fake News Detection* [4]: Essa abordagem cria uma técnica de detecção de Fake News híbrida, usando redes neurais convolucionais (CNNs) para analisar, não somente textos mas também os dados do agente. O artigo obteve os melhores resultados, comparados com os de outros três detectores implementados com *Logistic Regression Classifier* (LR), *Support Vector Machine Classifier* (SVM) e *bi-directional long short-term memory networks model* (Bi-LSTMs);
- *Ranking-based Method for News Stance Detection* [7]: Mais uma pesquisa relacionada ao primeiro desafio (FNC-1). A solução do artigo é criada a partir de uma rede neural *Multi-Layer Perceptron*. Os resultados foram comparados com as demais ferramentas participantes do referido desafio;
- *Real-time Detection of Content Polluters in Partially Observable Twitter Networks* [22]: Essa pesquisa procura encontrar um tipo específico de bots, chamados de poluidores de conteúdo (*content polluters*), para poder distinguir notícias verdadeiras de Fake News. Segundo o artigo, o estado da arte de detecção de bots é analisar padrões de comportamento, sentimento, difusão, textual e temporal da rede social. Dessa forma, os dados são clusterizados para que os agentes possam ser classificados como bots pela análise dos respectivos perfis e a frequência dos tweets. Os resultados do trabalho foram comparados com os obtidos por uma ferramenta citada pelo artigo, denominada *Truthy*;
- *Towards News Verification: Deception Detection Methods for News Discourse* [14]: O trabalho propõe a ferramenta RST-SVM que analisa a notícia para extrair o estilo por meio da combinação do *Rhetorical Structure Theory* (RST) e *Vector Space Modeling* (VSM) para

Clusterização. A classificação da notícia em enganosa ou real é feita por meio do SVM. Os resultados obtidos não foram significativamente melhores do que a detecção humana;

- *Tracing Fake-News Footprints: Characterizing Social Media Messages by How They Propagate* [34]: Esse trabalho foca a detecção de Fake News modelando a propagação da notícia na rede social por meio de mineração de grafos em Florestas (difusão da informação). Segundo o artigo, classificar Fake News pelo conteúdo da notícia é muito difícil, pois os respectivos criadores já estão se preocupando em divulgar as Fake News com os mesmos padrões das notícias verdadeiras. Em contra partida, as notícias falsas tendem a ter as mesmas fontes, pessoas e sequências. O trabalho propõe a ferramenta paralelizável chamada *TraceMiner* que utiliza *Recurrent Neural Networks* (LSTM-RNNs), para classificar o caminho de propagação das mensagens do Twitter. O artigo comparou os seus resultados com técnicas de análise de conteúdo criadas, usando SVM e *XGBoost*.

5. Datasets

Para treinar e/ou avaliar a acurácia das técnicas para combate às Fake News em mídias sociais virtuais são utilizadas métricas obtidas, normalmente, a partir da aplicação de modelos em datasets.

Até onde foi possível observar, não existe um dataset considerado como *benchmark*, pois os poucos disponíveis não contemplam as diferentes características que podem ser utilizadas na tarefa de combate às Fake News. Alguns datasets públicos se encontram descritos abaixo:

- *BS Detector* [2]: Esse dataset é coletado de uma extensão de *browser* chamado BS Detector que foi desenvolvido para checagem da veracidade de notícias. Os rótulos existentes são “Fake news”, “Satire”, “Extreme bias”, “Conspiracy theory”, “Rumor mill”, “State news”, “Junk science”, “Hate group” e “Clickbait”;
- *BuzzFeedNews (2016-10-facebookfact-check)* [2]: Esse dataset compreende as notícias no Facebook de nove agências para a eleição presidencial americana de 2016. Os eventos e artigos ligados foram checados por jornalistas do BuzzFeed. Ele contém 1.627 artigos rotulados como “Mostly true”, “Mixture of true and false”, “Mostly false” e

“No factual content”;

- *BuzzFeedNews* (2016-10-*facebookfact-check* modificado) [12]: Conjunto de dados criado a partir do *BuzzFeedNews* (2016-10-*facebookfact-check*), contudo os artigos são rotulados com “Fake” e “Non-Fake”;
- *Celebrity* [27]: Esse *dataset* fornece os dados da notícia para análise léxica, sintática e semântica. As notícias verdadeiras e falsas foram retiradas da *Web*, sendo relacionadas com assuntos de celebridades;
- *CREDBANK* [2]: Conjunto de dados criado a partir do cruzamento de várias fontes, com aproximadamente 60 milhões de tweets, que cobrem 96 dias, iniciados em outubro de 2015. Todos os tweets são relacionados com mais de 1.000 eventos de notícias. Cada evento foi avaliado, pela credibilidade, por 30 anotadores da *Amazon Mechanical Turk*. Os rótulos existentes são “[−2] *Certainly inaccurate*”, “[−1] *Probably inaccurate*”, “[0] *Uncertain (doubtful)*”, “[+1] *Probably accurate*”, “[+2] *Certainly accurate*”;
- *DataSet Emergent* [7,29]: Nesse repositório, as notícias são rotuladas como “*Agree*” (o texto do corpo concorda com a manchete), “*Disagree*” (o texto do corpo discorda da manchete), “*Discuss*” (o texto do corpo discute a mesma afirmação que o título, mas não toma uma posição) e “*Unrelated*” (o texto do corpo discute uma alegação diferente do título). Essa base faz parte do primeiro desafio (FNC-1) e foi criado a partir do *dataset* para detecção de rumor chamado *Emergent*;
- *DistrustRank Datasets* [30]: Foram desenvolvidos dois *datasets*. O primeiro, gerado com sites confiáveis, por meio do *SimilarWeb*⁴, tem 502 domínios e 396.422 URLs de notícias. O segundo, obtido com sites não confiáveis, através do *Wikipedia’s list of prominent Fake News*⁵, possui 47 domínios e 37.320 URLs de notícias. As URLs das notícias foram obtidas no *Internet Archive*;
- *Facebook para Detective* [33]: Fonte de dados que considera os círculos sociais do *Facebook*, consistindo de 4.039 agentes (nós) e 88.234 arestas. Essas informações foram geradas, usando um aplicativo do *Facebook*, para identificar círculos sociais;
- *Fake.Br* [38]: *Corpus* com notícias em português que foram rotuladas manualmente. Esse *dataset* contém 7.200 notícias, sendo 3.600 rotuladas como “true” e 3.600 rotuladas como “fake”. Cada uma dessas notícias é composta pelo seu respectivo texto e os metadados relacionados aos seus dados textuais;
- *Fake News vs Satire* [16]: *DataSet* para diferenciar *Fake News* e Sátiras onde as notícias são codificadas manualmente. A base, oriunda de diversas fontes, é composta por 283 relatos rotulados como *Fake news* e 203 como Satirical. Esses relatos são compostos pelo título, texto e um link para cada artigo;
- *FakeNewsAMT* [27]: Esse repositório de dados fornece os dados da notícia para análise léxica, sintática e semântica. As notícias falsas foram criadas a partir de notícias reais coletadas de assuntos diversos;
- *FakeNewsNet* [2,32]: Essa base de dados fornece notícias rotuladas contendo características linguísticas, visuais e dos agentes da publicação /propagação, incluindo dados relacionados à rede;
- *Kaggle*: O conjunto de dados contém texto e metadados de 244 sites e representa 12.999 postagens no total. Os dados foram extraídos usando a API *webhose.io*. Cada site foi rotulado de acordo com o *BS Detector*, sendo que as fontes de dados sem rótulo foram categorizadas como “Bs”;
- *KV* [35]: Nessa base as notícias têm sujeito, predicado e objeto. Cada notícia tem um rótulo que indica a probabilidade de ser verdadeira. A ferramenta, por meio de uma fusão de conhecimentos, cria um grafo relacionando sujeito com objeto para medir a quantidade de interações e gerar automaticamente o *dataset*;
- *LIAR* [4]: Essa base de dados é coletada de um *website* de checagem de fatos chamado *PolitiFact*. Ele inclui 12.836 notícias de vários contextos como entrevistas de rádio, televisão e discursos de campanha. Os dados foram rotulados manualmente como “*Pants-fire*”, “*False*”, “*Barely-true*”, “*Half-true*”, “*Mostly true*” e “*True*”. Cabe salientar que os dados referentes ao agente se resumem ao nome do autor da postagem;
- *RST-SVM Dataset* [14]: Essa base de dados foi criada a partir de codificadores, usando notícias do *Bluff the Listener*. Esse repositório consiste de 144 notícias

⁴ <https://www.similarweb.com/top-websites/category/News-and-media>

⁵ <https://en.wikipedia.org/wiki/List-of-fake-News-websites>

selecionadas, aleatoriamente, de 2010 até 2014;

- *Signal Media para Evaluating Machine Learning Algorithms for Fake News Detection* [31]: Dataset rotulado com “Fake” ou “Não fake” criado a partir de uma base de notícias da *Signal Media* e uma lista do repositório de confiança de fontes *OpenSources.co*. O citado dataset contém 11.051 artigos, sendo 3.217 categorizados com falsos;
- Twitter e Sina *Weibo* para CSI [13]: Dataset criado com 2.811 artigos rotulados como “Fake” e 2.845 como “True”. A citada base de dados foi obtida a partir do repositório, para detecção de rumores, gerado no artigo [36];
- Twitter para *Automatically Identifying Fake News* [28]: Base de dados que utilizou os datasets PHEME (rumor no Twitter), *CredBank* (credibilidade no Twitter) e *BuzzFeed News Fact-Checking Dataset* (Checagem de fatos no Facebook). Os três datasets precisaram ser alinhados com as mesmas características e rótulos;
- Twitter para *Content Polluters* [22]: Repositório de dados criado para detecção de bots. Esse dataset, obtido a partir do Twitter, foi rotulado manualmente como “Bot” ou “Não Bot”;
- Twitter para *TraceMiner* [34]: Conjunto de dados gerado pela coleta de informações do Twitter com rotulação a partir do site de checagem de fatos Snopes. Nessa base, os rótulos atribuídos às notícias são “Real news” ou “Fake news”.

6. Problemas em aberto

O combate automático às *Fake News* em mídias sociais virtuais é uma nova e emergente área de pesquisa onde se podem destacar alguns problemas em aberto:

- Carência de datasets que forneçam, de forma suficiente, os diferentes dados necessários para detectar e/ou intervir nas *Fake News* em mídias sociais virtuais;
- Trabalhos que levem em consideração aspectos temporais do ciclo de vida da *Fake News* e que, consequentemente, possam intervir mais rapidamente na sua propagação;
- Os trabalhos de detecção de *Fake News* normalmente se limitam a verificar a veracidade das notícias, ignorando o aspecto intencional;
- Extração de características a partir de imagem e/ou áudio, limitando-se assim as análises de mídia somente em texto;

- Métodos que abordem características baseadas na rede que representa a propagação da notícia na mídia social. Nesse caso, podem ser aplicadas técnicas baseadas em grafos;
- Abordagens que procurem agregar diferentes dados para a geração de pesos que podem ser usados, por exemplo, para identificação de reputação;
- Pesquisas que, em vez de realizarem uma classificação binária (*true* ou *false*) de *Fake News*, utilizem probabilidades e/ou pertinências na detecção. Essa linha de trabalho se baseia no fato de que, normalmente, uma notícia intencionalmente falsa é uma mistura de afirmações falsas e verdadeiras;
- Utilização de um comitê de classificadores para determinar se uma notícia é uma *Fake News*. Dessa forma, pode-se agregar diferentes técnicas de classificação durante a detecção;
- Utilização de modelos não supervisionados ou semi-supervisionados devido à carência de datasets rotulados que possuam variedade de dados;
- Estudo sobre o diferente comportamento da *Fake News* em diferentes comunidades (escolar, trabalho e etc) e/ou mídias sociais virtuais (*Weibo*, *WhatsApp* e etc). Isto se deve pela possível mudança de forma de atuação das notícias intencionalmente falsas de acordo com a mídia social utilizada;
- Classificar os agentes de *Fake News* com o objetivo de identificar o seu tipo (*trolls*, *bots* e *cyborgs*). Isto se deve pela possível alteração de comportamento das notícias propositalmente falsas de acordo com o tipo de agente;
- Trabalhos relacionados à intervenção de *Fake News*, tanto para bloqueio, quanto para mitigação. Haja vista que o combate às *Fake News* não se limita à detecção, sendo necessária, também, a intervenção sobre a mesma;
- Ferramentas de combate às *Fake News* que atuem em tempo real e/ou descentralizada na rede. Essa atuação se destaca, pois, quanto mais rápido e extensivo for o combate, menor serão os efeitos nocivos das referidas notícias;
- Abordagens que utilizem o assunto para a análise da notícia, pois assuntos relevantes, normalmente, motivam a criação de notícias intencionalmente falsas;
- Pesquisas que utilizem a reputação dos agentes, tanto

para detecção, quanto para intervenção da notícia propositalmente falsa. Nesse tipo de abordagem é considerado que agentes com baixa reputação sejam potenciais divulgadores de *Fake News*.

7. Considerações Finais

Com a crescente popularidade das mídias sociais virtuais, cada vez mais pessoas consomem notícias online, em vez dos tradicionais meios de comunicação. No entanto, as mídias sociais virtuais também são usadas para divulgar notícias intencionalmente falsas, as chamadas *Fake News*, que podem causar fortes impactos negativos. Nesse artigo é explorado o combate automático às *Fake News* em mídias sociais virtuais. Para tal, a literatura existente foi revisada objetivando, por meio de um levantamento do estado da arte, fornecer subsídios para pesquisas que busquem desenvolver ferramentas para o combate automático às *Fake News* em mídias sociais

virtuais. Tendo como base essa revisão da literatura, dois aspectos significativos podem ser destacados. O primeiro é a carência de datasets, rotulados com *fake* e não *fake*, que disponibilizem não somente os dados da publicação, mas, também, as informações relacionadas à propagação das notícias na mídia social virtual. O segundo aspecto é que as ferramentas computacionais, voltadas para a detecção, vêm se adaptando de acordo com as mudanças nas características das *Fake News*. Uma dessas mudanças é a maior similaridade nas características de escrita, presentes no texto, entre as notícias *fake* e não *fake*. Portanto, as ferramentas que não utilizam somente o conteúdo da notícia na tarefa de detecção de *Fake News* têm se sobressaído. Nesse grupo particular de ferramentas, aquelas baseadas na reputação dos usuários das mídias sociais virtuais se apresentam como uma alternativa para detecção de notícias intencionalmente falsas.

Referências Bibliográficas

- [1] VOSOUGHI, S. et al. (2017). *Rumor gauge: Prediction the veracity of rumors on twitter*. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, 11(4):50:1–50:35.
- [2] SHU, K. et al. (2017). *Fake news detection on social media: A data mining perspective*. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 19(1):22–36.
- [3] CONROY, N. J. et al. (2015). *Automatic deception detection: Methods for finding fake news*. *Association for Information Science and Technology*, 52:1–4.
- [4] Wang, W. Y. (2017). “*liar, liar pants on fire*”: A new benchmark dataset for fake news detection. *Association for Computational Linguistics*, pages 422–426.
- [5] MUSTAFARAJ, E. and Metaxas, P. T. (2017). *The fake news spreading plague: was it preventable?* In *Web Science Conference*, pages 236–239.
- [6] KSHETRI, N. and Voas, J. (2017). *The economics of “fake news”*. *IT Professional*, 19.
- [7] ZHANG, Q. et al. (2018). *Ranking-based method for news stance detection*. In *Companion Proceedings of the The Web Conference 2018, WWW '18*, pages 41–42, Republic and Canton of Geneva, Switzerland. *International World Wide Web Conferences Steering Committee*. Achtert, E. et al. *Global Correlation Clustering Based on the Hough Transform*. *Statistical Analysis and Data Mining*. vol 1(3), pp. 111–127. 2008.
- [8] FLINTHAM, M. et al. (2018). *Falling for fake news: Investigating the consumption of news via social media*. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, pages 376:1–376:10, New York, NY, USA. ACM.
- [9] WANG, P. et al. (2018). *Is this the era of misinformation yet: Combining social bots and fake news to deceive the masses*. In *Companion Proceedings of the The Web Conference 2018, WWW '18*, pages 1557–1561, Republic and Canton of Geneva, Switzerland. *InternationalWorldWideWeb Conferences Steering Committee*.
- [10] CAMPAN, A. and Cuzzocrea, A. (2017). *Fighting fake news spread in online social networks: Actual trends and future research directions*. *2017 IEEE International Conference on Big Data, Boston, MA*, pages 4453–4457.
- [11] RUBIN, V. L. et al. (2015). *Deception detection for news: three types of fakes*. *Association for Information Science and Technology*, 52:83:1–83:4.
- [12] JANZE, C. and Risius, M. (2017). *Automatic detection of fake news on social media platforms*. In *Pacific Asia Conference on Information Systems*, pages 2–16.
- [13] RUCHANSKY, N. et al. (2017). *Csi: A hybrid deep model for fake news detection*. In *CIKM - ACM International Conference on Information and Knowledge Management*, pages 797–806.
- [14] V. L. Rubin et al. (2015). *Towards news verification: Deception detection methods for news discourse*. *HICSS2015*.
- [15] FARAJTABAR, M. et al. (2017). *Fake news mitigation via point process based intervention*. In *ICML - International Conference*

- on Machine Learning, pages 1–18
- [16] GOLBECK, J. et al. (2018). *Fake news vs satire: A dataset and analysis*. In *Proceedings of the 10th ACM Conference on Web Science, WebSci '18*, pages 17–21, New York, NY, USA. ACM.
- [17] LIU, Y. and Xu, S. (2016). *Detecting rumors through modeling information propagation networks in a social media environment*. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 3:46–62.
- [18] MA, J. et al. (2015). *Detect rumors using time series of social context information on microblogging websites*. In *ACM International Conference on Information and Knowledge Management*, pages 1751–1754.
- [19] LI, Y. et al. (2015). *A survey on truth discovery*. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 17:1–16.
- [20] BRAZ, P. and Goldschmidt, R. (2017). Um método para detecção de bots sociais baseado em redes neurais convolucionais aplicadas em mensagens textuais. In *SBSeg 2017*, pages 501–508. 10/11/2017. Buntain, C. and Golbeck, J. (2017).
- [21] FERRARA, E. et al. (2016). *The rise of social bots*. *Commun. ACM*, 59(7):96–104.
- [22] NASIM, M. et al. (2018). *Real-time detection of content polluters in partially observable twitter networks*. In *Companion Proceedings of the The Web Conference 2018, WWW '18*, pages 1331–1339, Republic and Canton of Geneva, Switzerland. International World Wide Web Conferences Steering Committee.
- [23] CIAMPAGLIA, G. L. et al. (2015). *Computational fact checking from knowledge networks*. *PLOS ONE*, 1:1–13.
- [24] SETHI, R. J. (2017). *Crowdsourcing the verification of fake news and alternative facts*. In *ACM Conference on Hypertext and Social Media*, pages 315–316.
- [25] VAVILIS, S. et al. (2014). *A reference model for reputation systems*. *Decision Support Systems*, 1:147–154.
- [26] F.Hendriks, K. B. and Chard, R. (2015). *Reputation systems: A survey and taxonomy*. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, pages 184–197.
- [27] V. P´erez-Rosas et al. (2018). *Automatic detection of fake news*. In *Proceedings of the 27th International Conference on Computational Linguistics*, pages 3391–3401.
- [28] BUNTAIN, C. and Golbeck, J. (2017). *Automatically identifying fake news in popular twitter threads*. In *2017 IEEE International Conference on Smart Cloud (SmartCloud)* pages 208–215.
- [29] BHATT, G. et al. (2018). *Combining neural, statistical and external features for fake news stance identification*. In *Companion Proceedings of the The Web Conference 2018, WWW '18*, pages 1353–1357, Republic and Canton of Geneva, Switzerland. International World Wide Web Conferences Steering Committee.
- [30] WOLOSZYN, V. and Nejd, W. (2018). *Distrustrank: Spotting false news domains*. In *Proceedings of the 10th ACM Conference on Web Science, WebSci '18*, pages 221–228, New York, NY, USA. ACM.
- [31] GILDA, S. (2017). *Evaluating machine learning algorithms for fake news detection*. In *2017 IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCORED)*, pages 110–115.
- [32] K. Shu, et al. (2017). *Exploiting tri-relationship for fake news detection*. *ArXiv abs/1712.07709 (2017): n. pag.*
- [33] TSCHIATSCHEK, S. et al. (2018). *Fake news detection in social networks via crowd signals*. In *Companion Proceedings of the The Web Conference 2018, WWW '18*, pages 517–524, Republic and Canton of Geneva, Switzerland. InternationalWorldWideWeb Conferences Steering Committee.
- [34] WU, L. and Liu, H. (2018). *Tracing fake-news footprints: Characterizing social media messages by how they propagate*. In *Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Web Search and Data Mining, WSDM '18*, pages 637–645, New York, NY, USA. ACM.
- [35] DONG, X. et al. (2014). *Knowledge vault: A web-scale approach to probabilistic knowledge fusion*. In *ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, pages 601–610.
- [36] MA, J. et al. (2016). *Detecting rumors from microblogs with recurrent neural networks*. In *Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'16)*. AAAI Press, pages 3818–3824
- [37] MORAES, M. C. et al. (2019). *Data mining applied in fake news classification through textual patterns*. In *Proceedings of the 25th Brazilian Symposium on Multimedia and the Web (WebMedia '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 321–324.
- [38] MONTEIRO, R. A. et al. (2018). *Contributions to the Study of Fake News in Portuguese: New Corpus and Automatic Detection Results: 13th International Conference, PROPOR 2018, Canela, Brazil, September 24–26, 2018*.
- [39] FACELI, K. et al (2011). *Inteligência Artificial: uma Abordagem de Aprendizado de Máquina*. LTC. isbn = {9788521618805}.
- [40] GOLDSCHMIDT, R. R. et al (2015). *Data Mining. Conceitos, técnicas, algoritmos, orientações e aplicações*. Elsevier. isbn = {9788535278224}.
- [41] MEJOVA, Y. and Kalimeri, K. (2020). *Advertisers Jump on Coronavirus Bandwagon: Politics, News, and Business*. ArXiv. Vol 2003.00923.

Avaliação de excessos termodinâmicos para fluidos de altas densidades em base à teoria perturbacional de esferas duras - KLRR

Paulo Couceiro

MAXAM

Avenida del Partenón, 16, 28042, Madri, Espanha.

paulocouceiro@gmail.com

RESUMO: Teorias fundamentadas na mecânica estatística têm-se mostrado uma alternativa viável na quantificação de propriedades termodinâmicas de fluidos à altas pressões e densidades. Neste sentido, a teoria perturbacional KLRR tem permitido obter resultados excepcionalmente precisos quando comparados com simulações Monte Carlo. No campo da ciência das detonações, e outras como geofísica ou astrofísica, uma equação de estado capaz de prever o comportamento de fluidos em condições críticas ou supercríticas, a um atrativo custo computacional, é desejado. Portanto, a implementação da teoria perturbacional de esferas duras KLRR é apresentada, para a avaliação de excessos termodinâmicos de fluidos à altas densidades e pressões. Finalmente, os resultados obtidos neste trabalho são comparados com simulações Monte Carlo e outras teorias, como a teoria da perturbação variacional.

PALAVRAS-CHAVE: Teoria perturbacional. Equação de estado. Detonação. KLRR.

ABSTRACT: Theories based on statistic mechanics have proved to be a plausible alternative for predicting the thermodynamic properties of fluids at high densities and pressures. In this sense, the perturbational KLRR theory has permitted to obtain exceptionally accurate results when compared to Monte Carlo simulations. In the field of detonation science, and others such as geophysics or astrophysics, an equation of state capable of predicting the thermodynamic behavior of fluids in critical and supercritical conditions, with an attractive computational cost, is desirable. Thus, the implementation of the KLRR perturbational theory to evaluate thermodynamic excesses of high densities and pressures fluids is presented. Finally, the results obtained in this paper are compared to Monte Carlo simulations and other theories, such as the variational theory.

KEYWORDS: Perturbational theory. Equation of state. Detonation. KLRR.

1. Introdução

A descrição das propriedades termodinâmicas de fluidos à altas pressões e densidades é extremamente importante para a modelagem de vários fenômenos físico-químicos, como o estado de atmosferas planetárias, fluxo de magma, reações químicas, detonações de explosivos, entre outros [1, 2]. A qualidade dessas modelagens, assim como sua confiabilidade, está diretamente relacionada com a equação de estado (EOS) aplicada ao problema. Assim, tanto sua precisão como consistência adquirem um papel único na descrição desses processos.

Os problemas resultantes da interação de fluidos em condições críticas ou supercríticas podem ser solucionados, de forma exata, através de simulações numéricas com o método de Monte Carlo (MC).

Entretanto, a intensa demanda computacional requerida nessas simulações inviabiliza sua aplicação na indústria, tornando-o, muitas vezes, em uma referência usada para comprovar a precisão de teorias termodinâmicas e equações de estado mais tratáveis computacionalmente.

Ainda que muitas equações de estado empíricas ou semi-empíricas ainda estejam em uso, a disponibilidade de equações baseadas em princípios fundamentais da estatística mecânica já é uma realidade. Algumas dessas teorias são a teoria variacional Mansoori-(MCRSR) [3, 4], teoria das equações integrais das aproximações esféricas-média de hiper-rede de Zerah e Hansen (HMSA) [5] e a teoria perturbacional KLRR [6, 7, 8], todas consistentes com simulações de Monte Carlo.

A teoria KLRR deve sua denominação aos

pesquisadores Kang, Lee, Ree e Ree [6], cujo estudo culminou numa extensão da teoria de esferas duras WCA (Weeks, Chandler e Andersen) numa faixa de altas densidades, sendo considerada uma das mais bem-sucedidas teorias no campo de estudo deste trabalho [7, 8, 9]. Uma das suas mais importantes inovações foi a introdução de um parâmetro de corte ou ponto de separação, o qual divide o potencial intermolecular em um potencial de referência e outro perturbacional. Com o tempo, a teoria KLRR sofreu importantes melhorias, principalmente com Byers Brown & Horton [7] e Victorov & Gubin [8]. A versão melhorada deste último autor ficou conhecida como KLRR-T.

Este trabalho tem por objetivo a implementação da teoria perturbacional KLRR no contexto de fluidos à altas pressões e densidades. Ademais, avaliar-se-á a precisão do modelo em comparação às simulações Monte Carlo [5, 10] e a teoria variacional MCRSR, para um grande número de temperaturas e rigidezes intermoleculares.

2. Fundamentação teórica

2.1 Teoria KLRR

A separação resultante do potencial intermolecular em uma porção definida como potencial de referência $u_0(r)$ e outra perturbacional $u_l(r)$ é descrita por

$$\left. \begin{aligned} u_0(r) &= 0 \\ u_1(r) &= u(r) \end{aligned} \right\}, \quad r > \lambda,$$

$$\left. \begin{aligned} u_0(r) &= u(r) - u_\lambda(r) \\ u_1(r) &= u_\lambda(r) \end{aligned} \right\}, \quad r < \lambda;$$

λ é o ponto de separação do potencial e $u_\lambda(r)$ é o potencial suavizado, definido como

$$u_\lambda(r) = u(\lambda) + (r - \lambda)u'(\lambda) \quad (3)$$

A forma do potencial $u(r)$ escolhida neste trabalho é o da forma EXP-6 e o ponto de separação λ é o proposto por Byers Brown [7]

$$\lambda = r_m(1 + \rho_\sigma^{n/3})^{1/n} \quad (4)$$

onde $\rho_\sigma = \rho^*/\sqrt{2}$; $\rho^* = Nr_m^3/V$ é a densidade reduzida; V é o volume; N é o número de moléculas; r_m é a distância de mínimo potencial.

O excesso de energia livre de Helmholtz A_{ex} é dada pelos dois primeiros termos da expansão perturbacional

$$A_{ex} = A_0 + 2\pi\rho \int_D^\infty u_1(r)g_0(r)r^2dr \quad (5)$$

onde $g_0(r)$ é a função de distribuição radial e A_0 é a energia livre de Helmholtz do fluido de referência.

A energia livre do fluido de referência pode ser aproximada para um fluido de esfera dura e diâmetro D , o qual pode ser calculado através da equação de Carnahan-Starling [11]

$$\beta A_{HS} = \eta(4 - 3\eta)/(1 - \eta)^2 \quad (6)$$

onde A_{HS} é a energia livre de esfera dura; $\beta = 1/k_B T$; k_B é a constante de Boltzmann; e η é a fração de compactação definido como

$$\eta = \frac{\pi N D^3}{6V} \quad (7)$$

A próxima etapa consiste em conhecer o diâmetro D do fluido. O processo de cálculo é iterativo em base ao critério WCA [7]. Uma primeira aproximação do diâmetro se consegue com a relação de Berker-Henserson [12]

$$D_1 = \int_0^\lambda 1 - \exp[-\beta u_0] dr \quad (8)$$

que se incorpora em um processo iterativo fundamentado no critério WCA, tal que

$$D = \frac{D_1}{(1 + \Delta)} \quad (9)$$

onde Δ é calculado de acordo com [7]

$$\Delta = \int_0^\lambda \chi_{HS}(r/D; \eta) d(1 - \exp[-\beta u_0]) \quad (10)$$

onde a função χ_{HS} é definida por

$$\chi_{HS}(s; \eta) = \int_1^s \frac{g_{HS}(t; \eta) t^2 dt}{g_{HS}(1; \eta)} - s + 1 \quad (11)$$

Segundo esses mesmos autores, a equação (9) é o critério WCA escrito explicitamente em função do diâmetro D do fluido de referência. Como o valor numérico de Δ é próximo a unidade, o método de resolução pode ser iterativo, em função de sucessivas substituições de D na expressão de Δ .

Entretanto, um dos principais problemas na aplicação de modelos perturbacionais de esferas duras, na estimação das propriedades termodinâmicas de fluidos densos, é a dificuldade de descrever as funções de distribuição radiais $g(r)$. Uma alternativa é o uso de estratégias baseadas na inversa da transformada de Laplace da função $rg(r)$ [8]. Neste trabalho, entretanto, aplica-se a representação analítica proposta por Trokhymchuk *et al.* [13], válida para densidades entre $0.2 \leq \rho \sigma^3 \leq 0.9$.

O cálculo do segundo termo da equação (5), definido como a energia livre de primeira ordem na teoria KLRR, é obtida com a metodologia apresentada em [7]. Nesta solução, aplica-se o potencial α -exponencial-6 (EXP-6) reduzida, tal que

$$u^*(s) = \begin{cases} \frac{6 \exp[\alpha(1-s)] - \frac{\alpha}{s^6}}{(\alpha-6)}, & s \geq c^* \\ +\infty, & s < c^* \end{cases} \quad (12)$$

onde $s=r/r_m$ é a distância reduzida e c^* é o diâmetro do núcleo reduzido.

Uma vez conhecida a energia livre de Helmholtz do sistema, todas as demais propriedades termodinâmicas podem ser calculadas através de derivadas parciais da energia livre, para uma dada temperatura T e volume V . Assim, o fator de compressibilidade $Z=PV/Nk_B T$ vem dado por

$$Z = 1 + \beta \rho \left(\frac{\partial A_{ex}}{\partial \rho} \right)_\beta \quad (13)$$

onde P é a pressão e o excesso de energia interna U_{ex} ,

por

$$U_{ex} = \left(\frac{\partial \beta A_{ex}}{\partial \beta} \right)_\rho \quad (14)$$

As derivadas parciais da energia livre A_{ex} com respeito à ρ e β são calculadas numericamente.

3. Aplicação da teoria KLRR

Foram calculados os excessos termodinâmicos ao longo de quatro isotermas ($T^* = 2,5 - 5 - 20 - 100$) combinadas com até cinco valores de α (10,5; 11,5; 13,5; 15,5 e 17,5), de tal modo que se pudesse cobrir um extenso espectro de temperaturas e rigidezes intermoleculares. Os demais parâmetros do potencial de referência são $r_m = 3,85 \text{ \AA}$ e $\epsilon/k_B = 122$.

Os resultados obtidos neste trabalho serão comparados com simulações Monte Carlo [5, 10] para potências do tipo EXP-6, ademais de resultados publicados de teorias como a MCRSR e KLRR-T melhorada [9].

As diferenças entre os resultados provenientes de simulações de Monte Carlo e os obtidos neste trabalho serão quantificadas através

$$\delta Z = \frac{Z - Z_{MC}}{Z_{MC}} \quad \delta U_{ex} = \frac{U_{ex} - U_{MC}}{|U_{MC}|} \quad (15)$$

onde δ representa a diferença relativa; Z_{MC} é o fator de compressibilidade e U_{MC} é o excesso de energia interna, ambos obtidos com simulações Monte Carlo.

3. Resultados

Primeiramente, apresentam-se nas **figuras 1 e 2** os resultados do fator de compressibilidade e o excesso da energia interna U_{ex} , para distintas isotermas, oriundas de simulações Monte Carlo, para potenciais EXP-6 com $\alpha = 13,5$, juntamente com as curvas obtidas com a teoria KLRR implementada neste trabalho. Os resultados indicam a excelente representatividade da teoria com as simulações numéricas diretas. Igualmente, cálculos similares foram realizados para os demais valores de α , obtendo resultados também satisfatórios.

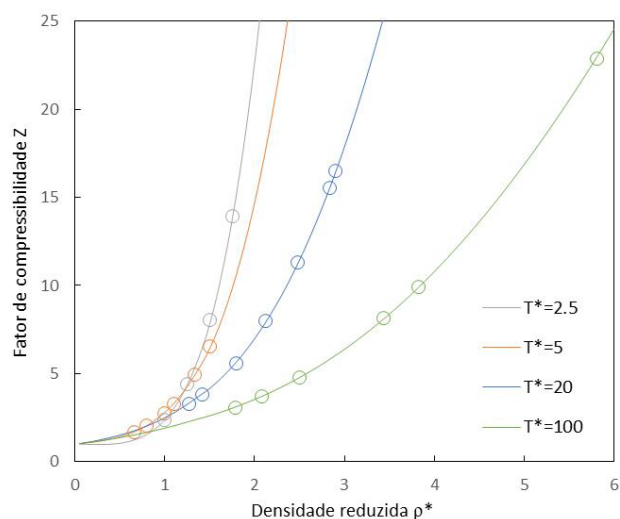


Fig. 1 – Isotermas do fator de compressibilidade em função da densidade reduzida para 13,5. Resultados das simulações Monte Carlos são representadas por círculos.

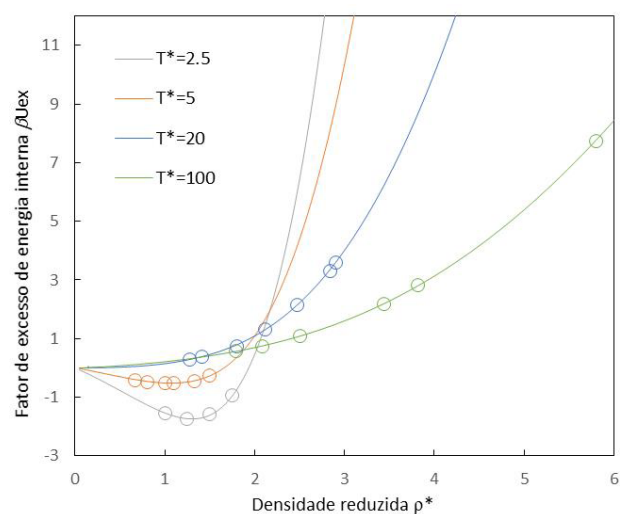


Fig. 2 – Isotermas do fator de excesso de energia interna em função da densidade reduzida para 13,5. Resultados das simulações Monte Carlos são representadas por círculos.

Uma segunda etapa consiste na avaliação global da precisão da teoria perturbacional estudada. As diferenças relativas médias entre todas as isotermas para cada valor de α são reportadas na **tabela 1**. Os resultados obtidos com a teoria KLRR, quando comparados com as simulações Monte Carlo, juntamente com os resultados da MCRSR e KLRR-T

melhorada [9], indicam que o presente trabalho alcançou resultados satisfatórios para os excessos termodinâmicos estudados. Os parâmetros Z e U_{ex} apresentaram diferenças médias totais excelentes, de 1,26% e 1,33%, respectivamente. Entretanto, a versão melhorada da teoria KLRR-T exibiu um desempenho superior ao do presente trabalho, com médias totais de 0,77% e 1,15%, enquanto que um pior resultado foi observado na MCRSR, com médias totais de 2,35% e 2,39%, para Z e U_{ex} , respectivamente.

Tab. 1 – Diferenças relativas médias para MCRSR, KLRR-T e KLRR (este trabalho) para isotermas $T^* = 2,5 - 5,0 - 20 - 100$.

α	dZ (%)			dU _{ex} (%)		
	MCRSR	KLRR-T	KLRR	MCRSR	KLRR-T	KLRR
10,5	3,85	1,14	1,69	1,89	1,28	0,84
11,5	3,00	0,78	1,28	2,13	1,38	1,36
13,5	1,92	0,62	1,05	2,09	0,91	1,52
15,5	1,66	0,79	1,07	2,98	1,26	1,87
17,5	1,33	0,51	1,20	2,88	0,90	1,08
Média	2,35	0,77	1,26	2,39	1,15	1,33

Esses resultados indicam que mesmo a versão mais simples da teoria KLRR (implementada neste trabalho) é mais precisa que a teoria variacional MCRSR. Este fato indica que a teoria KLRR é a metodologia mais interessante na quantificação dos excessos termodinâmicos de fluidos à altas pressões e densidades, como podem ser os estados resultados das detonações de explosivos.

5. Conclusões

A teoria KLRR desenvolvida por Kang, Lee, Ree e Ree [6], e melhorada por Byers Brown & Horton [7], foi implementada com êxito neste trabalho. Combinada com a descrição semi-analítica da função de distribuição radial proposta por Trokhymchuk et al. [13], a capacidade preditiva da teoria foi comprovada para um grande espectro de temperaturas, densidades e rigidezes intermoleculares. Os resultados foram comparados com simulações numéricas obtidas com o método de Monte Carlo e com as teorias variacional MCRSR e perturbacional KLRR-T. A versão da teoria KLRR estudada neste artigo mostrou-se mais precisa

que a MCRSR, embora menos que a teoria KLRR-T melhorada por Victorov & Gubin [8].

Assim, a equação de estado resultante da aplicação da teoria KLRR para o potencial EXP-6 permite a obtenção de excessos termodinâmicos com uma considerável precisão numérica para um amplo rango de temperaturas, densidades e rigidezes

intermoleculares. Um dos benefícios desses resultados é a possibilidade de obter um conjunto de dados de referência para estabelecer os coeficientes polinomiais de Chebyshev, necessários para a aplicação da equação de estado THEOSTAR [14], em um maior domínio termodinâmico.

Referências Bibliográficas

- [1] Bogdanova, Y. A.; Gubin, S. A.; Victorov, S. B.; Gubina, T. V.; A Theoretical Model of the Equation of State of a TwoComponent Fluid with the exp-6 Potential Based on Perturbation Theory; High Temperature, 2015, 53, 4, 481.
- [2] Gubin, S. A.; Victorov, S. B.; The accuracy of the theories based on statistical physics for the thermodynamic modeling of state parameters of dense pure gases; Journal of Physics: Conf. Series, 2019, 1205, 012020.
- [3] Ross, M.; A highdensity fluidperturbation theory based on an inverse 12thpower hardsphere reference system; The Journal of Chemical Physics, 1979, 71, 1567.
- [4] Ree, F. H.; A statistical mechanical theory of chemically reacting multiphase mixtures: Application to the detonation properties of PETN; The Journal of Chemical Physics, 1984, 81, 1251.
- [5] Fried, L. E.; Howard, W. M.; An accurate equation of state for the exponential-6 fluid applied to dense supercritical nitrogen; The Journal of Chemical Physics, 1998, 109, 7338.
- [6] Kang, H. S.; Lee, C. S.; Ree, T.; Ree, F. H.; A perturbation theory of classical equilibrium fluids; The Journal of Chemical Physics, 1985, 82, 414.
- [7] Byers Brown, W.; Horton, T. V.; Hard-sphere perturbation theory for classical fluids to high densities; Molecular Physics: An International Journal at the Interface Between Chemistry and Physics, 1988, 63, 125.
- [8] Victorov, S. B.; Gubin, S. A.; A New Accurate Equation of State for Fluid Detonation Products Based on an Improved Version of the KLRR Perturbation Theory; Proceedings of the Thirteenth International Detonation Symposium, Arlington, 2006.
- [9] Desbiensa, N.; Dubois, V.; New developments of the CARTE thermochemical code: II – Evaluation of the accuracy of the KLRR perturbation theory and treatment of mixtures; EPJ Web of Conferences, 2010, 10, 00013.
- [10] Desbiens, N.; Dubois, V.; Matignon, C.; Sorin, R.; Improvements of the CARTE Thermochemical Code Dedicated to the Computation of Properties of Explosives; J. Phys. Chem., 2011, 115, 12868.
- [11] Carnahan, N. F.; Starling, K. E.; Equation of State for Nonattracting Rigid Spheres; J. Chem. Phys., 1969, 51, 635.
- [12] Barker, J. A.; Henderson, D.; Perturbation Theory and Equation of State for Fluids. II. A Successful Theory of Liquids; J. Chem. Phys., 1967, 47, 4714.
- [13] Trokhymchuk, A.; Nezbeda, I.; Jirsák, J.; Henderson, D.; Hard-sphere radial distribution function again; J. Chem. Phys., 2005, 123, 024501.
- [14] Byers Brown, W.; Analytical representation of the excess thermodynamic equation of state for classical fluid mixtures of molecules interacting with α exponentialsix pair potentials up to high densities; The Journal of Chemical Physics, 1987, 87, 566.

Efeitos do plano-terra finito sobre a impedância e o ganho de uma antena monopolo de quarto de onda

Fabiano Carvalho dos Santos Assumpção^a, Maurício Henrique Costa Dias^b

^a Instituto Militar de Engenharia (IME)

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

^b Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Rio de Janeiro, Brasil

*fabianoassumpcao@id.uff.br

RESUMO: Em sistemas táticos de radiocomunicações em veículos ou embarcações, é comum usar antenas monopolo de quarto de onda aproveitando a própria estrutura como plano-terra. Comumente, assume-se plano-terra condutor perfeito e infinito para análise, especialmente quando o tamanho da estrutura é alguns comprimentos de onda maior. Este trabalho apresenta uma análise numérica dos efeitos do tamanho e da forma geométrica do plano-terra nos parâmetros de performance da antena. O posicionamento assimétrico do monopolo no plano-terra também é analisado. Boa concordância entre resultados simulados e disponíveis na literatura foi observada, quanto ao tamanho do plano-terra. Analisando o posicionamento assimétrico, observou-se que o lóbulo principal do diagrama de ganho vertical tende a direcionar-se para onde há maior porção de plano-terra restante. No plano horizontal, o comportamento circular é perdido quando a antena se aproxima das bordas do plano-terra. A impedância de entrada mostra pouca variação até a frequência natural de ressonância.

PALAVRAS-CHAVE: Antenas monopolo. Comunicações táticas. Diagrama de radiação de antenas. Plano-terra.

ABSTRACT: In tactical radio systems in vehicles or ships, it is common to use quarter-wave monopoles taking advantage of the structure itself as the ground-plane. Usually, a flat infinite perfect conductor ground-plane is assumed for analysis, especially when the structure length is few wavelengths larger. This work presents a numerical analysis of the antenna performance parameters for different sizes and geometric shapes for the ground-plane. Moreover, the monopole asymmetric positioning on the ground-plane is analyzed. Regarding the ground-plane size, it is possible to observe a good correlation between the simulated results and the literature. From the asymmetric positioning analysis, the main lobe of the vertical gain pattern tends to point to where there is the greatest portion of ground-plane left. In the horizontal plane, as the antenna approaches the ground-plane edges, it loses its circular behavior. The input impedance varies very little up to the natural resonance frequency.

KEYWORDS: Antenna radiation patterns. Ground-plane. Monopole antennas. Tactical communications.

1. Introdução

A instalação de antenas em viaturas ou embarcações voltadas para aplicações táticas é um problema à parte a ser analisado, em função de diversos aspectos. Dentre eles destacam-se: o posicionamento relativo da antena na estrutura, como em [1, 2, 3, 4]; o acoplamento mútuo entre a antena e os elementos condutores de maior dimensão, dada a relativa proximidade entre eles; o fato do local de fixação da antena ser um plano-terra finito [5]; aspectos de compatibilidade eletromagnética [6, 7]; etc.

No cenário específico da operação de sistemas de radiocomunicações navais, é possível destacar alguns trabalhos correlatos, especialmente analisando antenas

dipolo ou monopolo, muito utilizadas nas faixas de HF a UHF. Em [6], a exposição humana à radiação não ionizante em navios é analisada. Já em [8, 9, 10, 11, 12, 13], por exemplo, são apresentados projetos de antenas utilizando o mastro ou a chaminé como parte do elemento radiador. Nesses trabalhos, explorou-se a possibilidade de controlar o comportamento de radiação pela defasagem de corrente e pelo posicionamento espacial entre os elementos radiadores.

O desempenho de uma antena monopolo de $\lambda/4$ sobre plano-terra infinito e composto por material PEC, sigla em inglês para condutor elétrico perfeito, é amplamente conhecido, vide [14, 15]. Entretanto, nas situações reais, as estruturas que atuam como plano-terra são finitas e imperfeitas. Nesse cenário, a equivalência da antena

monopolo com a antena dipolo fica parcialmente comprometida, pois a imagem virtual associada à reflexão no plano-terra não representa os efeitos decorrentes das difrações nas bordas do plano [16], alterando entre outros aspectos, a reatância de entrada da antena, o diagrama de ganho [5] e o coeficiente de reflexão [17].

Nesse contexto, poucos estudos são encontrados sobre a influência de diferentes dimensões e formatos do plano-terra finito no desempenho de antenas em embarcações, bem como sobre o efeito do posicionamento de antenas tipo monopolo fora do centro do plano-terra. O uso de técnicas numéricas e/ou assintóticas é recomendável, tais como o Método dos Momentos, para planos-terra pequenos, e a Teoria Geométrica da Difração, para planos maiores [18]. De qualquer forma, pouca discussão se encontra na literatura de forma detalhada sobre o problema específico em questão.

Assim, este trabalho tem por objetivo apresentar uma visão analítica sobre os efeitos do plano-terra finito nos principais parâmetros de uma antena monopolo de $\lambda/4$, em especial na impedância de entrada e no diagrama de ganho. De forma complementar a trabalhos correlatos, como [16, 19], a discussão inclui os efeitos do posicionamento assimétrico da antena no plano-terra.

A seção 2 aborda a metodologia usada para realização das análises pretendidas. Já as seções 3 e 4 apresentam, respectivamente, resultados referentes a tamanhos e formatos diferentes de plano-terra, comparando-os com valores de referência. Na seção 5, o posicionamento assimétrico da antena no plano-terra é analisado, comparando as figuras de mérito simuladas com a situação em que a antena está no centro do plano-terra. Por fim, a seção 6 conclui o trabalho.

2. Metodologia

Adotou-se uma abordagem numérica para a análise, realizada por meio de um *software* de análise eletromagnética, o *CST Studio Suite*® [20]. O solver utilizado foi o *Time Domain Solver*, que se baseia na técnica de integração finita, eficiente para aplicações em altas frequências.

Para as simulações foi utilizada uma antena

monopolo de $\lambda/4$, com comprimento de 0,125 m, ou seja, $\lambda = 0,5$ m, o que remete à frequência de ressonância teórica de 600 MHz. Tais parâmetros foram escolhidos pois apresentam boa relação entre tempo de simulação e convergência do método numérico. O monopolo foi modelado como um filamento metálico com raio $r_a = 1$ mm sobre um plano-terra PEC finito em $z = 0$. Em todas as simulações, as seguintes figuras de mérito foram geradas: impedância de entrada (resistência e reatância); e diagrama de ganho.

Para analisar os resultados obtidos com as simulações, foi escolhido como caso de referência, uma antena monopolo vertical de $\lambda/4$, sobre plano-terra infinito composto por material PEC. A partir deste cenário foram variados os formatos (circular ou quadrado) do plano-terra e seu tamanho. Em seguida, foram fixados o formato e o tamanho do plano-terra e variou-se o posicionamento da antena.

Os efeitos do tamanho e formato do plano-terra foram analisados a partir de simulações com o monopolo centralizado sobre um plano-terra quadrado, com lado $l = 3\lambda, 7\lambda$ e 20λ e sobre um plano-terra circular, com diâmetro $D = 3\lambda, 7\lambda$ e 20λ , exemplificados na **figura 1**. Esses tamanhos foram escolhidos para permitir a comparação com resultados disponíveis em [5], como forma de validação das simulações. Por último, realizaram-se simulações do monopolo posicionado fora do centro do plano-terra, com o formato quadrado de $l = 3\lambda$. A escolha pelo plano-terra de menor tamanho para análise do posicionamento assimétrico do monopolo foi para evidenciar melhor as eventuais diferenças observadas nos parâmetros da antena, em relação ao caso de referência.

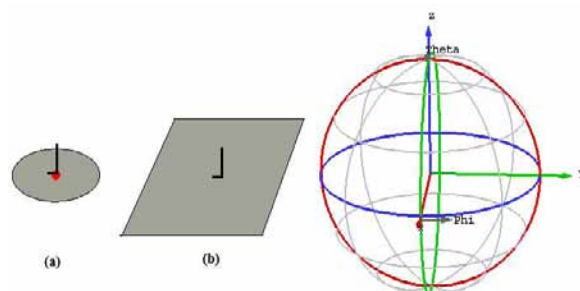


Fig. 1 – Monopolo de $\lambda/4$ fixado no centro de um plano-terra (a) circular de diâmetro D e (b) quadrado de lado l .

3. Influência do tamanho do plano-terra

3.1 Comportamento de radiação

Considerando um plano-terra PEC infinito, o máximo de radiação de uma antena monopolo de $\lambda/4$ ocorre a 90° de elevação ($\phi = 90^\circ$), situação de referência. Contudo, quando o plano-terra é finito, o diagrama de ganho é modificado principalmente pelas difrações ocorridas nas bordas e pelo *gap* de alimentação [16].

Como nessa simulação a antena está fixada no centro do plano-terra, as distâncias para a borda do plano nos eixos x e y são iguais, e, portanto, os diagramas de ganho nos planos $\phi = 0$ e 90° são idênticos. Os resultados de diagrama de ganho nos planos $\phi = 0$ ou 90° disponíveis em [5], para o caso do plano-terra circular, são reproduzidos na **figura 2**, ao passo que os simulados estão dispostos na **figura 3**. Observa-se que há boa concordância entre as curvas respectivas. Os resultados da simulação do cenário de plano-terra quadrado, por sua vez, estão ilustrados na **figura 4**. A **tabela 1** reproduz as principais métricas observadas nos diagramas de ganho dos dois cenários simulados.

Dos resultados obtidos, verifica-se que a direção de máxima radiação é distinta da situação de referência, chegando até 31° de diferença. Quanto maior o tamanho do plano-terra, mais próximo de $\theta = 90^\circ$ o ângulo de máxima radiação fica e menores são os lóbulos em $\theta = 0^\circ$, ou seja, caso o plano-terra seja pequeno, uma grande parcela de potência é radiada na direção perpendicular. Outro fato interessante é que, à medida que o tamanho do plano-terra aumenta, o ganho máximo também aumenta, e o número de lóbulos secundários na proximidade de $\theta = 0^\circ$ aumenta também, porém com potência cada vez menor.

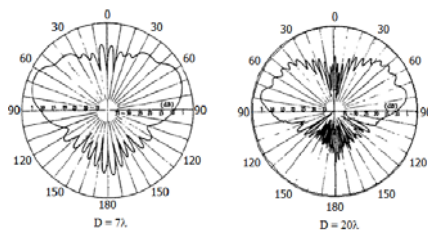


Fig. 2 – Diagramas de ganho (plano vertical), em dB, de uma antena monopolo de $\lambda/4$, no centro de um plano-terra circular de diâmetro D (adaptado de [5]).

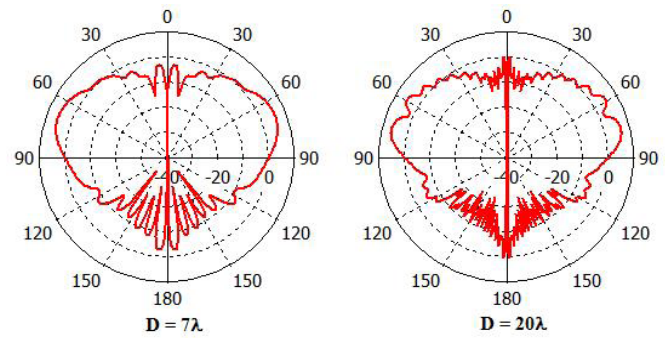


Fig. 3 – Diagramas de ganho (plano vertical), em dB, simulados de uma antena monopolo de $\lambda/4$, no centro de um plano-terra circular de diâmetro D .

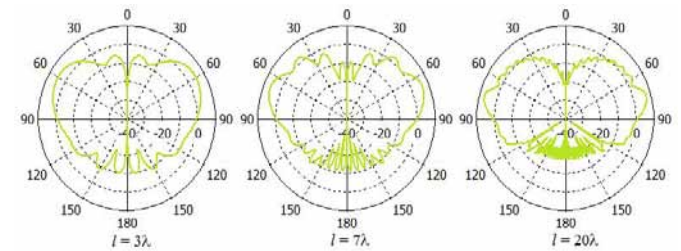


Fig. 4 – Diagramas de ganho (plano vertical), em dB, simulados de uma antena monopolo de $\lambda/4$, no centro de um plano-terra quadrado de lado l .

Tab. 1 – Ganho máximo e direção de máxima radiação para diferentes planos-terra

Tamanho do plano-terra [λ]	Formato do plano-terra	Ganho máximo [dB]	Direção de radiação do lóbulo principal [$^\circ$]
3	Quadrado	4,7	59
	Circular	4,43	62
7	Quadrado	5,96	68
	Circular	5,5	69
20	Quadrado	6,96	75
	Circular	6,21	76

3.2 Impedância de entrada

A alteração do tamanho do plano-terra não gera alterações significativas na impedância de entrada, independentemente do formato, pelo menos até a frequência natural de ressonância da antena. Nessa faixa, para plano-terra quadrado, a variação na resistência de entrada entre os diferentes tamanhos de plano-terra não ultrapassou 2Ω e a diferença máxima para referência foi de 5Ω . Na faixa acima da frequência natural de ressonância, houve uma variação maior, chegando até 20Ω para os diferentes

tamanhos de plano-terra e $50\ \Omega$ para a referência, conforme verifica-se na **figura 5**.

Quanto à reatância de entrada, ela apresenta comportamento semelhante ao da resistência, porém com variações menores que aquelas observadas para resistência até a frequência de ressonância natural. A diferença de reatância para os diferentes tamanhos de plano-terra quadrado não ultrapassou $1\ \Omega$ e para a referência $3\ \Omega$. Para as frequências simuladas acima da ressonância essa diferença chegou até $22\ \Omega$ para os diferentes tamanhos de plano-terra quadrado e $88\ \Omega$ para a referência, como ilustrado na **figura 6**. Para plano-terra circular, o comportamento é parecido com o do plano-terra quadrado, porém as variações encontradas em frequências acima da frequência natural de ressonância foram maiores e se estenderam por uma faixa maior, vide **figuras 7 e 8**.

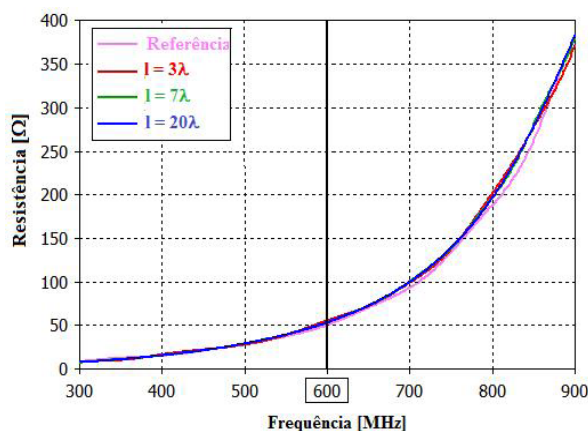


Fig. 5 – Resistência de entrada para uma antena monopolo de $\lambda/4$, no centro de um plano-terra quadrado de diferentes tamanhos.

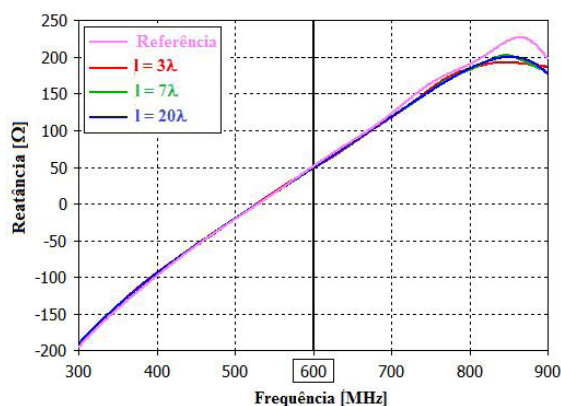


Fig. 6 – Reatância de entrada para uma antena monopolo de $\lambda/4$, no centro de um plano-terra quadrado de diferentes tamanhos.

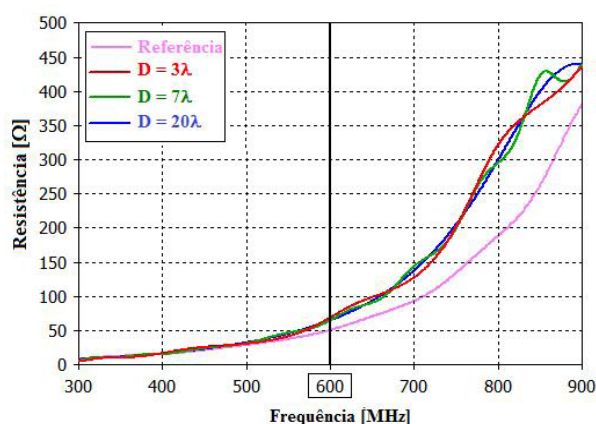


Fig. 7 – Resistência de entrada para uma antena monopolo de $\lambda/4$, no centro de um plano-terra circular de diferentes tamanhos.

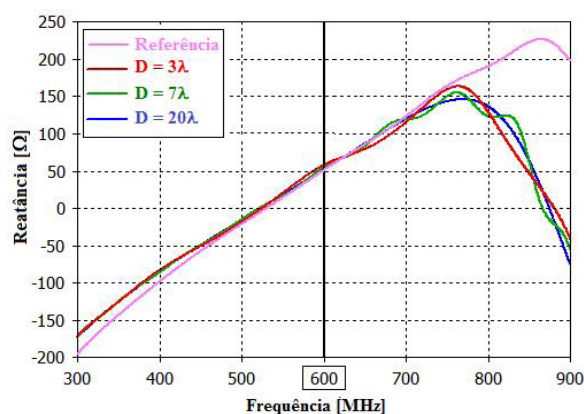


Fig. 8 – Reatância de entrada para uma antena monopolo de $\lambda/4$, no centro de um plano-terra circular de diferentes tamanhos.

4. Influência do formato do plano-terra

4.1 Comportamento de radiação

Antenas sobre planos circulares recebem diversas contribuições oriundas das bordas do plano-terra, todas em fase, por isso apresentam maior radiação em torno de $\theta = 0^\circ$ em relação às antenas sobre planos-terra quadrados, como é possível observar na **figura 9**. Ainda, em [21], verificou-se que planos-terra retangulares apresentam resultados similares aos de planos-terra quadrados. Desta forma, destaca-se que o formato do plano-terra apresenta influência mais perceptível na quantidade de energia radiada em $\theta = 0$ e 180° .

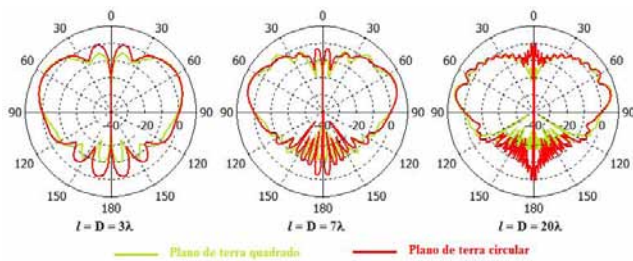


Fig. 9 – Comparação do comportamento de radiação simulado (corte vertical do diagrama de ganho, em dB) de uma antena monopolo de $\lambda/4$, no centro de um plano-terra quadrado e circular.

4.2 Impedância de entrada

De acordo com as simulações, foi observado que alterações no formato do plano-terra geram diferenças praticamente nulas na resistência e na reatância até a frequência natural de ressonância da antena. A partir dessa frequência, maiores variações são observadas, sendo que o plano-terra quadrado apresenta resultados mais próximos ao da situação de referência e a diferença entre os valores de impedância para os diferentes tipos de plano-terra é maior para a resistência de entrada, vide **figuras 10 e 11**. Além disso, a diferença entre os valores simulados e os valores de referência da reatância de entrada diminuem à medida que o tamanho do plano-terra aumenta, sendo mais significativa para o plano-terra quadrado, que diminui de 32,6% para 10,4% do valor de referência, enquanto para o plano-terra circular diminui de 96,7% para 92,4%. Contudo, para a resistência de entrada há um aumento dessa diferença em ambos os formatos, de 0,8% para 4,2% do valor da referência para o plano-terra quadrado, e de 7,4% para 19% para o plano-terra circular.

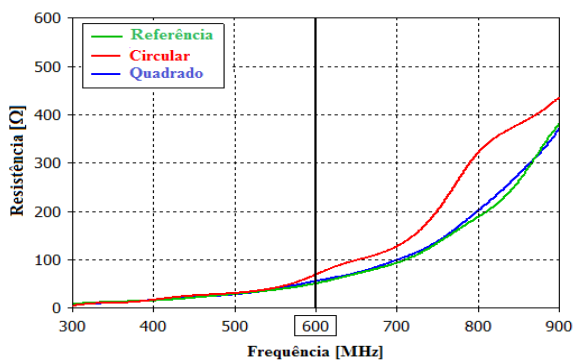


Fig. 10 – Resistência de entrada para uma antena monopolo de $\lambda/4$, no centro de um plano-terra de diferentes formatos e tamanhos fixos $l = 3\lambda$ e $D = 3\lambda$.

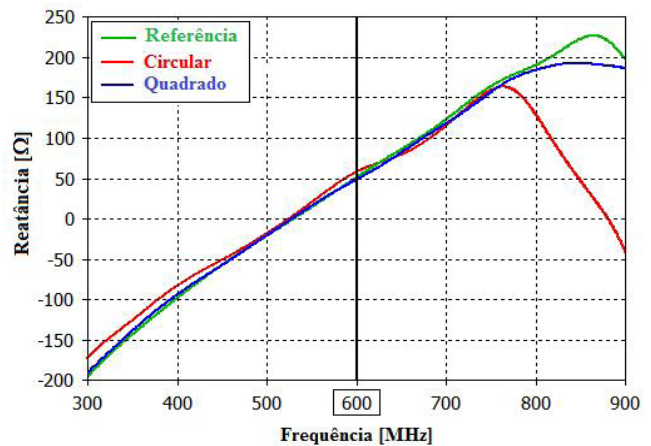


Fig. 11 – Reatância de entrada para uma antena monopolo de $\lambda/4$, no centro de um plano-terra de diferentes formatos e tamanhos fixos $l = 3\lambda$ e $D = 3\lambda$.

5. Influência da proximidade da borda do plano-terra

Em [16, 19] são apresentados casos de estudo específicos que investigam os efeitos das reflexões e difrações causadas pela proximidade da borda do plano-terra de um monopolo polarizado verticalmente quanto ao comportamento de radiação. A fim de complementar esses estudos, foram realizadas simulações em uma antena monopolo de $\lambda/4$ fixada fora do centro do plano-terra quadrado e finito de lado $l = 3\lambda$, em distâncias intermediárias, igualmente espaçadas, ao longo dos eixos x e y até a borda, em $\phi = 0, 45$ e 90° , conforme indicado na **figura 12**. Para auxiliar a análise do efeito da proximidade da borda do plano-terra são observadas as distâncias da antena para a borda do plano, no eixo x representada por d_x e no eixo y por d_y , conforme exemplificado na **figura 12**. Ainda na **figura 12**, destacam-se pontos: em vermelho, onde d_x varia e d_y é constante ($\phi = 0^\circ$); em amarelo, onde d_x e d_y variam e são iguais ($\phi = 45^\circ$); e em azul, onde d_x é constante e d_y varia ($\phi = 90^\circ$). A referência para análise é a antena fixada no ponto central do plano-terra (0,0).

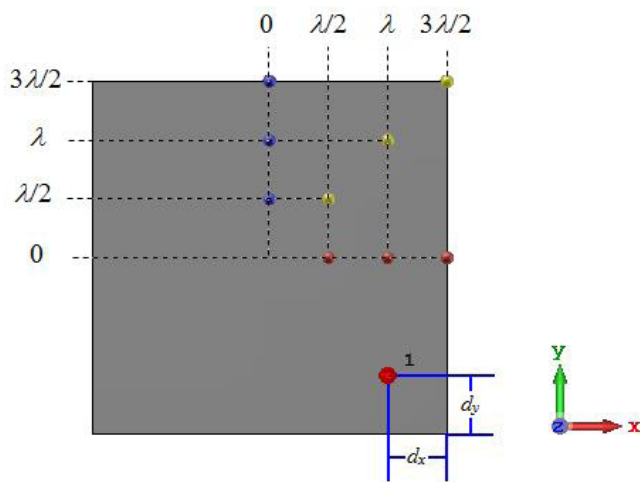


Fig. 12 – Pontos em que foram feitas as simulações da análise de posicionamento assimétrico de monopolo de $\lambda/4$ no plano quadrado, marcados em azul, amarelo e vermelho, e distâncias d_x e d_y para a borda do plano-terra.

5.1 Comportamento de radiação

Como visto na **figura 13**, o caso de referência apresenta simetrias marcantes em função da posição central do monopolo, como se observa nos planos de corte verticais xz ($\phi = 0^\circ$) e yz ($\phi = 90^\circ$) dos diagramas de ganho. Espera-se perda dessa simetria entre os planos xz e yz à medida que a antena se aproxima da borda.

Primeiramente foi analisado o comportamento das principais figuras de mérito, posicionando a antena ao longo do eixo x nos pontos $(\lambda/2, 0)$, $(\lambda, 0)$ e $(3\lambda/2, 0)$, marcados em vermelho na **figura 12**, para os quais a distância da antena até a borda do plano d_x é igual, respectivamente, a λ , $\lambda/2$ e 0 e d_y é constante e igual a $3\lambda/2$. Deste modo, espera-se que o diagrama de ganho em $\phi = 0^\circ$, direção onde a antena foi posicionada, apresente alterações mais significativas em relação aos demais planos.

Conforme a **figura 14**, observa-se que não há mais simetria entre os planos $\phi = 0$ e 90° e em relação ao eixo z , como esperado. Observa-se que, ao posicionar a antena ao longo do eixo x positivo, o lóbulo principal se direciona para o lado em que há maior porção do plano-terra, ou seja, ao diminuir d_x ao longo de $\phi = 0^\circ$, o diagrama de ganho apresenta máxima radiação na direção $\phi = 180^\circ$. Ainda, a diferença entre os lóbulos em $\phi = 180^\circ$ e em $\phi = 0^\circ$ aumenta à medida que a antena se aproxima da borda, chegando até 6,75 dB. Por fim,

ressalta-se que, na borda do plano-terra no plano $\phi = 0^\circ$, o ganho máximo se reduz significativamente em comparação ao ganho nas outras posições, alcançando 3,44 dB de diferença em relação à antena no ponto de maior ganho, $(\lambda, 0)$.

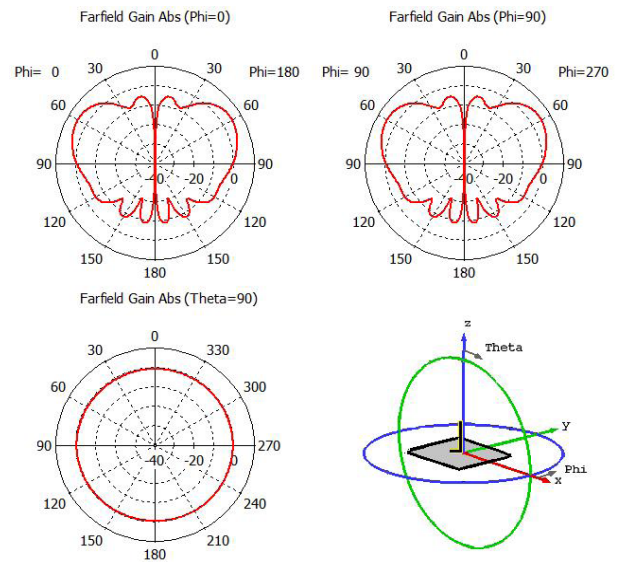


Fig. 13 – Diagramas de ganho, em dB, de um monopolo de $\lambda/4$ no centro do plano-terra quadrado de lado $l = 3\lambda$, nos planos $\phi = 0$ e 90° e $\theta = 90^\circ$.

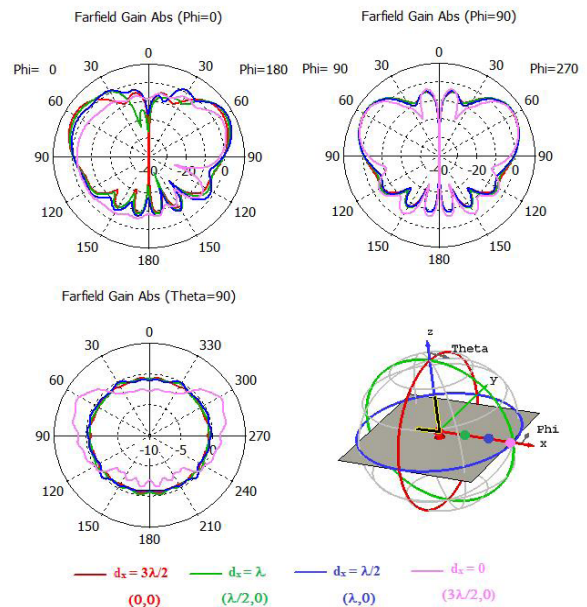


Fig. 14 – Diagramas de ganho, em dB, nos planos $\phi = 0$ e 90° e $\theta = 90^\circ$, para uma antena monopolo de $\lambda/4$ fora do centro do plano-terra quadrado, em diversas posições ao longo do eixo x .

No plano $\phi = 90^\circ$, o comportamento de radiação sofre poucas alterações no formato e mantém a simetria em relação ao eixo z , sendo visível apenas pequena diferença nos ganhos. Nas posições intermediárias, a variação do ganho em relação à referência é, em geral, menor que 1 dB e em pequena faixa chega até 6 dB. Quando a antena é fixada na borda do plano, ocorre a maior variação em relação à referência, sendo de 10 dB entre $\theta = 0$ e 30° e de 6,2 dB entre $\theta = 90$ e 180° .

Por sua vez, no plano $\theta = 90^\circ$, para posições intermediárias, os diagramas de ganho apresentam poucas variações ao aproximar a antena da borda, e cada um deles varia menos de 1 dB para todo ϕ , sendo considerados praticamente circulares. Entretanto, quando a antena está posicionada na borda do plano-terra, o diagrama de ganho tem mudança em seu formato, fugindo do aspecto circular, com variações de até 3 dB, e máxima radiação em $\phi = 63$ e 296° .

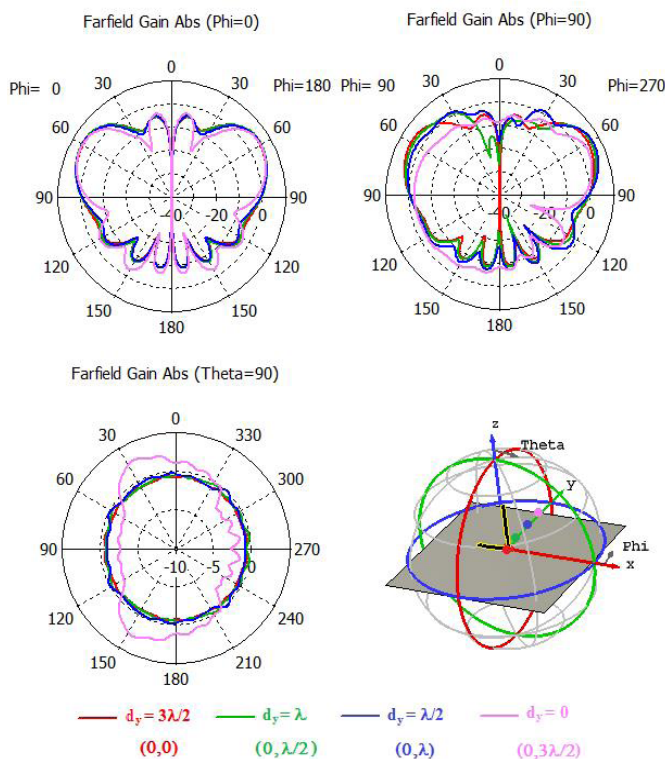


Fig. 15 – Diagramas de ganho, em dB, nos planos $\phi = 0$ e 90° e $\theta = 90^\circ$, para uma antena monopolo de $\lambda/4$ fora do centro do plano-terra, em diversas posições ao longo do eixo y .

De forma análoga à situação em que as variações do posicionamento da antena se deram apenas no eixo x , foram simuladas também as situações correspondentes às regiões azul ($d_x = 0$) e amarela ($d_x = d_y$) da **figura 12**. Os resultados são reproduzidos nas **figuras 15 e 16**, respectivamente, e essencialmente replicam os comportamentos observados no cenário anterior. No plano vertical que contém o eixo em que o monopolo foi deslocado, o lóbulo principal do ganho aponta para o lado que contém maior porção do plano-terra, e no plano horizontal, o diagrama só perde a forma circular quando a antena é posicionada na borda do plano-terra.

5.2 Impedância de entrada

Ao analisar a impedância em diversas posições fora do centro do plano-terra é possível observar que, para toda a faixa de frequências analisada, não há alterações significativas na impedância de entrada. Em geral, a variação da reatância e da resistência entre os diferentes posicionamentos intermediários em relação à referência é menor que 2Ω . Já para a antena posicionada na borda do plano-terra, há uma variação maior dos valores de impedância em relação à referência, de aproximadamente, 20Ω . Ainda, verificou-se que a resistência apresenta maior variação que a reatância em relação à referência, quando a antena é posicionada na borda, vide **figuras 17 e 18**. Por fim, os resultados obtidos ao se alterar o posicionamento da antena ao longo do eixo x são iguais aos resultados obtidos quando o posicionamento é variado ao longo do eixo y .

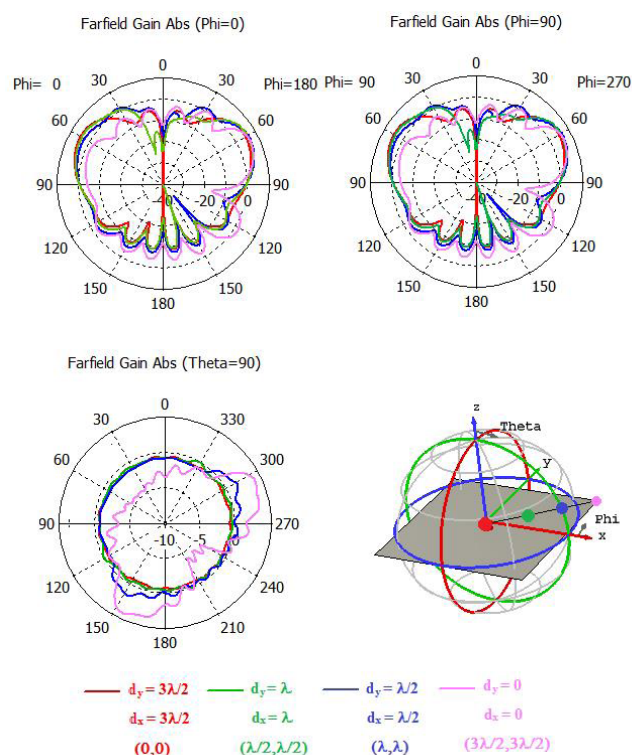


Fig. 16 – Diagramas de ganho, em dB, nos planos $\phi = 0$ e 90° e $\theta = 90^\circ$, para uma antena monopolo de $\lambda/4$ fora do centro do plano-terra, em diversas posições ao longo dos eixos x e y .

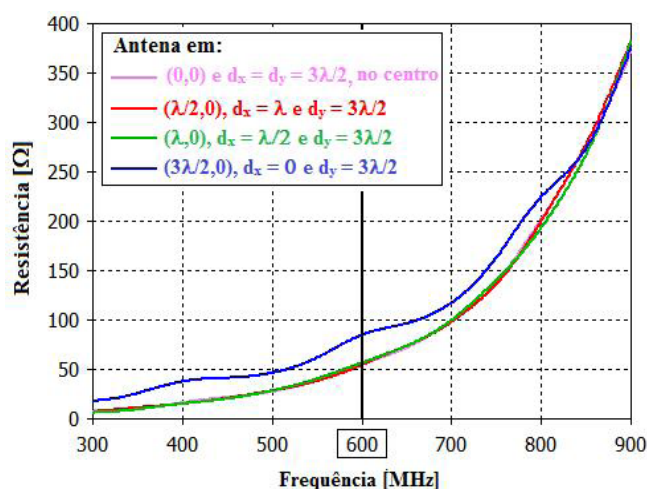


Fig. 17 – Resistência de uma antena monopolo de $\lambda/4$ sobre um plano-terra quadrado, posicionada ao longo do eixo x .

6. Conclusão

Este trabalho abordou a situação do uso de antenas

monopolo de $\lambda/4$ sobre plano-terra condutor finito, e em posições assimétricas, muito comum em sistemas de radiocomunicações embarcados em viaturas ou navios. O objetivo foi avaliar os efeitos dessas características práticas nos parâmetros de desempenho da antena, tomando por referência a antena teórica monopolo sobre plano PEC infinito. Foco foi dado à impedância de entrada e ao diagrama de ganho.

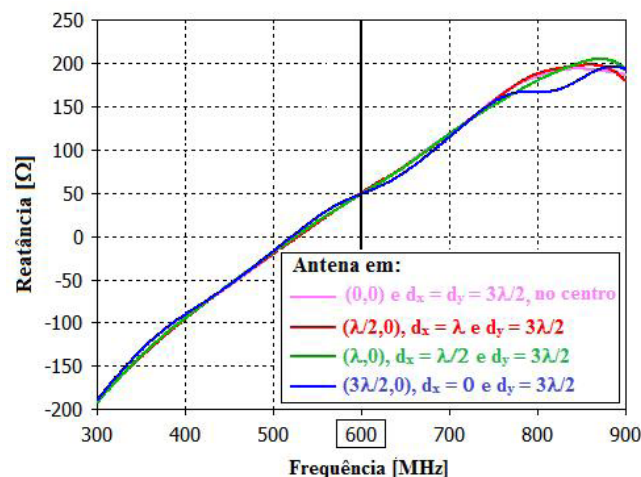


Fig. 18 – Reatância de uma antena monopolo de $\lambda/4$ sobre um plano-terra quadrado, posicionada ao longo do eixo x .

A análise se baseou em simulações numéricas (usando CST Studio) de uma antena monopolo fina sobre plano-terra PEC finito e em posições diversas além da central. O caso teórico da antena sobre plano-terra infinito serviu como referência para comparar os valores de impedância de entrada (em uma faixa de frequências ao redor da ressonância natural) e os diagramas de ganho (na frequência de ressonância).

Para o caso do monopolo centralizado, inicialmente foram verificados os efeitos do tamanho e da forma do plano-terra nos parâmetros de desempenho da antena. Quanto ao comportamento de radiação, os resultados foram coerentes com os disponíveis na literatura, que apontam alterações principalmente na direção de máximo ganho, bem como ao longo do eixo que contém o monopolo, tanto para planos quadrados quanto para circulares. Quanto maior o plano-terra, mais os resultados se aproximam daqueles do caso de referência. Além disso, foi observado que conforme o tamanho do plano-terra aumenta o ganho máximo também aumenta.

Valores de largura ou diâmetro do plano-terra entre 3 e 20 comprimentos de onda foram considerados na análise. A forma do plano-terra pouco influenciou o comportamento geral. A impedância de entrada, por sua vez, é relativamente robusta, com alterações pouco significativas para frequências até a de ressonância. Mesmo após essa frequência, as variações observadas foram relativamente pequenas, ainda assim. Verificou-se, ainda, que para as simulações com formato do plano-terra circular foram obtidos resultados com as maiores variações em relação à referência.

Por sua vez, a análise do posicionamento assimétrico apontou duas tendências importantes de mudança do diagrama de ganho, à medida que o monopolo se afasta do centro e se aproxima de uma das bordas. No plano vertical, o diagrama deixa de ser simétrico e passa a ter uma direção preferencial de apontamento, que é aquela na qual resta a maior porção do plano-terra. Já no plano horizontal, a forma circular apresentada pela antena de referência se perde quando o monopolo está muito próximo da borda ou sobre ela. A análise foi feita para plano-terra com largura de 3λ , e os efeitos tendem

a se tornar menos agudos para larguras maiores. A impedância de entrada também se mostrou robusta a esta assimetria, com pouca variação em relação à referência para as frequências abaixo e próximas da ressonância natural.

Destaca-se, por fim, que as alterações de desempenho de antenas monopolo decorrentes do uso de plano-terra não-ideal apresentadas neste artigo foram observadas também em trabalho recente mais amplo, sobre o efeito do posicionamento de antenas monopolo e dipolo em diferentes zonas de uma fragata típica da Marinha do Brasil [22]. Em várias situações mais complexas de acoplamento entre as antenas e partes da estrutura da embarcação lá avaliadas, foi possível observar claramente a presença dos mesmos efeitos do plano-terra finito aqui discutidos.

Agradecimentos

À Diretoria de Comunicações de Tecnologia da Informação da Marinha (DCTIM) por disponibilizar a ferramenta de simulação numérica utilizada neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] Dias, M. H. C.; Silveira, A. C.; Dantas, M. B. T.; Análise da sintonia de uma antena monopolo HF em viatura táctica de comando e controle. XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, pp. 85-89, 2018.
- [2] Ignatenko, M.; Filipovic, D. S.; Application of Characteristic Mode Analysis to HF Low Profile Vehicular Antennas. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), pp. 850-851, Julho 2014.
- [3] Sanghai, S.; Ignatenko, M.; Filipovic, D. S.; Two arm offset fed inverted-L antenna for vehicular HF communications. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), pp. 1604-1605, Julho 2015.
- [4] Allen, B.; Ignatenko, M.; Filipovic, D. S.; Low Profile Vehicular Antenna for Wideband High Frequency Communications. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), pp. 115-116, 2016.
- [5] Burberry, R. A.; VHF and UHF antennas. Londres: Institution of Electrical Engineers, 1992.
- [6] Alvarez, L. F. S.; Dopazo, F. J. C.; Human Exposure to Electromagnetic Fields on Marine Platforms: Safety Regulations, Simulation and Measurement. IEEE Latin America Transactions, vol. 16, nº 1, pp. 46-51, 2018.
- [7] CISPR-25; Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics for protection of receivers used on board vehicles, International Electrotechnical Commission. Genebra, 2008.
- [8] Marrocco, G.; Mattioni, L.; Naval structural antenna systems for broadband HF communications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 1065-1073, Abril 2006.
- [9] Marrocco, G.; Mattioni, L.; Martorelli, V.; Naval structural antenna systems for broadband HF communications—Part II: Design methodology for real Naval platforms. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 3330-3337, Novembro 2006.
- [10] Mattioni, L.; Lanzo, D. D.; Marrocco, G.; Naval structural antenna systems for broadband HF communications—part III: Experimental evaluation on scaled prototypes. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 1882-1887, Julho 2008.
- [11] Best, S. R.; On the use of scale brass models in HF shipboard communication antenna design. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 44, nº 2, pp. 12-23, 2002.
- [12] Jagannath, T.; Kulkarni, P. P.; Tyagi, V. M.; HF broadband antenna design considerations on warships. Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, pp. 421-428, 1999.
- [13] Chen, Y.; Wang, C.; HF Band Shipboard Antenna Design Using Characteristic Modes. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, nº 3, pp. 1004-1013, 2015.
- [14] Balanis, C. A.; Antenna theory analysis and design, 4th ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

- [15] Kraus, J. D.; Marhefka, R. J.; Khan, A. S., *Antennas and Wave Propagation*, 5^a ed., New York: McGraw-Hill, 2017.
- [16] Baker, D. G.; *Electromagnetic Compatibility: Analysis and Case Studies in Transportation*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [17] Perotoni, M. B.; Vieira, M. S.; Dos Santos, E. T.; Barbin, S. E.; *Wideband Planar Monopole Antennas for the Brazilian Digital TV System*. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, pp. 102-106, 2015.
- [18] Weiner, M. M.; *Monopole Antennas*. Bedford, Massachusetts, 2003.
- [19] Živković, Z.; Senić, D.; Bodendorf, C.; Skrzypczynski, J.; Šarolić, A.; *Radiation pattern and impedance of a quarter wavelength monopole antenna above a finite ground plane*. *SoftCOM, International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, pp. 1-5, 2012.
- [20] Dassault Systèmes, *CST Studio Suite 3D EM simulation and analysis software*. Disponível em: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>. Acesso em: 10/11/2019.
- [21] Huynh, M. C.; Stutzman, W.; *Ground plane effects on planar inverted-F antenna (PIFA) performance*. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 150, nº 4, pp. 209-213, 2003.
- [22] Assumpção, F. C. S.; *Análise Eletromagnética do Posicionamento de Antenas de Radiocomunicações em Navios de Marinha*; Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Brasil, 2020.

Modelagem dinâmica pelo método dos elementos finitos para análise de vibrações em estruturas espaciais sujeitas a esforços externos

Ricardo L O Rosa*, Maurício Gruzman

Instituto Militar de Engenharia (IME)

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

*ricardoliveira.eng@gmail.com

RESUMO: A modelagem dinâmica de estruturas espaciais é utilizada em diversos tipos de projetos que visam construir estruturas tridimensionais, permitindo a análise e simulação da estrutura por meios computacionais, prevendo o comportamento do sistema e possibilitando a correção de parâmetros do projeto antes da construção de um protótipo ou produto. Este trabalho se propõe a apresentar em detalhes os passos para a modelagem dinâmica de uma estrutura espacial utilizando o método dos elementos finitos (MEF), representando cada seção reta regular do sistema como um elemento finito unidimensional (EFU). O modelo adotado para demonstrar a metodologia, formado por oito EFUs, apresentou resultados compatíveis com a solução analítica para as deformações na estrutura em decorrência da força gravitacional e comportamento vibracional condizente com uma estrutura física real ao ser perturbada inicialmente por uma determinada força de impulso. Conclui-se ao final que o método apresentado pode ser utilizado com eficácia na modelagem dinâmica vibracional de estruturas espaciais.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Dinâmica. Vibrações. Estruturas Espaciais. Método dos Elementos Finitos. Elementos Finitos Unidimensionais.

ABSTRACT: The dynamic modeling of spatial structures is used in several types of projects that aim to build three-dimensional structures, allowing the analysis and simulation of the structure by computational means, predicting behavior of the system and enabling the correction of project parameters before the construction of a prototype or product. This paper aims to present a methodology for dynamic modeling of spatial structures using the finite element method (FEM), representing each regular straight section of the system as a one-dimensional finite element (OFE). The model adopted to demonstrate the methodology, formed by eight OFEs, presented results compatible with the analytical solution for deformations in the structure due to gravitational force and vibrational behavior consistent with a real physical structure when initially disturbed by a certain impulse force. It was concluded at the end that the presented method can be used effectively in the vibrational dynamic modeling of spatial structures.

KEYWORDS: Dynamic Modeling. Vibrations. Space Structures. Finite Element Method. One-dimensional Finite Elements.

1. Introdução

Em diversos campos da engenharia a utilização de estruturas físicas é fundamental, seja para um invólucro ou carcaça de algum aparelho eletrônico, para a armação de um prédio, treliças que suportarão um teto, plataformas, chassis de veículos, dentre tantas outras aplicações.

Com a evolução das ferramentas computacionais, tornou-se cada vez mais comum e acessível a utilização de simulações que permitem realizar testes preliminares nos projetos das estruturas antes de construir o protótipo ou produto. Com isso, detecta-

se a necessidade de ajustes e correções no projeto por meio da simulação que leva à economia de recursos e menor tempo para se chegar ao produto.

Com relação à modelagem dinâmica e simulação de estruturas espaciais, uma das características dinâmicas mais relevantes analisadas nos projetos é a vibração, pois se a frequência angular de excitação externa (força externa que age na estrutura) coincidir com uma das frequências angulares naturais de vibração do sistema, ocorrerá o fenômeno de ressonância, causando o colapso da estrutura, como o caso exemplificado por [1] da ponte de Tacoma, que se rompeu devida a ressonância causada pela vibração

induzida pelo vento. Diversos autores já abordaram formas de se realizar a modelagem dinâmica de uma estrutura, como [2], que modelou pelo MEF uma estrutura espacial do tipo treliça baseada em estruturas espaciais utilizadas em satélites. Em [3], utiliza-se uma análise modular pela técnica dos grafos de ligação para um sistema composto por uma viatura e um subsistema de armas instalado que permite que os subsistemas veículo e armamento sejam analisados separadamente e em conjunto. Os autores de [4,5] modelaram um tubo de armamento como uma estrutura flexível sujeita a carga móvel (representando um disparo) pelo MEF. Por meio desta última análise, [4] propôs a inclusão de um absorvedor passivo de vibrações que permitiu reduzir a amplitude das oscilações em cerca de 46% nas simulações realizadas, demonstrando a eficácia e otimização que simulações podem trazer a um projeto.

O presente artigo se propõe a apresentar, de maneira concisa, uma metodologia para aplicar o MEF na modelagem dinâmica de estruturas espaciais diversas, demonstrando por meio da aplicação do método em uma estrutura simples composta por oito elementos, com o objetivo de prever e analisar o comportamento vibracional do sistema.

2. Fundamentação teórica

A presente fundamentação teórica para a modelagem dinâmica e análise de vibrações pelo MEF se baseia principalmente nas obras de [1,6,7]. Cada EFU que compõe a estrutura é modelado como um elemento espacial (ES), que é formado pela combinação dos quatro tipos de EFU básicos, de barra (EB), eixo (EE), viga plana vertical (VV) e de viga plana horizontal (VH), e possui doze graus de liberdade (GL) conforme mostrado na **tabela 1**. A **figura 1** apresenta os quatro EFU básicos e a **figura 2** apresenta o ES com seus respectivos sistemas de coordenadas e deslocamentos relacionados a cada GL.

Tab. 1 – Tipos de elementos finitos unidimensionais.

Elemento	Deslocamentos possíveis	GL
Barra	Colinear ao seu eixo longitudinal x	2
Eixo	Rotacional em torno do seu eixo longitudinal x	2
Viga Plana Vertical	Transversal ao seu eixo longitudinal x, no sentido de seu eixo vertical y e rotacional em torno do seu eixo transversal horizontal z	4
Viga Plana Horizontal	Transversal ao seu eixo longitudinal x, no sentido do seu eixo horizontal z e rotacional em torno de seu eixo transversal vertical y	4
Geral ou Espacial	Colinear ao seu eixo longitudinal x, transversal ao seu eixo longitudinal x, no sentido do seu eixo horizontal z e vertical y e rotacional em torno de seus eixos x, y e z	12

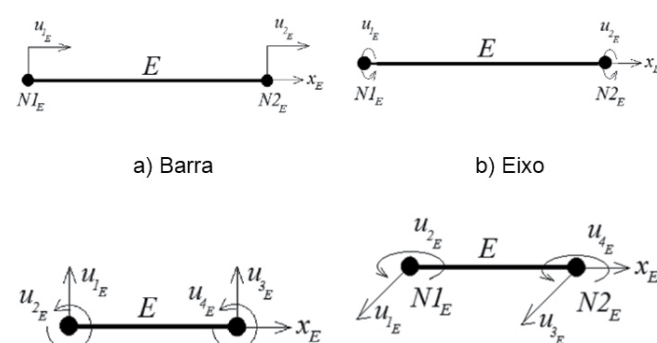


Fig. 1 – EFU básicos. Fonte: [7] (adaptada).

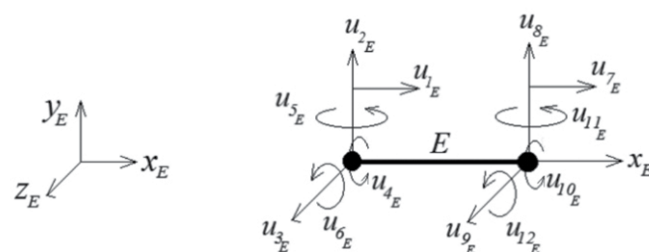


Fig. 2 – Elemento Espacial. Fonte: [7] (adaptada).

Deseja-se, com a modelagem dinâmica, simular o comportamento da estrutura quando sujeita a esforços externos representados pelo vetor f . Os deslocamentos ou vibrações que ocorrem no sistema são representados pelo vetor de deslocamentos u , um vetor composto pelos deslocamentos de cada grau de liberdade do sistema que é calculado conforme a **equação 1**, onde $[M]$, $[C]$ e $[K]$ são, respectivamente, as matrizes de massa, de amortecimento e de rigidez do sistema.

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = f \quad (1)$$

Para calcular \mathbf{u} , deve-se determinar antes as matrizes $[M]$ e $[K]$ do sistema, que por sua vez são determinadas pelas respectivas matrizes $[K]_{Ei}$ e $[M]_{Ei}$ dos elementos Ei que compõem o sistema. A matriz $[C]$ é obtida de maneira proporcional após a obtenção de $[K]$ e $[M]$, conforme será visto nas seções seguintes.

2.1 Obtenção das matrizes de rigidez e de massa para os elementos

As matrizes $[K]_{Ei}$ e $[M]_{Ei}$ dos elementos que compõem o sistema utilizadas neste artigo correspondem às matrizes de ES, ou seja, $[K]_{ES}$ e $[M]_{ES}$, uma vez que com essas matrizes todos os deslocamentos possíveis dos quatro EFU básicos são contemplados.

Uma vez calculadas as matrizes de rigidez $[K]_{EX}$ conforme **equações 2 a 5**, para os elementos básicos $X = EB, EE, EVV$ e EVH respectivamente, calcula-se a matriz $[K]_{ES}$ por meio da **equação 6**, em que ${}_{EX}[T]_{ES}$ é a matriz que correlaciona o vetor de deslocamentos do ES com o do elemento básico EX, ou seja, $u_{EX} = {}_{EX}[T]_{ES} u_{ES}$.

E_E, A_E, L_E, G_E, J_E e I_E são respectivamente: o módulo de elasticidade, a área transversal, o comprimento, módulo de elasticidade transversal, momento polar de inércia da seção transversal e momento de inércia da seção transversal do elemento E.

$$[K]_{EB} = \frac{E_E A_E}{L_E} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[K]_{EE} = \frac{G_E J_E}{L_E} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[K]_{EVV} = \frac{E_E I_E}{L_E^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L_E & -12 & 6L_E \\ 6L_E & 4L_E^2 & -6L_E & 2L_E^2 \\ -12 & -6L_E & 12 & -6L_E \\ 6L_E & 2L_E^2 & -6L_E & 4L_E^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[K]_{EVH} = \frac{E_E I_E}{L_E^3} \begin{bmatrix} 12 & -6L_E & -12 & -6L_E \\ -6L_E & 4L_E^2 & 6L_E & 2L_E^2 \\ -12 & 6L_E & 12 & 6L_E \\ -6L_E & 2L_E^2 & 6L_E & 4L_E^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[K]_{ES} = {}_{EB}[T]_{ES}^T \cdot [K]_{EB \cdot EB} [T]_{ES} + {}_{EE}[T]_{ES}^T \cdot [K]_{EE \cdot EE} [T]_{ES} + {}_{EVV}[T]_{ES}^T \cdot [K]_{EVV \cdot EVV} [T]_{ES} + {}_{EVH}[T]_{ES}^T \cdot [K]_{EVH \cdot EVH} [T]_{ES} \quad (6)$$

Assim como foi feito para o cálculo de $[K]_{EX}$, calcula-se $[M]_{EX}$ conforme **equações 7 a 10** para os elementos básicos EB, EE, EVV e EVH respectivamente, onde ρ_E é a massa específica do material do elemento E, e então, calcula-se $[M]_{ES}$ por meio da **equação 11**.

$$[M]_{EB} = \frac{\rho_E A_E L_E}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[M]_{EE} = \frac{\rho_E J_E L_E}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[M]_{EVV} = \frac{\rho_E A_E L_E}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L_E & 54 & -13L_E \\ 22L_E & 4L_E^2 & 13L_E & -3L_E^2 \\ 54 & 13L_E & 156 & -22L_E \\ -13L_E & -3L_E^2 & -22L_E & 4L_E^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[M]_{EVH} = \frac{\rho_E A_E L_E}{420} \begin{bmatrix} 156 & -22L_E & 54 & 13L_E \\ -22L_E & 4L_E^2 & -13L_E & -3L_E^2 \\ 54 & -13L_E & 156 & 22L_E \\ 13L_E & -3L_E^2 & 22L_E & 4L_E^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[M]_{ES} = {}_{EB}[T]_{ES}^T \cdot [M]_{EB \cdot EB} [T]_{ES} + {}_{EE}[T]_{ES}^T \cdot [M]_{EE \cdot EE} [T]_{ES} + {}_{EVV}[T]_{ES}^T \cdot [M]_{EVV \cdot EVV} [T]_{ES} + {}_{EVH}[T]_{ES}^T \cdot [M]_{EVH \cdot EVH} [T]_{ES} \quad (11)$$

2.2 Obtenção das matrizes de rigidez e de massa para a estrutura

Depois de calculadas $[K]_{Ei}$ e $[M]_{Ei}$, calcula-se as matrizes de rigidez e de massa para o sistema, $[K]$ e $[M]$ respectivamente, por meio das **equações 12 e 13**.

$$[K] = \sum_{i=1}^n {}_{Ei}[T]_G^T \cdot [K]_{Ei \cdot Ei} [T]_G \quad (12)$$

$$[M] = \sum_{i=1}^n {}_{Ei}[T]_G^T \cdot [M]_{Ei \cdot Ei} [T]_G \quad (13)$$

2.3 Considerações de engastamento nas equações de movimento da estrutura

Quando existirem restrições físicas a determinados deslocamentos da estrutura, os tornando nulos, esta condição deve ser levada em conta na modelagem eliminando-se nos vetores da **equação 1** as linhas e nas matrizes as linhas e as colunas correspondentes a esses deslocamentos.

2.4 Frequências angulares naturais de vibração

Um sistema com n graus de liberdade possuirá n modos de vibração. Cada modo de vibração X_i está associado a uma frequência angular natural de vibração ω_{n_i} . Esses valores podem ser encontrados resolvendo a **equação 14**.

$$[K] - \omega_n^2[M]X = 0 \quad (14)$$

2.5 Obtenção da matriz de amortecimento

Uma vez obtidas as matrizes $[K]$ e $[M]$ do sistema, já reduzidas considerando as restrições de movimento conforme descrito na seção 2.3, calcula-se a matriz de amortecimento $[C]$ pela **equação 15**, conforme método apresentado em [1, 8], onde as constantes de proporcionalidade α e β são determinadas pelas **equações 16 e 17**, conhecendo-se previamente os fatores de amortecimento ξ_i (relacionados aos modos de vibração i).

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{2\omega_{n_1}\omega_{n_2}(\xi_1\omega_{n_2} - \xi_2\omega_{n_1})}{\omega_{n_2}^2 - \omega_{n_1}^2} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2\omega_{n_2} - \xi_1\omega_{n_1})}{\omega_{n_2}^2 - \omega_{n_1}^2} \quad (17)$$

2.6 Forças, elementos de rigidez e de massa que agem sobre os nós da estrutura

Quando forças externas, elementos de rigidez ou

elementos de massa agem sobre os nós da estrutura, para considerá-los no modelo, basta somar seus valores na posição dos vetores ou matrizes correspondentes. Para o vetor coluna f , soma-se o valor das forças externas na linha correspondente ao deslocamento do mesmo nó onde a força é aplicada e de mesmo sentido. Para as matrizes $[K]$ e $[M]$, soma-se os valores dos elementos de rigidez e de massa, respectivamente, na posição da diagonal principal igual ao índice do deslocamento do mesmo nó e sentido desses elementos.

2.7 Funções de interpolação dos elementos básicos

Para obter aproximações para o deslocamento em um ponto intermediário $0 < x_E < L_E$ aos nós de um determinado elemento E , ou forças equivalentes que agem sobre os nós em decorrência de forças concentradas ou distribuídas entre os nós, usa-se as funções de interpolação ψ conforme descrito em [7] e apresentadas pelas **equações 18 e 19** para o EB e EVV respectivamente.

$$\begin{cases} \psi_{1EB} = 1 - \frac{x_E}{L_E} \\ \psi_{2EB} = \frac{x_E}{L_E} \\ \psi_{EB} = [\psi_{1EB} \ \psi_{2EB}]^T \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \psi_{1EVV} = 1 - 3\left(\frac{x_E}{L_E}\right)^2 + 2\left(\frac{x_E}{L_E}\right)^3 \\ \psi_{2EVV} = L_E\left(\frac{x_E}{L_E}\right) - 2L_E\left(\frac{x_E}{L_E}\right)^2 + L_E\left(\frac{x_E}{L_E}\right)^3 \\ \psi_{3EVV} = 3\left(\frac{x_E}{L_E}\right)^2 - 2\left(\frac{x_E}{L_E}\right)^3 \\ \psi_{4EVV} = -L_E\left(\frac{x_E}{L_E}\right)^2 + L_E\left(\frac{x_E}{L_E}\right)^3 \\ \psi_{EVV} = [\psi_{1EVV} \ \psi_{2EVV} \ \psi_{3EVV} \ \psi_{4EVV}]^T \end{cases} \quad (19)$$

2.8 Forças externas distribuídas

Quando há forças externas distribuídas de função w_{dE} agindo sobre um elemento E , que possui n graus

de liberdade, calcula-se as parcelas equivalentes dessas forças que agem sobre cada nó do elemento utilizando a **equação 20**, onde $f_{d_{Ei}}$ é o vetor de forças equivalentes que agem sobre o elemento provenientes das forças externas distribuídas.

$$\begin{cases} f_{d_{1E}} = \int_0^{L_E} w_{d_E} \psi_{1E} \cdot dx_E \\ f_{d_{2E}} = \int_0^{L_E} w_{d_E} \psi_{2E} \cdot dx_E \\ \vdots \\ f_{d_{nE}} = \int_0^{L_E} w_{d_E} \psi_{nE} \cdot dx_E \\ f_{d_E} = [f_{d_{1E}} \ f_{d_{2E}} \ \dots \ f_{d_{nE}}]^T \end{cases} \quad (20)$$

Após calculadas as forças distribuídas $f_{d_{Ei}}$ em cada elemento Ei da estrutura, calcula-se o vetor equivalente de forças distribuídas f_d na estrutura pela **equação 21**.

$$f_d = \sum_{i=1}^n \cdot Ei [T]_G^T \cdot f_{d_{Ei}} \quad (21)$$

2.9 Forças externas concentradas

Para forças externas concentradas $F_{c_{iE}}$ agindo entre os nós de um determinado elemento E , a uma distância x_{iE} medida no eixo de coordenadas do elemento a partir de sua origem, calcula-se as parcelas equivalentes dessas forças que agem sobre cada nó do elemento utilizando a **equação 22**, onde f_{ce_E} é o vetor de forças equivalentes que agem sobre o elemento provenientes das forças externas concentradas.

$$\begin{cases} f_{ce_{1E}} = \sum_{i=1}^q F_{c_{iE}} \psi_{1E}(x_{iE}) \\ f_{ce_{2E}} = \sum_{i=1}^q F_{c_{iE}} \psi_{2E}(x_{iE}) \\ \vdots \\ f_{ce_{nE}} = \sum_{i=1}^q F_{c_{iE}} \psi_{nE}(x_{iE}) \\ f_{ce_E} = [f_{ce_{1E}} \ f_{ce_{2E}} \ \dots \ f_{ce_{nE}}]^T \end{cases} \quad (22)$$

Após calculadas as forças distribuídas $f_{ce_{Ei}}$ em cada elemento Ei da estrutura, calcula-se o vetor

equivalente de forças concentradas f_{ce} na estrutura pela **equação 23**.

$$f_{ce} = \sum_{i=1}^n \cdot Ei [T]_G^T \cdot f_{ce_{Ei}} \quad (23)$$

3. Método Utilizado

O método utilizado por este artigo para a simulação dinâmica da estrutura espacial é por implementação computacional, reduzindo o sistema de EDO de segunda ordem obtida pela **equação 1** a um sistema de EDO de primeira ordem, conforme mostrado na **equação 24**. Após realizar a referida redução de ordem, resolve-se o sistema de EDO pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem (RK4), que segundo [9], é o método de passo simples mais utilizado para a resolução computacional de um sistema de EDO por possuir boa precisão dos resultados e empregar uma expressão simples em sua implementação.

$$\begin{cases} \dot{u} = v \\ W = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ [M]^{-1} \end{bmatrix}, U = f \\ \dot{W} = AW + BU \end{cases} \quad (24)$$

4. Aplicação do método

O método utilizado foi implementado em MATLAB® e aplicou-se a uma estrutura espacial formada por oito tubos iguais, cada um modelado como um ES, conforme mostrado na **figura 3**. As propriedades dimensionais e estruturais dos tubos utilizados encontram-se na **tabela 2**.

Calculou-se as matrizes $[K]_{Ei}$ e $[M]_{Ei}$ dos elementos pelas **equações 6 e 11** respectivamente, e depois as matrizes $[K]$ e $[M]$ pelas **equações 12 e 13**. Após eliminar as linhas e colunas das matrizes $[K]$ e $[M]$ relativas aos índices dos deslocamentos dos nós N1, N3, N5 e N7, por estes estarem engastados, calculou-se a matriz $[C]$ pela **equação 15**, utilizando os valores $\xi_1 = \xi_2 = 0,03$, compatíveis com o material dos tubos segundo a literatura [4].

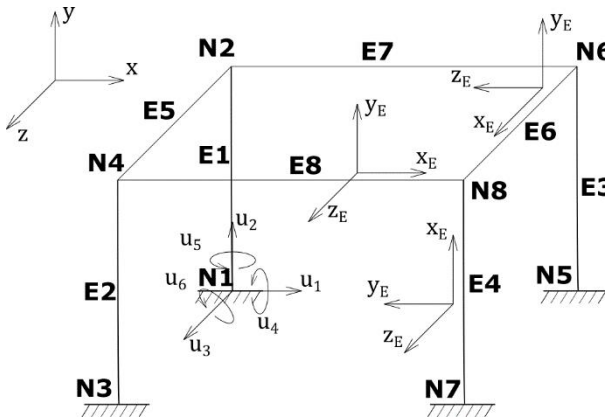


Fig. 3 – Estrutura espacial composta por oito tubos.

Tab.2 – Propriedades dimensionais e estruturais dos tubos utilizados

E_E	G_E	eP_E	De_E
$200 \times 10^9 \text{ Pa}$	$75 \times 10^9 \text{ Pa}$	$0,0050 \text{ m}$	$0,1300 \text{ m}$
Di_E	A_E	I_E	J_E
$0,1200 \text{ m}$	$0,0020 \text{ m}^2$	$3,8411 \times 10^{-6} \text{ m}^4$	$7,6822 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
L_E		ρ_E	
$2,0000 \text{ m}$		7850 kg/m^3	

4.1 Acomodação do sistema devido ao peso da estrutura

Com relação aos esforços externos, a estrutura está sujeita a força distribuída devido ao seu peso. Considerando a função de força distribuída de peso, dada por $w_d = g \rho A_E$ com aceleração da gravidade $g = -9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \hat{y}$, aplica-se para os elementos de E1 a E4 a equação 20 utilizando as funções de interpolação de barra (equação 18), e para os elementos de E5 a E8 aplica-se a equação 20 utilizando as funções de interpolação de viga plana vertical mostradas na equação 19. Com isso, tem-se os vetores f_{dEi} , que podem ser escritos na conforma correspondente aos graus de liberdade da estrutura por meio das respectivas matrizes de correlação e somados para formar o vetor f_d conforme equação 21.

Partindo-se da estrutura inicialmente sem deformação, as posições verticais dos nós localizados na parte superior da estrutura (N2, N4, N6 e N8) foram monitoradas até sua acomodação por conta do peso do sistema, como pode ser visto na figura 4.

4.2 Acomodação do sistema após sofrer um impulso externo simulando um disparo

Após a acomodação da estrutura devido ao seu próprio peso, simulou-se a execução de um disparo, pelo tempo de $t=0,01\text{s}$ e com força de $F_c = -8 \times g \text{ kgf} \cdot \hat{x}$, por sistema de arma fixo no centro da parte superior da estrutura (ponto P) por barras rígidas e de peso desprezível. O ponto P (figura 5), de coordenadas calculadas conforme equação 25, e a variação de azimute (az) e elevação (el) do vetor unitário \vec{p} , dado pela equação 26, foram monitorados após o disparo e até a acomodação da estrutura, tendo seus valores registrados ao longo do tempo de simulação e mostrados nas figuras 6 e 7 respectivamente.

$$P = \frac{N2 + N4 + N6 + N8}{4} \quad (25)$$

$$\vec{p} = \frac{(N8 - N2) \times (N6 - N4)}{\|(N8 - N2) \times (N6 - N4)\|} \quad (26)$$

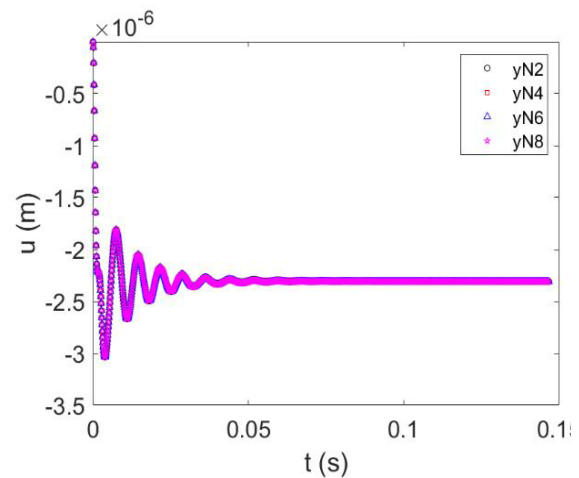


Fig. 4 – Acomodação do sistema devida ao peso da estrutura.

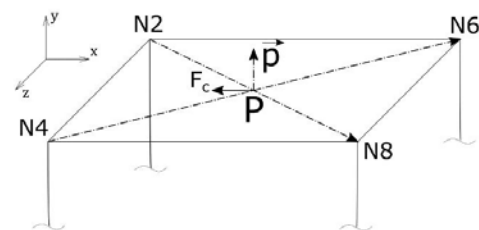


Fig. 5 – Representação do ponto P, da força e do vetor na estrutura.

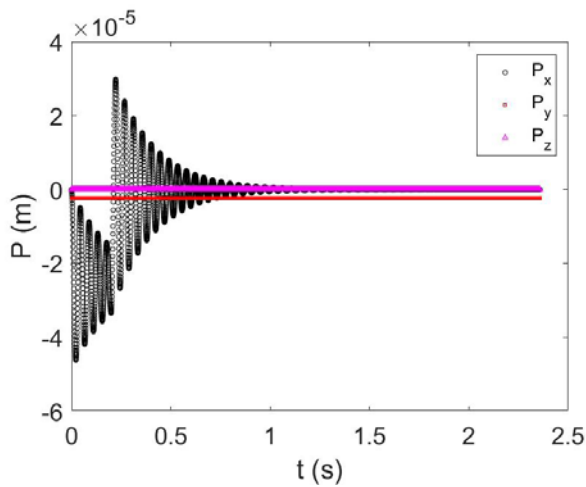


Fig. 6 – Deslocamento do ponto P durante a acomodação após a simulação do disparo.

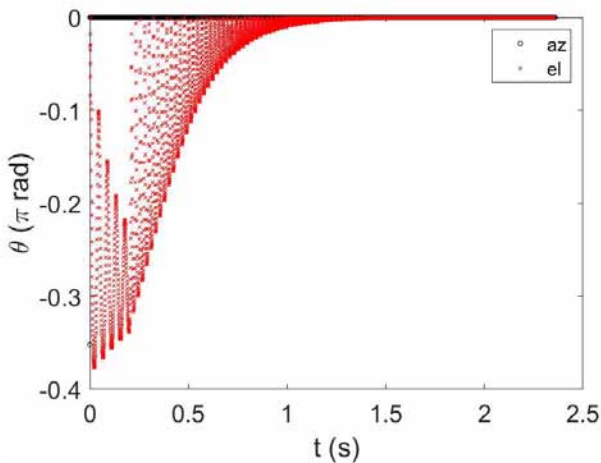


Fig. 7 – Variação de azimute (az) e elevação (el) do vetor .

5. Análise dos resultados

Com base nos resultados apresentados na seção anterior, o modelo dinâmico proposto neste artigo apresentou resultado compatível com a solução analítica para as deformações δ_{Ei} dos tubos verticais devidas ao peso da estrutura, calculadas conforme teoria apresentada em [10] pela **equação 27** e comparada na **tabela 3** com os resultados obtidos do

gráfico da **figura 4**. Além disso, o comportamento da posição do ponto P, monitorado após efetuar a simulação de disparo até a acomodação da estrutura, se mostra condizente com o esperado neste tipo de interação dinâmica.

Tab. 3 – Comparação entre o resultado obtido por simulação e o analítico para a deformação dos tubos verticais pela acomodação devido ao peso da estrutura

$u_8 = u_{20} = u_{32} = u_{44} (t \rightarrow \infty)$	$(\delta_{E1} = \delta_{E2} = \delta_{E3} = \delta_{E4})$
$-2,3103 \times 10^{-6} \text{ m}$	$-2,3103 \times 10^{-6} \text{ m}$

$$\delta_{Ei} = \int_0^{L_E} \frac{g\rho_E}{E_E} \cdot dx + \frac{g\rho_E L_E^2}{E_E} \quad (27)$$

6. Conclusão

Este artigo buscou apresentar, de maneira concisa e contemplando todos os passos, a aplicação do MEF na modelagem dinâmica de uma estrutura tubular espacial composta por oito EFUs. Mostrou-se, com relação à deformação sofrida pelas barras verticais devido ao peso dos componentes da estrutura, a compatibilidade dos resultados obtidos pela metodologia proposta com os resultados obtidos pela solução analítica.

Simulações e estudos adicionais poderão ser feitos para a comparação, na acomodação da estrutura após ter sofrido uma força de impulso, dos resultados obtidos pelo método apresentado com resultados experimentais ou obtidos por softwares de referência na área de simulação dinâmica de modelos espaciais.

Com isso, este trabalho busca contribuir com a disseminação e implementação do MEF aplicado à modelagem de estruturas espaciais, dada a importância e abrangência que este tipo de modelagem tem para apoiar simulações de pesquisas e projetos em diversas áreas da engenharia.

Referências Bibliográficas

- [1] RAO, S. S. Mechanical vibration. 5 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.
- [2] PIRES, F. A. Otimização, análise dinâmica e de incertezas de uma treliça espacial utilizando o método dos elementos finitos. Universidade Estadual Paulista, 2016.
- [3] GUEDES, G. D. Modelagem e simulação da dinâmica do sistema viatura - metralhadora calibre .50. IME, 2010.
- [4] MICHELON, M. A. Vibrações em tubos flexíveis de armamentos ocasionadas pelo disparo. Instituto Militar de Engenharia, 2018.
- [5] REIS, C. C. do P. D., ARAÚJO Jr., F. dos S. G. de, COSTA, T. A. da. Simulação de tubo flexível de canhão e projétil durante o disparo. Instituto Militar de Engenharia, 2018.
- [6] CRAIG, R. R. Structural dynamics: an introduction to computer methods. 1 ed. Wiley, 1981.
- [7] GRUZMAN, M. Notas de aulas do curso de vibrações. Instituto Militar de Engenharia, 2020.
- [8] BATHE, K.-J. Finite Element Procedures. 2 ed. New Jersey: Englewood Cliffs, 1996.
- [9] DIEGUEZ, J. P. P. Métodos de cálculo numérico. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2005.
- [10] HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. 7 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

Síntese de controlador H_∞ para sistema de armas de um carro de combate

Caio César da Mota Souza*, Alberto Mota Simões e Maurício Gruzman

Instituto Militar de Engenharia (IME)

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

*ccesarmts@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho propõe uma sistemática ao projeto de sistemas de controle para o armamento principal de carros de combate. Inicialmente, é elaborado um modelo em espaço de estados que representa a dinâmica do movimento do armamento do carro de combate. O referido modelo permite tratar a flexibilidade do tubo, ao desmembrá-lo em corpos rígidos conectados por uma mola e amortecedor viscoso equivalentes. Em seguida, o sistema de controle é projetado via técnica, associada à técnica de otimização de Powell, capaz de atender requisitos temporais especificados de projeto. O controlador sintetizado é, então, testado através de simulação do carro de combate percorrendo uma pista padrão de testes RRC9. Os resultados mostram que a metodologia empregada é capaz de alcançar os objetivos propostos.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem. Síntese de controladores. Método de Powell. Simulação. Controle de Armas de Carros de Combate.

ABSTRACT: The present work proposes a systematic for the design of control systems for the main armament of tanks. Initially, a state-space model is elaborated that represents the dynamics of the movement of the armament of the tank. The referred model allows to treat the flexibility of the tube, when dismembering it in rigid bodies connected by an equivalent spring and viscous damper. Then, the control system is designed via the technique, associated with Powell's optimization technique, capable of meeting specified design time requirements. The synthesized controller is then tested by simulating the tank through a standard RRC9 test track. The results show that the methodology employed is capable of achieving the proposed objectives.

KEYWORDS: Modeling. synthesis of controllers. Powell's method. Simulation. Main Battle Tank weapon control system.

1. Introdução

Os Carros de Combate (CC) dotados de canhões e metralhadoras, conferem apoio de choque à tropa de infantaria própria que se desloca em conjunto com o veículo. Diversas aplicações são atribuídas aos CC, destacando-se: o engajamento e a destruição de alvos encontrados no combate, em virtude de sua característica de elevada potência de fogo e da proteção blindada. Essa propriedade permite ainda a aproximação ao inimigo de maneira imune aos efeitos de tiros de armas portáteis, estilhaços de granadas, entre outros armamentos [1].

As principais partes do blindado são: o chassi, que é montado sobre lagartas ou rodas e a torre, a qual é montada sobre o chassi sendo responsável pela movimentação do canhão, principal armamento do veículo. Esses blindados usualmente possuem um sistema de controle de armas capaz de realizar o movimento de azimute (giro da base da torre) e o movimento de

elevação do armamento, sendo esses conjugados de modo a manter o tubo do armamento do CC alinhado ao alvo, direção determinada pelo combatente.

Um fator importante que deve ser considerado nestes sistemas é a rejeição de perturbação de base proveniente do terreno irregular. Durante a movimentação do blindado em superfícies irregulares, o chassi transmite movimentos indesejados para a torre, que em última análise diminuem as chances de acerto do tiro ao alvo pelo atirador. Desta forma, os problemas típicos envolvendo sistemas de controle de armas buscam realizar o acompanhamento de referência com rejeição de perturbação.

Comumente, para fins de controle, os movimentos de elevação e azimute são considerados dissociados. Os dois tipos de acionamentos usualmente utilizados para realização destes movimentos são o elétrico e o hidráulico. O primeiro utiliza um motor elétrico acoplado à uma caixa de redução, ligada a um mecanismo pinhão/cremalheira que eleva ou arria o tubo do armamento. O segundo utiliza um sistema hidráulico, dotado de

uma unidade de potência própria, capaz de alimentar um servomotor (cilindro ou motor hidráulico), o qual transmite o movimento para o armamento.

As principais vantagens do sistema hidráulico em relação ao acionamento elétrico são que esses podem agir como freios ao movimento do tubo e, ainda, os equipamentos são menores e mais leves. Por outro lado, as principais desvantagens do sistema de acionamento hidráulico são: risco de fogo ou de explosão, ferimento dos tripulantes por vazamentos indesejados do fluido hidráulico em elevada temperatura, falha do equipamento por contaminação do óleo hidráulico e queda do desempenho em virtude da alteração da viscosidade do fluido com a elevação da temperatura devido ao tempo de utilização [2].

O desacoplamento entre o movimento do chassi e da torre de um CC foi realizado em [3] através da relação cinemática entre o centro de gravidade do chassi e o ponto de pivotamento do armamento (Munhão). O autor utiliza o acionamento elétrico com o mecanismo pinhão/cremalheira na modelagem e demonstra que o modelo linear do chassi pode ser associado em série ao modelo linear da torre. Um controlador do tipo PD é obtido e testado em simulação do veículo percorrendo uma pista aleatória de relevo acidentado.

O efeito de flexão do tubo do armamento foi mitigado em [4] com a síntese de controlador robusto, através da síntese- μ . Nesse problema, o movimento de elevação/depressão do blindado foi modelado através de dispositivo hidráulico.

Em [5] um modelo não linear de um CC é obtido através do método de Lagrange. Na modelagem, considera-se o acionamento elétrico do tubo do armamento, sendo este movimentado diretamente pelo motor elétrico, inexistindo o conjunto pinhão/cremalheira. Adicionalmente, o autor supõe haver folga nessa transmissão, sendo aplicadas técnicas de otimização por enxame de partículas no modelo linearizado, a fim de obter controlador do tipo PID, bem como controladores de 2ª e 5ª ordem através da síntese- μ . Os controladores foram comparados através de simulação do veículo percorrendo a pista padrão de testes RRC-9.

O presente trabalho propõe uma nova sistemática ao projeto de sistemas de controle para o armamento

principal de carros de combate. Inicialmente, é elaborado um modelo em espaço de estados que representa a dinâmica do movimento do armamento do carro de combate. Em seguida, é sintetizado um controlador linear via síntese H_∞ associado ao método de otimização que atende aos requisitos especificados de projeto. Por fim, para corroborar a validade da técnica proposta, é realizada a simulação do movimento do veículo integrando a dinâmica do chassi com a dinâmica de elevação/depressão do armamento, percorrendo um relevo acidentado.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2 é realizada a modelagem do blindado caracterizando a cinemática e as equações de Lagrange associadas às variáveis generalizadas. Na seção 3, são apresentados os modelos lineares que representam o chassi e a torre. Na seção 4, são apresentadas as especificações de projeto para o controlador desejado e a metodologia adotada combinando-se a síntese e o método de Powell para determinação do controlador. Na seção 5, são apresentados resultados da simulação do veículo percorrendo a pista padrão de testes RRC-9. E na seção 6, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Modelagem

O modelo proposto para o CC é de meio veículo genérico, composto por um conjunto de corpos rígidos: Chassi (C), Motor elétrico (M), Pinhão (P), Tubo do armamento (C1 e C2); e um sistema de partículas (S) que compõe as rodas da Lagarta do veículo. A **figura 1** mostra os detalhes do modelo do carro de combate. O chassi do veículo, cujo centro de massa está localizado no ponto CG, a uma altura y_v do solo, possui orientação dada por θ_v (ângulo do chassi com o referencial inercial), e está apoiado sobre a Lagarta. Existem diversas maneiras abordadas na literatura para modelar veículos com lagartas, sendo o modelo “*point to contact model*” a mais utilizada [6]. Nesta abordagem, as lagartas são idealizadas como o conjunto de n partículas. A j -ésima partícula, localizada no ponto P_j , possui massa m_j , e está em contato com o solo através de uma mola ideal de rigidez k_j e interligada ao chassi pelo ponto P_{sj} . A suspensão é considerada como a associação de uma mola de rigidez k_{sj}

e um coeficiente de amortecimento viscoso c_{sj} . Os vetores n_1 , n_2 e n_3 encontram-se solidários ao referencial inercial no ponto O. Os vetores e_1 , e_2 e e_3 encontram-se solidários ao referencial do chassi no ponto CG.

O modelo em questão não leva em consideração a ação do disparo do armamento sobre a estrutura do blindado, sobretudo os efeitos do recuo e as vibrações causados sobre a torre do veículo.

Os vetores a_1 , a_2 e a_3 encontram-se solidários ao referencial do motor elétrico no seu centro de massa (O'). A base deste é fixada ao Chassi e possui orientação com o referencial inercial dada pelo ângulo θ_m . O torque gerado pelo motor elétrico é proporcional à corrente i_a , através do coeficiente K_t . A transmissão do movimento do motor para o pinhão é considerada sem folga, através de um eixo flexível com constantes torcionais K_e e viscosa c_e , acoplado a uma caixa de redução com razão R_{ac} . Os vetores b_1 , b_2 e b_3 encontram-se solidários ao referencial do pinhão em seu centro de massa, localizado no ponto $O_e = O'$ (para o caso do movimento plano) e sua orientação é dada por θ_L com o referencial inercial. Esse componente transmite o movimento para a cremalheira, considerada com massa desprezível. A força que a cremalheira exerce sobre o tubo do armamento é idealizada como elástica através de mola de constante de rigidez k_d conectada no ponto H (culatra do tubo).

Conforme [4], o tubo do armamento dos CC tiveram aumento em diâmetro e extensão na busca de garantia de maior letalidade. Assim, a flexibilidade dos tubos deve ser considerada no projeto do controlador para aumentar a precisão do tiro. Por isto, este trabalho considera que o tubo do armamento possui flexibilidade, que é aproximada através da subdivisão deste em duas partes rígidas, tubo 1 (C1) e tubo 2 (C2), as quais são unidas no ponto P3 por meio de uma constante de rigidez torcional k_{12} e um coeficiente torcional viscoso c_{12} , tal como realizado em [3]. O tubo 1 é pivotado pelo Munhão no ponto M e seu centro de massa localiza-se no ponto P1, distante de η_1 daquele e é descrito pelos vetores c_1 , c_2 e c_3 . As figuras 2 e 3 mostram detalhes dos componentes descritos.

Os vetores d_1 , d_2 e d_3 são solidários ao referencial do tubo 2 em seu centro de massa (P2), que dista de η_2 do ponto de ligação dos tubos (P3). Considera-se ainda um atrito viscoso na transmissão do torque do motor e do pinhão, com coeficientes b_m e b_L respectivamente. Adicionalmente, considera-se um atrito viscoso gerado no mancal do Munhão, através do coeficiente c_{1p} .

Finalmente, as entradas do modelo são os deslocamentos verticais y_{pj} em cada roda, devido à variação do solo, e a corrente i_a é a variável de controle.

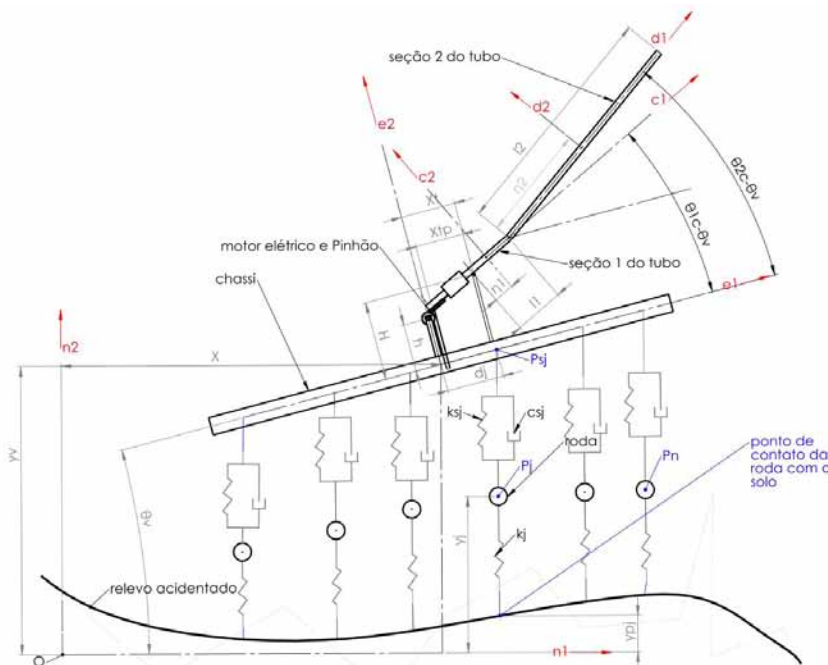


Fig. 1 – Detalhes do modelo do carro de combate.

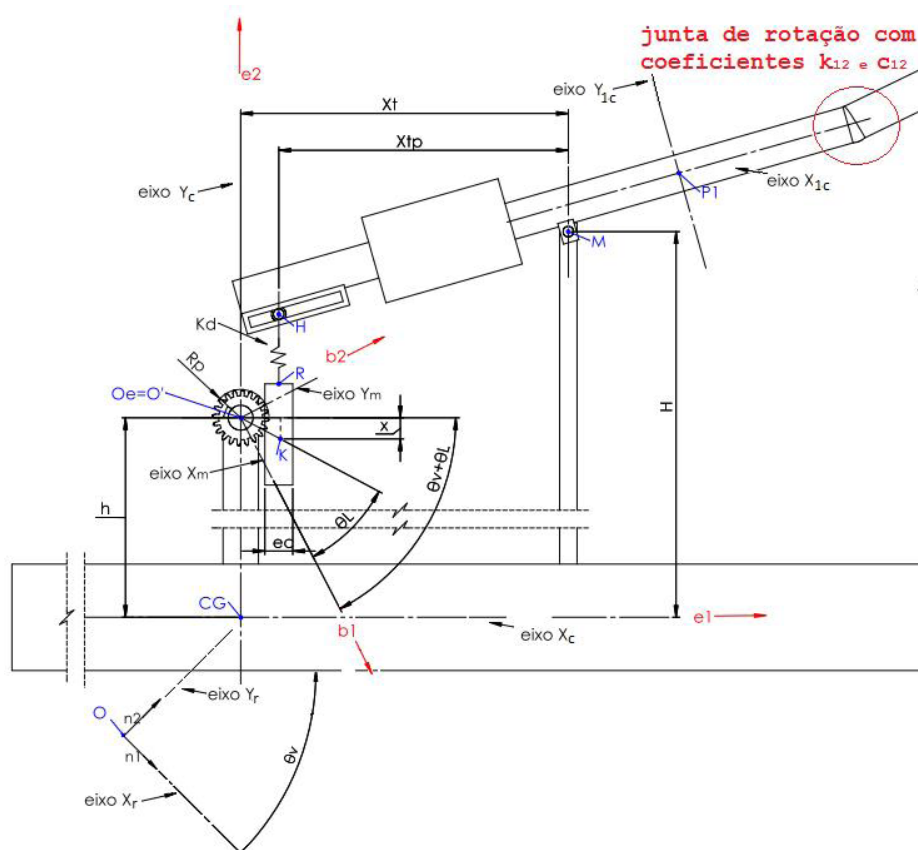


Fig. 2 – Detalhe acoplamento Pinhão/Cremalheira com a culatra do tubo do armamento.

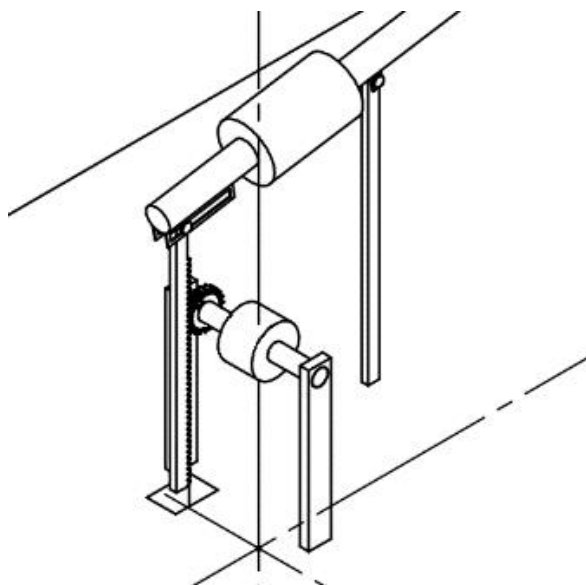


Fig. 3 – Mecanismo de Elevação/Depressão do Armamento.

2.1 Cinemática

Para se obter as equações de movimento pelo método de Lagrange deve-se, previamente, se obter a energia cinética (K) e potencial (V) de cada um dos corpos do sistema. Para as partículas somente há energia cinética de translação, enquanto que para os corpos rígidos deve-se somar ainda a energia de rotação dos mesmos.

Para o Chassi tem-se que a velocidade do centro de massa (CG), energia cinética (K^C) e potencial (V^C) são dadas pelas **equações 1 a 3**, respectivamente.

$$v^{CG} = v\mathbf{n}_1 + \dot{y}_v\mathbf{n}_2 \quad (1)$$

$$K^C = \frac{1}{2}m_C(v^2 + \dot{y}_v^2) + \frac{1}{2}I_{33}^C\dot{\theta}_v^2 \quad (2)$$

onde I_{33}^C e m_C são o momento de inércia e a massa do Chassi.

$$V^C = m_C g y_v \quad (3)$$

Será considerado que a lagarta é constituída de apenas 2 rodas, para fins de simplificação das equações. Portanto, para cada uma das $j=1,2$ (partículas do sistema) que representam as rodas, tem-se que a velocidade do ponto (P_j), energia cinética (K_j) e potencial (V_j) são dadas pelas **equações 4 a 6**, respectivamente.

$$v^{Pj} = [v - d_j \sin(\theta_v)\dot{\theta}_v]\mathbf{n}_1 + \dot{y}_j\mathbf{n}_2 \quad (4)$$

$$K^j = \frac{1}{2}m_j(v^2 - 2vd_j \sin(\theta_v)\dot{\theta}_v + d_j^2 \sin^2(\theta_v)\dot{\theta}_v^2 + \dot{y}_j^2) \quad (5)$$

$$V^j = m_j g y_j + \frac{k_j}{2}(y_j - y_{pj} - l_{0j})^2 + \frac{k_{sj}}{2}(y_v + d_j \sin(\theta_v) - y_j - l_{0sj})^2 \quad (6)$$

onde l_{0j} e l_{0sj} são os comprimentos naturais das molas de constantes k_j e k_{sj} . O motor elétrico possui velocidade do centro de massa (O'), energia cinética (K^M) e potencial (V^M) dadas pelas **equações 7 a 9** respectivamente.

$$v^{O'} = [v - h \cos(\theta_v)\dot{\theta}_v]\mathbf{n}_1 + [\dot{y}_v - h \sin(\theta_v)\dot{\theta}_v]\mathbf{n}_2 \quad (7)$$

$$K^M = \frac{1}{2}m_M[v^2 + \dot{y}_v^2 + h^2\dot{\theta}_v^2 - 2h\dot{\theta}_v(v \cos(\theta_v) + \dot{y}_v \sin(\theta_v))] + \frac{1}{2}I_{33}^M\dot{\theta}_v^2 \quad (8)$$

onde I_{33}^M e m_M são o momento de inércia e a massa do Motor. A constante h é a distância entre o centro de massa do Chassi e do centro de massa do motor, podendo ser vista na **figura 3**.

$$V^M = m_M g [y_v + h \cos(\theta_v)]\dot{\theta}_v^2 \quad (9)$$

O pinhão possui velocidade do centro de massa (O_p), energia cinética (K^P) e potencial (V^P) dadas pela **equações 10 a 12**, respectivamente.

$$v^{O_p} = v^{O'} = [v - h \cos(\theta_v)\dot{\theta}_v]\mathbf{n}_1 + [\dot{y}_v - h \sin(\theta_v)\dot{\theta}_v]\mathbf{n}_2 \quad (10)$$

$$K^P = \frac{1}{2}m_P[v^2 + \dot{y}_v^2 + h^2\dot{\theta}_v^2] + \frac{1}{2}I_{33}^P\dot{\theta}_v^2 - m_P h \dot{\theta}_v(v \cos(\theta_v) + \dot{y}_v \sin(\theta_v)) \quad (11)$$

onde I_{33}^P e m_P são o momento de inércia e a massa do Pinhão.

$$V^P = m_P g [y_v + h \cos(\theta_v)] + \frac{1}{2}k_d[(H - h - L_c/2 - l_{0t}) - X_{tp} \tan(\theta_{1c} - \theta_v) + R_p(\theta_L + \theta_v)]^2 \quad (12)$$

onde H é a distância do CG ao ponto M , h é a distância do CG ao ponto O' , L_c é o comprimento da cremalheira, l_{0t} é o comprimento livre da mola de constante k_d , X_{tp} é a distância do ponto M ao ponto H e R_p é o raio do Pinhão.

O tubo 1 possui velocidade do centro de massa ($P1$), energia cinética (K^{C1}) e potencial (V^{C1}) dadas pela **equações 13 a 15**, respectivamente.

$$v^{P1} = [v \cos(\theta_v) + \dot{y}_v \sin(\theta_v) - H \dot{\theta}_v - \eta_1 \dot{\theta}_{1c} \sin(\theta_{1c} - \theta_v)]\mathbf{n}_1 + [-v \sin(\theta_v) + \dot{y}_v \cos(\theta_v) + X_t \dot{\theta}_v + \eta_1 \dot{\theta}_{1c} \cos(\theta_{1c} - \theta_v)]\mathbf{n}_2 \quad (13)$$

$$K^{C1} = \frac{1}{2}m_{C1}\{v^2 + \dot{y}_v^2 + \dot{\theta}_v(X_t^2 + H^2) + \eta_1^2 \dot{\theta}_{1c}^2 - 2v \dot{\theta}_v[H \cos(\theta_v) + X_t \sin(\theta_v)] - 2v \eta_1 \dot{\theta}_{1c} \sin(\theta_{1c}) + 2\dot{y}_v \eta_1 \dot{\theta}_{1c} \cos(\theta_{1c}) + 2\dot{y}_v \dot{\theta}_v[X_t \cos(\theta_v) - H \sin(\theta_v)] + 2\eta_1 \dot{\theta}_v \dot{\theta}_{1c}[H \sin(\theta_{1c} - \theta_v) + X_t \cos(\theta_{1c} - \theta_{1c} - \theta_v)]\} + \frac{1}{2}I_{33}^{C1} \dot{\theta}_{1c}^2 \quad (14)$$

$$V^{C1} = m_{C1}g[\eta_1 \sin(\theta_{1c}) + y_v + X_t \sin(\theta_v) + H \cos(\theta_v)] \quad (15)$$

O tubo 2 possui velocidade do centro de massa ($P2$), energia cinética (K^{C2}) e potencial (V^{C1}) dadas pela **equações 16 a 18**, respectivamente.

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^{P2} = & [v \cos(\theta_v) + \dot{y}_v \sin(\theta_v) - H \dot{\theta}_v \\ & - \ell_1 \dot{\theta}_{1c} \sin(\theta_{1c} - \theta_v) \\ & - \eta_2 \dot{\theta}_{2c} \sin(\theta_{2c} - \theta_v)] \mathbf{n}_1 \\ & + [-v \sin(\theta_v) + \dot{y}_v \cos(\theta_v) + X_t \dot{\theta}_v \\ & + \ell_1 \dot{\theta}_{1c} \cos(\theta_{1c} - \theta_v) \\ & + \eta_2 \dot{\theta}_{2c} \cos(\theta_{2c} - \theta_v)] \mathbf{n}_2 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} K^{C2} = & \frac{1}{2} m_{C2} \{ v^2 + \dot{y}_v^2 + \dot{\theta}_v (X_t^2 + H^2) + \eta_2^2 \dot{\theta}_{2c}^2 \\ & + \ell_1^2 \dot{\theta}_{1c}^2 \\ & - 2v \dot{\theta}_v [H \cos(\theta_v) + X_t \sin(\theta_v)] \\ & - 2v \ell_1 \dot{\theta}_{1c} \sin(\theta_{1c}) \\ & - 2v \eta_2 \dot{\theta}_{2c} \sin(\theta_{2c}) \\ & - 2\dot{y}_v \dot{\theta}_v [H \sin(\theta_v) - X_t \cos(\theta_v)] \\ & + 2\dot{y}_v \dot{\theta}_{1c} \ell_1 \cos(\theta_{1c}) \\ & + 2\dot{y}_v \dot{\theta}_{2c} \eta_2 \cos(\theta_{2c}) \\ & + 2\ell_1 \dot{\theta}_v \dot{\theta}_{1c} [H \sin(\theta_{1c} - \theta_v) \\ & + X_t \cos(\theta_{1c} - \theta_v)] \\ & + 2\dot{\theta}_v \dot{\theta}_{2c} \eta_2 [H \sin(\theta_{2c} - \theta_v) \\ & + X_t \cos(\theta_{1c} - \theta_v)] \\ & + 2\ell_1 \dot{\theta}_{1c} \dot{\theta}_{2c} \eta_2 \cos(\theta_{1c} - \theta_{2c}) \} \\ & + \frac{1}{2} I_{C2}^2 \dot{\theta}_{2c}^2 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} V^{C2} = & m_{C1}g[y_v + X_t \sin(\theta_v) + H \cos(\theta_v) \\ & + \ell_1 \sin(\theta_{1c}) + \eta_2 \cos(\theta_{2c})] \end{aligned} \quad (18)$$

2.2 Equações de Lagrange

As equações de Lagrange foram utilizadas para obter as equações diferenciais que descrevem o movimento dos corpos utilizando as variáveis generalizadas q_j do problema. A função de Lagrange do sistema (\mathcal{L}) é definida como a diferença entre a energia cinética total (K) e a energia potencial total (V), dado pela **equação 19**, enquanto a equação de Lagrange associada à variável generalizada q_j está representada pela **equação 20**, onde Q_{qj} representa a força generalizada [7].

$$\mathcal{L} = K - V \quad (19)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_j} = Q_{qj} \quad (20)$$

A energia cinética K e energia potencial V são dadas pelas **equações 21 e 22**, respectivamente.

$$K = K^C + (K^1 + K^2) + K^M + K^P + K^{C1} + K^{C2} \quad (21)$$

$$V = V^C + (V^1 + V^2) + V^M + V^P + V^{C1} + V^{C2} \quad (22)$$

O vetor de variáveis generalizadas \mathbf{q} , é definido pela **equação 23**.

$$\mathbf{q} = [y_1 \ y_2 \ y_v \ \theta_v \ \theta_m \ \theta_L \ \theta_{1c} \ \theta_{2c}]^T \quad (23)$$

2.3 Forças generalizadas

A força generalizada Q_{qj} pode ser obtida através da **equação 24**, caso q_j represente uma distância, ou pela **equação 25**, caso represente um ângulo. M representa o número de corpos e M_k o número de corpos sujeitos à ação de torques externos, τ_k representa o k-ésimo torque aplicados ao corpo, $M_k \mathbf{F}_i$ representa a i-ésima força não-conservativa aplicada ao corpo M , \mathbf{r}_i é o vetor distância do ponto de aplicação da força \mathbf{F}_i ao ponto O e θ_k é o vetor posição angular corpo M_k .

$$Q_{q_j} = \sum_{i=1}^M \mathbf{F}_i \cdot \frac{\partial(\mathbf{r}_i)}{\partial q_j} \quad (24)$$

$$Q_{q_j} = \sum_{k=1}^{M_k} \tau_k \cdot \frac{\partial(\theta_k)}{\partial q_j} \quad (25)$$

As forças não-conservativas aplicadas à j-ésima roda do sistema são dadas pela **equação 26**.

$$\mathbf{f}_j = -c_{sj} (\dot{y}_j - \dot{y}_v - d_j \cos(\theta_v) \dot{\theta}_v) \mathbf{n}_2 \quad (26)$$

Ao Chassi haverá uma força não-conservativa resultante dada pela **equação 27**, e um torque dado pela **equação 28**.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{Chassi} = & -\mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_2 \\ = & -[c_{s1}(\dot{y}_1 - \dot{y}_v - d_1 \cos(\theta_v) \dot{\theta}_v) \\ & + c_{s2}(\dot{y}_2 - \dot{y}_v \\ & - d_2 \cos(\theta_v) \dot{\theta}_v)] \mathbf{n}_2 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\tau_{Chassi} = -c_{1p}(\dot{\theta}_v - \dot{\theta}_{1c}) \mathbf{n}_3 \quad (28)$$

O motor elétrico, o pinhão, o Tubo 1 e o Tubo 2 terão torques aplicados dados pelas **equações 29 a 32**, respectivamente.

$$\tau_{motor} = \left[-K_t i_a + b_m \dot{\theta}_m + \frac{k_e}{R_{ac}} \left(\frac{\theta_m}{R_{ac}} - \theta_L \right) + \frac{c_e}{R_{ac}} \left(\frac{\dot{\theta}_m}{R_{ac}} - \dot{\theta}_L \right) \right] \mathbf{n}_3 \quad (29)$$

$$\tau_{pinhão} = \left[b_L \dot{\theta}_L - k_e \left(\frac{\theta_m}{R_{ac}} - \theta_L \right) - c_e \left(\frac{\dot{\theta}_m}{R_{ac}} - \dot{\theta}_L \right) \right] \mathbf{n}_3 \quad (30)$$

$$\tau_{Tubo1} = [k_{12}(\theta_{2c} - \theta_{1c}) + c_{12}(\dot{\theta}_{2c} - \dot{\theta}_{1c}) + c_{1p}(\dot{\theta}_v - \dot{\theta}_{1c})] \mathbf{n}_3 \quad (31)$$

$$\tau_{Tubo2} = -[k_{12}(\theta_{2c} - \theta_{1c}) + c_{12}(\dot{\theta}_{2c} - \dot{\theta}_{1c})] \mathbf{n}_3 \quad (32)$$

Portanto, as forças generalizadas serão dadas pelas **equações 33 a 39**.

$$Q_{y_1} = -c_{s1}[\dot{y}_1 - \dot{y}_v - d_1 \cos(\theta_v) \dot{\theta}_v] \quad (33)$$

$$Q_{y_v} = c_{s1}[\dot{y}_1 - \dot{y}_v - d_1 \cos(\theta_v) \dot{\theta}_v] + c_{s2}[\dot{y}_2 - \dot{y}_v - d_2 \cos(\theta_v) \dot{\theta}_v] \quad (34)$$

$$Q_{\theta_v} = -c_{1p}(\dot{\theta}_v - \dot{\theta}_{1c}) + c_{s1}d_1 \cos(\theta_v) [\dot{y}_1 - \dot{y}_v - d_1 \cos(\theta_v) \dot{\theta}_v] + c_{s2}d_2 \cos(\theta_v) [\dot{y}_2 - \dot{y}_v - d_2 \cos(\theta_v) \dot{\theta}_v] \quad (35)$$

$$Q_{\theta_m} = K_t i_a - b_m \dot{\theta}_m - \frac{1}{R_{ac}} \left[k_e \left(\frac{\theta_m}{R_{ac}} - \theta_L \right) + c_e \left(\frac{\dot{\theta}_m}{R_{ac}} - \dot{\theta}_L \right) \right] \quad (36)$$

$$Q_{\theta_L} = -b_L \dot{\theta}_L + k_e \left(\frac{\theta_m}{R_{ac}} - \theta_L \right) + c_e \left(\frac{\dot{\theta}_m}{R_{ac}} - \dot{\theta}_L \right) \quad (37)$$

$$Q_{\theta_{1c}} = k_{12}(\theta_{2c} - \theta_{1c}) + c_{12}(\dot{\theta}_{2c} - \dot{\theta}_{1c}) + c_{1p}(\dot{\theta}_v - \dot{\theta}_{1c}) \quad (38)$$

$$Q_{\theta_{2c}} = -k_{12}(\theta_{2c} - \theta_{1c}) - c_{12}(\dot{\theta}_{2c} - \dot{\theta}_{1c}) \quad (39)$$

3. Modelos lineares

Aplicando-se a **equação 20** para cada uma das variáveis generalizadas, obtém-se um sistema de equações não-

linear que descreve a dinâmica do sistema. A esse conjunto de equações pode-se adicionar hipóteses de pequenos deslocamentos angulares para o Chassi e com isto dissociar dois modelos lineares que descrevem o comportamento do Chassi e o comportamento da Torre, em série, associados pela aceleração linear vertical do Munhão (\ddot{y}_t). A aceleração do Munhão, para pequenos ângulos de deslocamento do Chassi é descrita por:

$$\ddot{y}_t = \ddot{y}_v + X_t \ddot{\theta}_v \quad (40)$$

3.1 Modelo do Chassi (G_1)

O modelo linear do Chassi obtido através da linearização possui representação em espaço de estados dada pela **equação 41**.

$$G_1: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = A_1 \mathbf{x}_1 + B_1 \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{y}_1 = \underbrace{(C + DA_1)}_{C_1} \mathbf{x}_1 + \underbrace{DB_1}_{D_1} \mathbf{u}_1 \end{cases} \quad (41)$$

onde os estados do sistema (\mathbf{x}_1) são descritos pela **equação 42** e as entradas (\mathbf{u}_1) são dadas pela **equação 43** e as matrizes C e D são dadas pela **equação 44**.

$$\mathbf{x}_1 = [y_v \ \dot{y}_v \ \theta_v \ \dot{\theta}_v \ y_1 \ \dot{y}_1 \ y_2 \ \dot{y}_2]^T \quad (42)$$

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{y}_p = [y_{p1} \ y_{p2}]^T \quad (43)$$

Nota-se que o vetor de entrada \mathbf{y}_p representa os deslocamentos verticais que cada roda está sujeita quando o veículo está em movimento.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sum \frac{k_{ij}}{m_c} & -\sum \frac{c_{ij}}{m_c} & -\sum \frac{k_{ij}d_i}{m_c} & -\sum \frac{c_{ij}d_i}{m_c} & \frac{k_{c1}}{m_c} & \frac{c_{c1}}{m_c} & \frac{k_{c2}}{m_c} & \frac{c_{c2}}{m_c} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sum \frac{k_{ij}d_i}{F_{33}} & -\sum \frac{c_{ij}d_i}{F_{33}} & -\sum \frac{k_{ij}d_i^2}{F_{33}} & -\sum \frac{c_{ij}d_i^2}{F_{33}} & \frac{k_{c1}d_1}{F_{33}} & \frac{c_{c1}d_1}{F_{33}} & \frac{k_{c2}d_2}{F_{33}} & \frac{c_{c2}d_2}{F_{33}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{c1}}{m_1} & \frac{c_{c1}}{m_1} & \frac{k_{c1}d_1}{m_1} & \frac{c_{c1}d_1}{m_1} & -\frac{(k_1+k_{c1})}{m_1} & -\frac{c_{c1}}{m_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{c2}}{m_2} & \frac{c_{c2}}{m_2} & \frac{k_{c2}d_2}{m_2} & \frac{c_{c2}d_2}{m_2} & 0 & 0 & -\frac{(k_2+k_{c2})}{m_2} & -\frac{c_{c2}}{m_2} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sum \frac{k_{ij}}{m_c} \\ 0 \\ -\sum \frac{c_{ij}d_i^2}{F_{33}} \\ 0 \\ \frac{k_{c1}}{m_1} \\ 0 \\ \frac{k_{c2}}{m_2} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & X_t & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2 Modelo da torre (G_2)

O modelo linearizado da torre possui representação em espaço de estados dada pela **equação 45**.

$$G_2: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_2 = A_2 \mathbf{x}_2 + B_2 \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{y}_2 = \begin{bmatrix} \theta_{2c} \\ \dot{\theta}_m \\ \theta_{1c} \\ \dot{\theta}_{1c} \end{bmatrix} = C_2 \mathbf{x}_2 + D_2 \mathbf{u}_2 \end{cases} \quad (45)$$

onde o vetor de estados do sistema (\mathbf{x}_2) é descrito pela **equação 46** e o vetor de entradas (\mathbf{u}_2) é dado pela **equação 47**.

$$\mathbf{x}_2 = [\theta_L \ \theta_m \ \theta_{1c} \ \theta_{2c} \ \dot{\theta}_L \ \dot{\theta}_m \ \dot{\theta}_{1c} \ \dot{\theta}_{2c}]^T \quad (46)$$

$$\mathbf{u}_2 = [\theta_v \ \dot{\theta}_v \ \ddot{y}_t \ i_a]^T \quad (47)$$

As matrizes A_2, B_2, C_2 e D_2 e são dadas por:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ -M_{2s}^{-1} K_{2s} & -M_{2s}^{-1} B_{2s} \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} \\ M_{2s}^{-1} F_{2s} \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$D_2 = 0_{(6 \times 4)} \quad (51)$$

com M_{2s}, B_{2s}, K_{2s} e F_{2s} dados pelas **equações 52 a 55**.

$$M_{2s} = \begin{bmatrix} I_{33}^p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{33}^M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (m_{C1} \ell_1^2 + \eta_1^2 m_{C1} + I_{33}^{C1}) & m_{C2} \eta_2 \ell_1 \\ 0 & 0 & m_{C2} \eta_2 \ell_1 & (I_{33}^{C2} + m_{C2} \eta_2^2) \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$B_{2s} = \begin{bmatrix} b_L + c_e & -c_e/R_{ac} & 0 & 0 \\ -c_e/R_{ac} & (b_m + c_e/R_{ac}^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{1p} + c_{12} & -c_{12} \\ 0 & 0 & -c_{12} & c_{12} \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$K_{2s} = \begin{bmatrix} R_p^2 k_d + k_e & -k_e/R_{ac} & -R_p k_d X_{1p} & 0 \\ -k_e/R_{ac} & k_e/R_{ac}^2 & 0 & 0 \\ -R_p k_d X_{1p} & 0 & k_d X_{1p}^2 + k_{12} & -k_{12} \\ 0 & 0 & -k_{12} & k_{12} \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$B_{2s} = \begin{bmatrix} b_L + c_e & -c_e/R_{ac} & 0 & 0 \\ -c_e/R_{ac} & (b_m + c_e/R_{ac}^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{1p} + c_{12} & -c_{12} \\ 0 & 0 & -c_{12} & c_{12} \end{bmatrix} \quad (55)$$

4. Controle

Na presente aplicação deseja-se que o ângulo da ponta do tubo θ_{2c} esteja alinhado ao ângulo no qual o alvo se encontra θ_{alvo} , configurando assim o problema de acompanhamento de referência. Do mesmo modo, deseja-se que o erro angular existente entre estes dois pontos gerado a partir dos vetores deslocamentos verticais seja minimizado, configurando o problema de rejeição de perturbação. Por fim, deseja-se que a corrente circulando no motor elétrico esteja limitada a um valor máximo estabelecido, configurando o problema de atenuação do sinal de controle.

Com os modelos lineares do Chassi (G_1) e da Torre (G_2), que podem ser considerados em série, propõe-se a estrutura de controle mostrada na **figura 4**, onde o controlador $K(s)$ possui 4 entradas dadas por $[\hat{e} \ \dot{\theta}_m \ \theta_{1c} \ \dot{\theta}_{1c}]^T$ e uma saída dada pela corrente i_a , que é a variável de controle.

O controlador será obtido através da síntese H_∞ associada a uma malha externa, empregando a rotina de otimização de Powell [8], a fim de obter os parâmetros que definem as funções ponderação, como será abordado nas seções subsequentes deste trabalho.

Os requisitos de projeto utilizados para a síntese do controlador são enumerados em seguida.

1. Acompanhamento de Referência ($\theta_{alvo} \rightarrow \theta_{2c}$): Tempo de acomodação $t_s \leq 6s$ e sobressinal $M_p \leq 5\%$ para entrada em degrau de 15° para o alvo.
2. Rejeição de Perturbação ($y_p \rightarrow \theta_{2c}$): Posição angular do tubo dentro do limite de 1 mm em mais de 90% do tempo do deslocamento do blindado na pista padrão RRC-9 a uma velocidade de 30 km/h.
3. Atenuação de Sinal de Controle ($\theta_{alvo} \rightarrow i_a$): Módulo da corrente máxima de $|i_a| = 5A$ durante o deslocamento do blindado na pista padrão RRC-9 a uma velocidade de 30 km/h

É importante ressaltar que, para o problema de acompanhamento de referência, deseja-se que o

ângulo do Tubo 2 esteja alinhado com o alvo (θ_{alvo}), minimizando assim, o erro (e_2). Entretanto, a leitura da posição angular do tubo 2 não é medida pelos sensores, e somente a leitura da posição angular do tubo 1, velocidade angular do tubo 1 e velocidade angular do motor elétrico de controle estão disponíveis através de sensores instalados no blindado. O sinal $\hat{e} = f(\theta_{alvo} - \theta_{1c})$ também é conhecido.

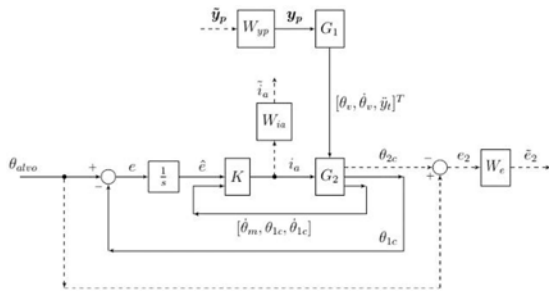


Fig. 4 – Estrutura de Controle.

4.1 Síntese H_∞

As linhas pontilhadas da **figura 4** se referem a ligações fictícias para fins da síntese do controlador via H_∞ . As funções de ponderação, W_e , W_{yp} e W_{ia} são utilizadas como gabaritos frequenciais para traduzir especificações de acompanhamento de referência, rejeição de perturbação e atenuação do sinal de controle, respectivamente.

Uma dificuldade apresentada na síntese H_∞ está no fato dos requisitos de projeto serem temporais, em geral, enquanto a técnica utiliza requisitos frequenciais. Apesar disto, há um conjunto de correlações que podem ser feitas entre as principais características temporais e os parâmetros que definem o gabarito padrão $W(s)$, dado pela **equação 56**. A largura de banda (w_b) implica na rapidez do sistema, o valor de M refere-se ao valor máximo da função sensibilidade, que está associado ao sobressinal apresentado pelo sistema. O valor de A pode ser associado ao erro de acompanhamento de referência [9].

$$W(s) = \frac{\left(\frac{1}{M}\right)s + w_b}{s + w_b A} \quad (56)$$

A estrutura padrão da síntese H_∞ está mostrada na **figura 5**, onde a planta generalizada P é linear

invariante no tempo, sendo obtida através da função CONNECT do Matlab. Esta planta é função das plantas originais, isto é, chassi (G_1) e torre (G_2), da interconexão proposta na estrutura de controle, bem como das funções ponderação definidas W_e , W_{yp} e W_{ia} .

Os canais das funções sensibilidade são definidos como $S_{yp}(\tilde{y}_p \rightarrow \tilde{e}_2)$, $S_e(\theta_{alvo} \rightarrow \tilde{e}_2)$ e $S_{ia}(\theta_{alvo} \rightarrow \tilde{i}_a)$.

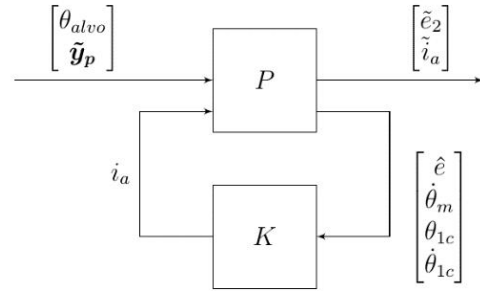


Fig. 5 – Estrutura Padrão para síntese H_∞ .

Desta forma, foi utilizada a ferramenta SYSTUNE implementada no Matlab para solucionar o problema P1, de síntese H_∞ , conforme descrito a seguir:

P1: Escolhidas as funções ponderação W_e , W_{yp} e W_{ia} , encontrar o controlador K que resolve:

$$\begin{aligned} \min_K \quad & \|S_{mista}\|_\infty = \|[S_e \ S_{yp} \ S_{ia}]\| \\ \text{s.t.} \quad & \|W_e S_e\|_\infty < 1, \\ & \|W_{yp} S_{yp}\|_\infty < 1, \\ & \|W_{ia} S_{ia}\|_\infty < 1 \end{aligned}$$

A ferramenta SYSTUNE é capaz de modificar os parâmetros livres do modelo, isto é, os graus de liberdade conferidos ao controlador K que se deseja obter, de forma que sejam atendidos os requisitos frequências definidos no problema P1. Portanto, a solução será válida se $\|S_{mista}\|_\infty$ for menor que 1, o que significa que os gabaritos frequenciais foram satisfeitos. A ferramenta é ainda mais poderosa, pois pode ser utilizada para garantir que cada um dos canais de desempenho definidos tenham individualmente norma H_∞ menor que 1.

O formato do controlador foi escolhido arbitrariamente, como de 6ª ordem, de forma que este possua representação em espaço de estados através

das matrizes A_k , B_k , C_k e D_k . Considera-se a transmissão direta nula, isto é, $D_k=0$. Além disto, admite-se que matriz A_k possuindo formato tridiagonal, isto é, todos os elementos são nulos, exceto os elementos da diagonal principal e das diagonais acima e abaixo desta. Com isto, são 16 variáveis de projeto para a matriz A_k , com mais 24 para a matriz B_k e 6 para a matriz C_k , totalizando 46 parâmetros ajustáveis para o controlador.

4.2 Determinação das ponderações frequenciais através do método de Powell

Para evitar o método de tentativa e erro para determinar as ponderações frequenciais que geram controlador K que atenda aos requisitos de projeto, utilizou-se uma malha externa associada ao método de otimização de Powell.

Definiu-se um vetor $\mathbf{p} \in \mathbf{R}^7$ de variáveis de otimização, cujos componentes são os parâmetros que definem W_e , W_{ia} e W_{yp} conforme **equação 57**. Os seis primeiros parâmetros do vetor \mathbf{p} são M_e , A_e , $w_{b,e}$ e A_{yp} , $w_{b,yp}$, M_{ia} , os quais definem as funções de ponderação W_e e W_{yp} , respectivamente, conforme a **equação 56**. O último parâmetro do vetor define a função ponderação $W_{ia} = \frac{1}{M_{ia}}$.

$$\mathbf{p} = [M_e \ A_e \ w_{b,e} \ M_{yp} \ A_{yp} \ w_{b,yp} \ M_{ia}]^T \quad (57)$$

Sendo assim, define-se uma função Custo $J(\mathbf{p})$, conforme a **equação 58**. É importante ressaltar que o custo depende do controlador K , que por sua vez é função do vetor ponderação \mathbf{p} .

$$J(\mathbf{p}) = J(K(\mathbf{p})) = \frac{T_f}{T(K(\mathbf{p}))} \quad (58)$$

onde valor de $T(K(\mathbf{p}))$ representa o tempo total que ângulo do tubo do armamento θ_{2c} permanece em torno de 15° em um intervalo definido pelo deslocamento angular máximo ($1\text{mil}=0,0563^\circ$), isto é, $[14,9437^\circ \ 15,0563^\circ]$. O valor de T_f é o tempo total de simulação do blindado percorrendo a

pista padrão RRC-9. Sendo assim, o problema P2, de otimização com restrições, é enunciado por conforme:

P2: Encontrar o vetor \mathbf{p} , que soluciona o problema:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{p}} \quad & J(K(\mathbf{p})) \\ \text{s.t.} \quad & t_s \leq 6s, \\ & M_p \leq 5\%, \\ & |i_a| \leq 5A \end{aligned}$$

onde o controlador $K(\mathbf{p})$ é a solução do problema P1 para as ponderações frequenciais definidas por \mathbf{p} .

O problema P2 pode ser transformado em um problema de minimização sem restrições através da construção da função custo aumentada $J_{aug}(\mathbf{p})$, dado pela **equipe 59**. O custo aumentado é composto pelo custo original $J(\mathbf{p})$, somado à função penalidade $\gamma(\mathbf{p})$, cujo valor é sempre maior ou igual a zero. No caso da solução não estar dentro da zona de viabilidade, isto é, as restrições da minimização não serem atendidas, a função penalizará o custo original, aumentando-o. De outro modo, caso a solução do problema esteja dentro da região de viabilidade, então $\gamma(\mathbf{p})=0$ e $J_{aug}(\mathbf{p})=J(\mathbf{p})$. Uma heurística foi utilizada, com as constantes m_1 e m_2 sendo alteradas de forma dinâmica com valores de $0,1J(\mathbf{p})$ e $100J(\mathbf{p})$, respectivamente.

$$J_{aug}(\mathbf{p}) = J(\mathbf{p}) + m_1\gamma(\mathbf{p}) + m_2 \max[0, \gamma(\mathbf{p})] \quad (59)$$

Os valores utilizados para descrever os modelos lineares foram em parte estimados, bem como retirados de [3], [5], [10], conforme **tabela 2**.

O método de Powell define a cada iteração um vetor de direção de busca (\mathbf{e}_p) e um passo (ρ) de tal forma a alterar o vetor \mathbf{p} a fim de minimizar a função custo. A **figura 6** mostra a estrutura do pseudocódigo com a malha externa executando Powell e a interna realizando a síntese \mathbf{H}_∞ via SYSTUNE.

Algoritmo 1: Pseudocódigo

Entrada: define p_0 inicial

Saída: K

```

1 início
2    $p_k \leftarrow p_0$ ;
3   define Ponderações:  $W_e(p_k), W_{yp}(p_k), W_{ia}(p_k)$ 
4   resolve Problema P1 via SYSTUNE e determina  $K(p_k)$ 
5   determina Custo aumentado  $J_k \leftarrow J_{aug}(K(p_k))$ 
6   critérioParada  $\leftarrow$  falso
7   contador  $\leftarrow$  0
8   enquanto (critérioParada==falso) faça
9     define direção de busca( $e_r$ ) e passo( $\rho$ ) através do Método de Powell
10     $p_{k+1} \leftarrow p_k + \rho e_r$ 
11    define Ponderações:  $W_e(p_{k+1}), W_{yp}(p_{k+1}), W_{ia}(p_{k+1})$ 
12    resolve Problema P1 via SYSTUNE e determina  $K(p_{k+1})$ 
13    determina Custo aumentado  $J_{k+1} \leftarrow J_{aug}(K(p_{k+1}))$ 
14    se ( $J_{k+1} < J_k$ ) então
15       $J_k \leftarrow J_{k+1}$ 
16       $p_k \leftarrow p_{k+1}$ 
17      se ( $|J_{k+1} - J_k| < \text{tolerância}$ ) ou ( $\text{contador} \geq \text{contadorMAX}$ ) então
18        critérioParada  $\leftarrow$  verdadeiro;
19      fim
20    fim
21    contador  $\leftarrow$  contador+1
22  fim
23 fim

```

Fig. 6 – Pseudocódigo executando síntese e Powell.

A **tabela 1** mostra os parâmetros dos gabaritos frequenciais utilizados na síntese do melhor controlador por esta abordagem.

Tab. 1 – Parâmetros utilizados nos gabaritos

Ponderação	M [db]	A[db]	w_b [rad/s]	Função de Transf.
W_e	4,8	-169,4	1,10	$\frac{(\frac{1}{M})s + w_b}{s + w_b A}$
W_{ia}	98,1	-	-	1/M
W_{yp}	0,5	-53,5	1830,4	$\left[\frac{(\frac{1}{M})s + w_b}{s + w_b A} \right]$

Tab. 2– Parâmetros utilizados para construção dos modelos lineares do Chassi e da Torre

Constante	Unidade	Valor	Constante	Unidade	Valor
$[d_1 \ d_2]$	m	[-2.6 2.2]	K_i	N*m/A	60
k_{aj}	N/m	8.8×10^5	c_{ij}	N*s/m	9.4×10^4
I_{33}^C	$kg \cdot m^2$	300×10^3	c_{ip}	N*m*s/rad	1.5×10^5
b_m	N*m*s/rad	15	X_i	m	1
X_{ip}	m	0,75	k_d	N/m	6×10^6
R_p	m	0,04	$I_{33}^M = I_{33}^P$	$kg \cdot m^2$	0,5

Constante	Unidade	Valor	Constante	Unidade	Valor
m_{c1}	kg	2165	I_{33}^{C1}	$kg \cdot m^2$	1090
ℓ_1	m	1,75	η_1	m	-0,465
k_{12}	N*m/rad	4×10^6	c_{12}	N*m*s/rad	2×10^5
m_{c2}	kg	335	I_{33}^C	$kg \cdot m^2$	281
ℓ_2	m	3,25	η_2	m	1.319
R_{ac}	-	2.5	m_c	kg	10800
H	m	0.75	m_p	kg	20
k_e	N/m	3000	c_e	N*s/m	300

$$A_k = \begin{bmatrix} -15,01 & 93,17 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2,13 & -29,21 & -4,25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20,25 & -12,51 & -202,48 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 19,56 & -370,05 & -157,08 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 138,99 & -204,82 & 17,48 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 175,68 & -36,43 \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$B_k = \begin{bmatrix} -122,52 & -21,25 & -805,08 & 7,00 \\ -396,40 & 1,69 & 3,00 & 43,12 \\ 33,69 & 23,63 & 180,73 & 35,39 \\ 23,00 & 34,05 & 308,78 & 116,04 \\ 137,33 & -26,43 & 147,18 & -120,39 \\ 183,29 & -2,48 & -611,50 & -85,06 \end{bmatrix} \quad (61)$$

$$C_k = [0,14 \quad -20,31 \quad 15,57 \quad -50,84 \quad -94,40 \quad -2,67] \quad (62)$$

Tab. 3 – Parâmetros utilizados nos gabaritos frequenciais para algumas iterações do Método de Powell com o respectivo custo e custo aumentado.

i	$J_{aug}(p)$	$J(p)$	p						
			M_e	A_e	$w_{(b,e)}$	M_{yp}	A_{yp}	$w_{(b,yp)}$	M_{ia}
1	2775,4990	3,4721	10,18	-31,11	1,25	3,68	-22,06	1017,73	65,93
5	77,7598	1,9255	10,35	-30,25	0,84	3,53	-22,06	1017,73	65,93
10	1,5918	1,5918	10,35	-30,25	0,95	3,53	-25,69	1108,69	56,42
15	1,2882	1,2882	4,84	-56,57	1,10	0,96	-30,12	1300,28	67,13
20	1,1147	1,1147	4,84	-169,41	1,10	0,50	-44,87	1822,93	97,17
24	1,0730	1,0730	4,84	-169,41	1,10	0,51	-53,53	1830,47	97,17
25	1,0696	1,0696	4,84	-169,41	1,10	0,51	-53,53	1830,47	98,14

A **tabela 3** mostra o decaimento da função custo em função da iteração (i) do método de Powell com o respectivo vetor p . O controlador, referente à iteração 25, foi aquele que obteve o custo mínimo obtido, sendo capaz de satisfazer todos os requisitos de projeto. A **equação 63** mostra a representação em espaço de estados do referido controlador.

$$K_{25} = \left[\begin{array}{c|c} A_k & B_k \\ \hline C_k & 0_{1 \times 4} \end{array} \right] \quad (63)$$

onde A_k , B_k e C_k e são as matrizes de estado, dadas pelas **equações 60 a 62**. Os gabaritos frequenciais foram atendidos. Numericamente temos que $\|S_{yp}W_{yp}\|_{\infty} = 0,9857 < 1$, $\|S_eW_e\|_{\infty} = 0,9804 < 1$ e $\|S_{ia}W_{ia}\|_{\infty} = 3,2388 \times 10^{-4} < 1$

5. Simulação

A simulação foi realizada com o modelo linear do veículo percorrendo uma pista contendo 3 trechos. O primeiro e último trechos possuem 120 m cada e considera-se que não há perturbação de base (pista lisa), enquanto o 2º trecho possui 133,2 m com oscilações características da pista de testes RRC-9. O trecho inicial foi adicionado para que se pudesse verificar o acompanhamento de referência, o trecho 2 para a verificação da rejeição de perturbação do solo e o trecho 3 para verificação do erro em estado

estacionário. Com o veículo trafegando à velocidade de 30 km/h, o tempo total de simulação é de $T_f = 44,78$ s para o comprimento total da pista de 373,20 m.

Conforme pode ser visto na **tabela 3**, o custo mínimo alcançado foi de 1,0696, referente ao controlador K_{25} , indicando que o percentual de tempo que este controlador consegue manter o ângulo do armamento dentro da faixa permissível é de 93,49% durante toda o percurso da simulação. Como inicialmente considera-se que o tubo encontra-se em 0°, não há como obter 100% de tempo dentro da faixa permissível.

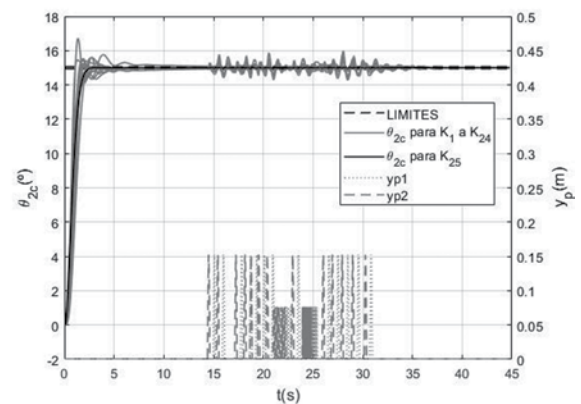


Fig. 7 – Controle do ângulo do armamento em função do tempo para os diversos controladores obtidos via método de Powell.

A **figura 7** mostra o ângulo do armamento em função do tempo de simulação para os diversos controladores obtidos de K_1 a K_{25} , além das oscilações de base que cada roda está sujeita (y_{p1} e y_{p2}). As linhas tracejadas são os limites superior e inferior de 1mil em torno do valor de referência desejado para o tubo 2.

A **figura 8** mostra o detalhe da **figura 7** no trecho 2 da simulação somente para o controlador K_{25} . Caso seja considerado apenas o trecho da pista RRC-9 (trecho 2), verifica-se que o percentual de tempo que o controlador K_{25} consegue manter o ângulo dentro dos limites passa a ser de 97,43%, que é superior aos 90% desejados em projeto. Além disso, verifica-se que o controlador atende aos demais requisitos de projeto, pois não há sobressinal, o tempo de acomodação é de 4,35 s e o máximo do módulo da corrente apresentada é de 4,35 A.

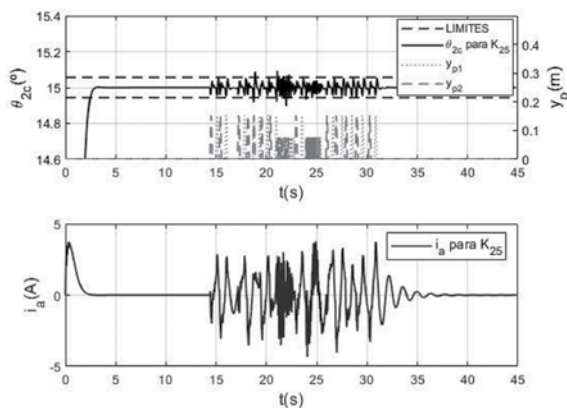


Fig. 8 – Detalhe do ângulo do armamento e corrente de controle no trecho 2 da simulação (durante a passagem do CC na pista RRC-9).

6. Conclusão

O presente trabalho elabora dois modelos lineares associados à dinâmica do Chassi e da Torre de um

carro de combate, a partir da linearização das equações de movimento obtidas pelo método de Lagrange. Os modelos podem ser tratados como em série, de maneira similar ao resultado apresentado por [3]. Uma estrutura de controle foi proposta para a estabilização do armamento, que foi desmembrado em duas seções rígidas de tubo, onde a variável de controle é a corrente do motor elétrico de elevação do armamento. Um controlador linear foi elaborado e simulações mostram o resultado do blindado percorrendo a pista padrão de testes RRC-9.

Foi utilizada uma malha externa de otimização, através de método de Powell, para auxílio na síntese de controladores via técnica H_∞ , mostrando que a metodologia facilita o uso da técnica por eliminar a necessidade do método de tentativa e erro na escolha das funções ponderação adequadas que garantem o cumprimento dos requisitos temporais elencados como critérios de projeto.

Referências Bibliográficas

- [1] Brasil, M. do. CGCFN-313. Manual de Blindados de Fuzileiros Navais. 1ªed. Marinha do Brasil, 2008, 20.
- [2] Ogorkiewicz, R. M. (1911). Technology of Tanks I, Jane's Information Group Limited, United Kingdom.
- [3] Purdy, D. J. Modelling and Simulation of a Weapon Control System for a Main Battle Tank, In: Proceedings of the Eighth U.S. Army Symposium on gun dynamics. 1996. P20.2-20.19.
- [4] Marcopeli, V. ; NG, M. ;Wells. Robust Control Design for the Elevation Axis Stabilization of the M256E1 Long Gun. Defense Technical Information Center, 2001.
- [5] Fernandes, D.L. Controle Robusto para Sistemas de Armas Embarcado em Veículo Terrestre. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, 2018. 97.
- [6] Dhir, A.;Sankar, S. Analytical track models for ride dynamics simulation of tracked vehicles. Journal of Terramechanics, v.31, n.2,p.107-138,1994.
- [7] Crandall, S.H. Dynamics of mechanical and electromechanical systems. McGrawHill, 1968.
- [8] M. J. D. Powell, An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives, The Computer Journal, Volume 7, Issue 2, 1964, Pages 155–162.
- [9] Skogestad, S.;Postlethwaite, I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. USA: John Wiley 38; Sons, Inc. 2005.
- [10] Jakati, A.;Banerjee, S.;Jebaraj, C. Development of Mathematical Models, Simulationg Vibration Control of Tracked Vehicle Weapon Dynamics. Defence Science Journal, v.67, n.4, p.465-475, 2017. 7.

Absorção de micro-ondas por nanopartículas de ferritas mistas de cobalto e cério

I C Gonçalves^a, R S de Biasi^{*a}, A B S Figueiredo^a, C L Oliveira^b e J B Campos^c

^a Instituto Militar de Engenharia (IME)

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

^{b,c} Instituto de Física, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*rsbiasi@ime.eb.br

RESUMO: Partículas nanométricas de $\text{CoFe}_{2-x}\text{Ce}_x\text{O}_4$, em que $0 \leq x \leq 0,29$, foram sintetizadas pelo método sol-gel/combustão e a absorção de micro-ondas das ferritas foi medida pelo método de Absorção de Micro-ondas Modulada Magneticamente (AMMM). Os resultados mostraram que a absorção é máxima para uma concentração de Ce entre 0,18 e 0,26, um resultado que pode ser útil para aplicações práticas desse material.

PALAVRAS-CHAVE: Processo sol-gel. Nanopartículas. Ferritas. Absorção de micro-ondas.

ABSTRACT: Nanosized particles of $\text{CoFe}_{2-x}\text{Ce}_x\text{O}_4$, where $0 \leq x \leq 0,29$, were synthesized by the sol-gel combustion method and the microwave absorption of these ferrites was measured by the Magnetically Modulated Microwave Absorption (MAMMA) method. The results showed that the absorption is highest for a Ce concentration between 0.18 and 0.26, a result that can be useful for practical applications of this material.

KEYWORDS: Sol-gel process. Nanoparticles. Ferrites. Magnetic properties.

1. Introdução

A ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) é um espinélio que, na forma nanométrica, tem sido muito estudado nos últimos anos devido ao grande número de aplicações, dentre as quais a absorção de micro-ondas [1]. Resultados recentes obtidos por outros pesquisadores [2,3] sugerem que a dopagem com cério aumenta a absorção de micro-ondas pela ferrita de cobalto, mas apenas até uma fração molar de Ce da ordem de 0,3. O objetivo do presente trabalho foi confirmar esta alegação e determinar a causa da redução da absorção de micro-ondas para frações molares de Ce maiores que certo limite.

2. Método experimental

2.1 Preparação das amostras

Quantidades estequiométricas de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ de alta pureza foram dissolvidas em água deionizada para obter a solução inicial. A esta solução foi acrescentada uma

solução 0,75 molar de ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$). O béquer contendo a solução final foi posicionado em uma placa quente sob agitação constante e mantido a uma temperatura de aproximadamente 60 °C até se formar um gel. Em seguida, a temperatura foi aumentada para 80 °C até o gel se tornar transparente. A temperatura foi aumentada para ocorrer a evaporação da água e o material entrar em combustão. A combustão produziu um pó, que foi macerado em um almofariz e usado para preparar uma pastilha, que foi tratada a 1000 °C por 2 h. A pastilha foi resfriada até a temperatura ambiente e macerada em um almofariz.

As amostras foram rotuladas de acordo com a composição nominal, como mostra a **tabela 1**.

Tab. 1 – Composição Nominal das Amostras.

Amostra	Composição Nominal
Ce0	CoFe_2O_4
Ce1	$\text{CoFe}_{1,9}\text{Ce}_{0,1}\text{O}_4$
Ce2	$\text{CoFe}_{1,8}\text{Ce}_{0,2}\text{O}_4$
Ce3	$\text{CoFe}_{1,7}\text{Ce}_{0,3}\text{O}_4$
Ce4	$\text{CoFe}_{1,6}\text{Ce}_{0,4}\text{O}_4$
Ce5	$\text{CoFe}_{1,5}\text{Ce}_{0,5}\text{O}_4$

2.2 Equipamentos

Os difratogramas foram obtidos em difratômetros PANalytical X'Pert Pro da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). A análise dos difratogramas foi realizada com o auxílio do software TOPAS, utilizando o método de Rietveld.

As medidas da absorção da derivada da curva de absorção de micro-ondas em função do campo magnético foram realizadas no laboratório de ressonância magnética do Instituto Militar de Engenharia (IME) em um espectrômetro de ressonância magnética Varian E-12 trabalhando na Banda X (9,5 GHz).

3. Resultados

3.1 Medidas de difração de raios X

O objetivo das medidas de difração de raios X foi assegurar que a fase cristalina desejada estava presente. Um difratograma típico é mostrado na **figura 1**. De acordo com os difratogramas, todas as amostras, exceto a amostra de ferrita de cobalto não dopada, continham, além da fase espinélio, uma fração significativa de óxido de cério (CeO_2).

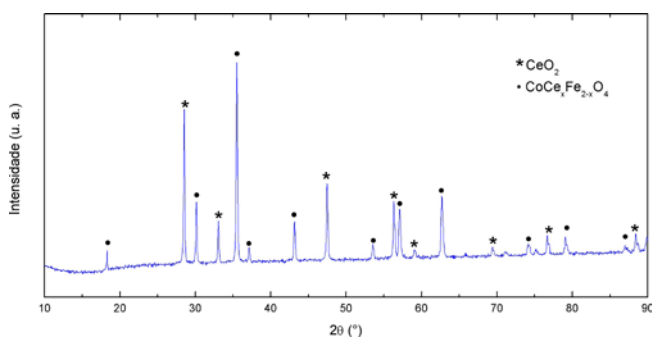


Fig. 1 – Difratograma da amostra Ce3.

O fato de haver nas amostras uma fração significativa de CeO_2 , o que também foi observado [2,3] por outros pesquisadores, significa que a concentração de Ce na ferrita mista é menor que a concentração nominal. Para determinar a concentração real de Ce, foi usado o refinamento de Rietveld para determinar as frações

mássicas de ferrita e óxido de cério.

O difratograma da **figura 2** foi ajustado para uma ferrita de cobalto pura, com a ficha ICSD109044, e a concordância foi boa, com um GOF de 1,2.

Os difratogramas das **figuras 3 a 7** foram inicialmente ajustados pelo software TOPAS com uma ficha de ferrita de cobalto dopada com cério criada tomando como ponto de partida a ficha ICSD109044 de ferrita de cobalto pura e refinados recursivamente até que as frações mássicas fossem compatíveis com as distribuições catiônicas determinadas por Hashhash et al. [4,5]. Os resultados finais são apresentados nas **tabelas 2 e 3**.

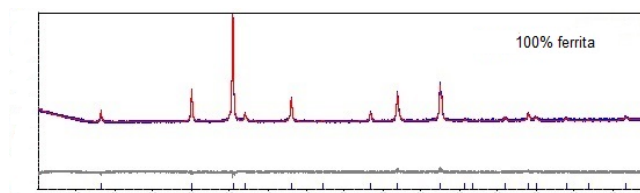


Fig. 2 – Ajuste do difratograma da amostra Ce0.

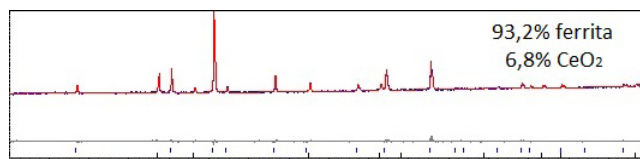


Fig. 3 – Ajuste do difratograma da amostra Ce1.

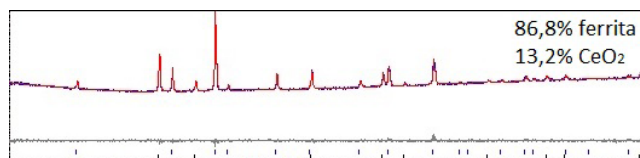


Fig. 4 – Ajuste do difratograma da amostra Ce2.

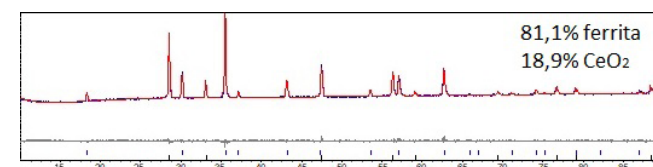


Fig. 5 – Ajuste do difratograma da amostra Ce3.

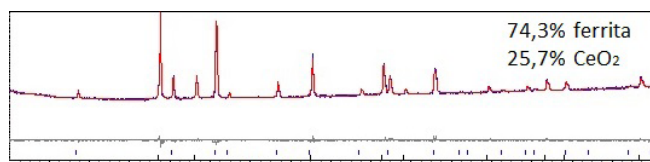


Fig. 6 – Ajuste do difratograma da amostra Ce4.

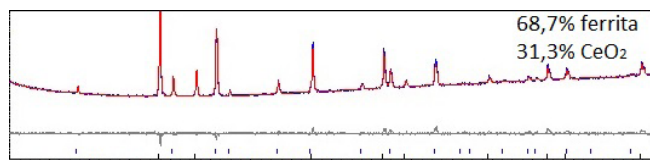


Fig. 7 – Ajuste do difratograma da amostra Ce5.

Tab. 2 – Tamanhos médios dos cristalitos, d , parâmetros de rede, A , Frações mássicas, f_m , e valores do GOF obtidos a partir de refinamentos de Rietveld.

	d (nm)	A (nm)	f_m (%)		GOF
			$\text{CoFe}_{2-x}\text{Ce}_x\text{O}_4$	CeO_2	
Ce0	61	0,839	100,0	-	1,2
Ce1	121	0,839	93,2	6,8	1,2
Ce2	79	0,838	86,8	13,2	1,3
Ce3	87	0,837	81,1	18,9	1,7
Ce4	72	0,837	74,3	25,7	1,6
Ce5	68	0,836	68,7	31,3	1,8

Tab. 3 – Composição real e distribuição catiônica das amostras.

	Composição	Sítio A		Sítio B		
		Co	Fe	Co	Fe	Ce
Ce0	CoFe_2O_4	$\text{Co}_{0,20}$	$\text{Fe}_{0,80}$	$\text{Co}_{0,80}$	$\text{Fe}_{1,20}$	Ce_0
Ce1	$\text{CoFe}_{1,91}\text{Ce}_{0,09}\text{O}_4$	$\text{Co}_{0,29}$	$\text{Fe}_{0,71}$	$\text{Co}_{0,71}$	$\text{Fe}_{1,20}$	$\text{Ce}_{0,09}$
Ce2	$\text{CoFe}_{1,84}\text{Ce}_{0,16}\text{O}_4$	$\text{Co}_{0,36}$	$\text{Fe}_{0,64}$	$\text{Co}_{0,64}$	$\text{Fe}_{1,20}$	$\text{Ce}_{0,16}$
Ce3	$\text{CoFe}_{1,78}\text{Ce}_{0,22}\text{O}_4$	$\text{Co}_{0,42}$	$\text{Fe}_{0,58}$	$\text{Co}_{0,58}$	$\text{Fe}_{1,20}$	$\text{Ce}_{0,22}$
Ce4	$\text{CoFe}_{1,74}\text{Ce}_{0,26}\text{O}_4$	$\text{Co}_{0,46}$	$\text{Fe}_{0,54}$	$\text{Co}_{0,54}$	$\text{Fe}_{1,20}$	$\text{Ce}_{0,26}$
Ce5	$\text{CoFe}_{1,71}\text{Ce}_{0,29}\text{O}_4$	$\text{Co}_{0,49}$	$\text{Fe}_{0,51}$	$\text{Co}_{0,51}$	$\text{Fe}_{1,20}$	$\text{Ce}_{0,29}$

A **figura 8** mostra a variação da fração mássica de ferrita com a concentração nominal de cério. A variação é praticamente linear. A reta mostra o resultado de um ajuste por mínimos quadrados, segundo qual variação pode ser descrita com boa aproximação pela equação

$$f_m = 99,65 - 62,54f_n \quad (1)$$

em que f_m é a fração mássica de ferrita e f_n é a fração molar nominal de cério.

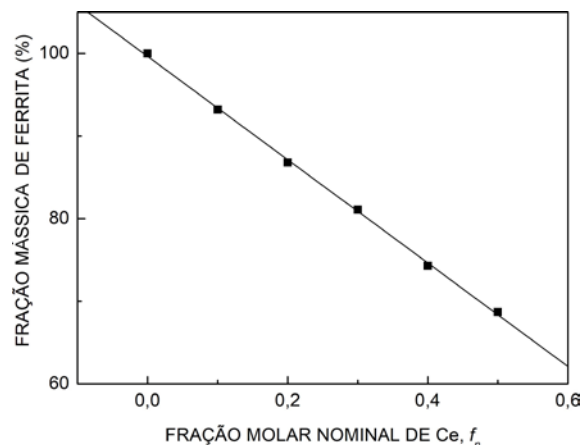


Fig. 8 – Fração mássica da ferrita mista com a fração molar nominal de cério. A reta é o resultado de um ajuste por mínimos quadrados (equação 1) aos pontos experimentais.

3.2 Medidas de absorção de micro-ondas

A **figura 9** mostra a absorção não ressonante de micro-ondas conhecida como Absorção de Micro-ondas Modulada Magneticamente (AMMM) de $\text{CoFe}_{2-x}\text{Ce}_x\text{O}_4$ à temperatura ambiente, obtida em um espectrômetro de ressonância magnética Varian E-12. Os parâmetros usados foram os seguintes: frequência de micro-ondas, 9,5 Hz; potência de micro-ondas, 10 mW.

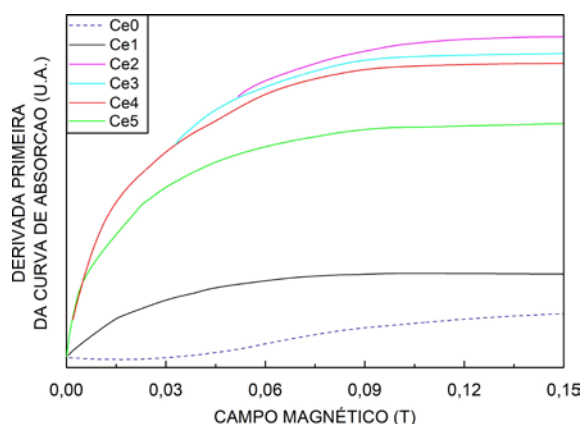


Fig. 9 – Absorção de micro-ondas das ferritas mistas $\text{CoFe}_{2-x}\text{Ce}_x\text{O}_4$ em função do campo magnético aplicado.

A intensidade relativa da absorção de micro-ondas em função da concentração de cério é mostrada na **tabela 4** e na **figura 10**.

Tab. 4 – Absorção relativa de micro-ondas das amostras de $\text{CoFe}_{2-x}\text{Ce}_x\text{O}_4$, A, em função da fração molar de cério, f_{Ce} .

Amostra	f_{Ce}	A
Ce0	0	0,16
Ce1	0,09	0,28
Ce2	0,18	1,00
Ce3	0,26	0,95
Ce4	0,30	0,92
Ce5	0,39	0,74

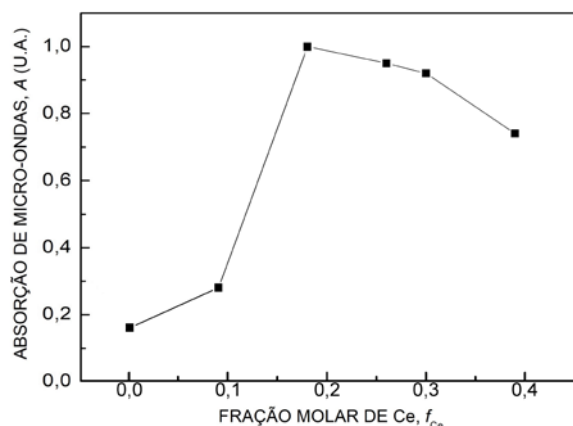


Fig. 10 – Absorção de micro-ondas em função da fração molar de cério.

4. Discussão

Os resultados de absorção de micro-ondas mostram que a absorção é máxima para uma concentração de cério entre 0,18 e 0,26, o que está razoavelmente próximo dos resultados obtidos por Jing et al. [3]. Quanto à causa do aumento da absorção de micro-ondas da ferrita mista, em relação à ferrita pura de cobalto para frações de cério até 0,3 e uma redução da absorção para frações superiores a 0,3, as medidas de tamanho de cristalito parecem eliminar a possibilidade de que essa grandeza seja responsável pela variação observada, já que não existe uma correlação entre o tamanho de cristalito e a concentração de cério (veja a **tabela 2**).

Os dados de condutividade em altas frequências apresentados por Kamran e Anis-ur-Rehman [3] mostram uma variação semelhante à da absorção de micro-ondas. De acordo com esses autores, o aumento da condutividade em altas frequências das amostras com fração nominal de Ce menor ou igual a 0,3 se deve à diminuição da fração molar de íons de Fe^{3+} nos sítios tetraédricos, enquanto

a redução da condutividade em altas frequências para frações nominais de Ce maiores que 0,3 é atribuída à presença de CeO_2 , que, acima de uma certa fração mássica, produz uma redução de condutividade que não é mais compensada pela redução da concentração de Fe^{3+} nos sítios tetraédricos. Para analisar matematicamente este fenômeno, foram analisadas separadamente a variação da fração mássica de CeO_2 com a fração nominal de Ce (**tabela 4** e **figura 11**) e a variação da fração molar de Fe nos sítios tetraédricos $f_{\text{Fe,A}}$ com a fração nominal de Ce nas amostras (**tabela 5** e **figura 12**). Nos dois casos, a variação é aproximadamente linear com a fração nominal da Ce nas amostras, mas a variação da absorção de micro-ondas com a fração nominal de Ce não é linear.

Como mostra a **figura 13**, é possível dividir a curva de absorção em duas regiões. Para uma fração de cério nominal menor que 0,2, a absorção é dominada pela redução da fração molar de Fe^{3+} em sítios tetraédricos e pode ser descrita por uma função normalizada de segundo grau $A = 0,16 + 18 f_{\text{Ce}}^2$, em que f_{Ce} é a fração nominal de Ce. Para uma fração de cério maior que 0,3, a absorção é reduzida em virtude do aumento da fração mássica de CeO_2 e a absorção tende a diminuir. Os resultados mostram, portanto, que a fração nominal de Ce para que a absorção de micro-ondas seja máxima é da ordem de 0,2 a 0,3 e que, para frações de Ce até 0,3, a absorção de micro-ondas nas amostras investigadas pode ser descrita por uma função razoavelmente simples, o que pode ser útil para futuras pesquisas.

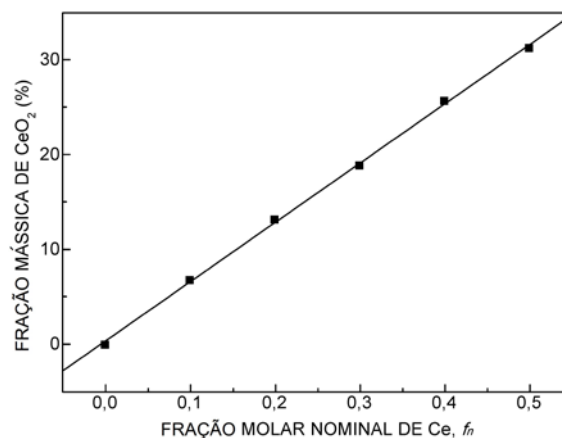


Fig. 11 – Fração mássica de CeO_2 em função da fração nominal de Ce. A reta é um ajuste por mínimos quadrados aos resultados experimentais.

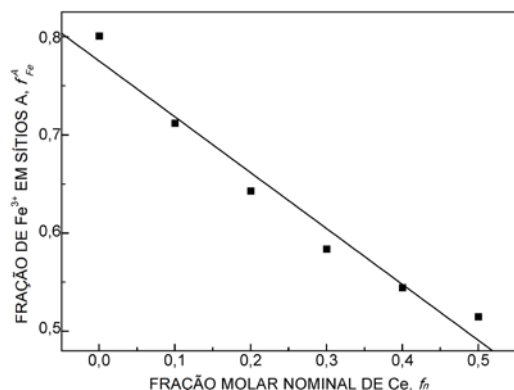


Fig. 12 – Fração molar de Fe nos sítios tetraédricos da ferrita $CoFe_{2-x}Ce_xO_4$ em função da fração nominal de Ce. A reta é um ajuste por mínimos quadrados aos dados experimentais.

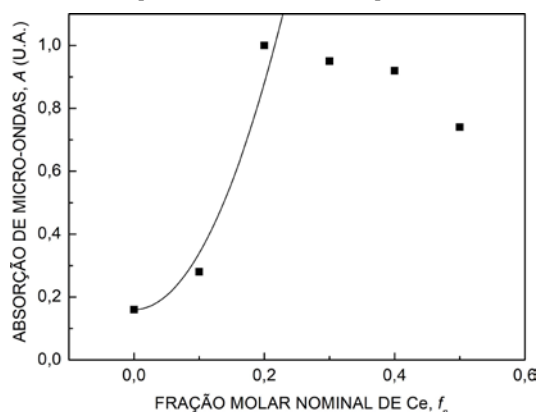


Fig. 13 – Absorção de micro-ondas de amostras da ferrita $CoFe_{2-x}Ce_xO_4$ em função da fração nominal de Ce. A curva é um ajuste dos resultados experimentais para $f_{Ce} \leq 0,3$ a uma função do segundo grau (veja o texto).

5. Conclusões

Neste trabalho foram investigadas as propriedades da ferrita de cobalto dopada com cério como um possível material para absorção de micro-ondas.

Os resultados mostraram que nem todos os átomos de cério são incorporados à estrutura da ferrita das amostras dopadas, pois também é produzida uma certa quantidade de CeO_2 , que aumenta linearmente com a fração molar nominal de Ce.

Observou-se que as amostras de ferrita mista de cobalto e cério apresentam uma absorção de micro-ondas maior que a ferrita de cobalto pura. A absorção aumenta com a concentração de Ce até uma fração molar de 0,22, provavelmente devido à redução da fração molar de átomos de Fe^{3+} em sítios tetraédricos. Nas amostras com concentração maior que 0,22 o valor da absorção diminui, o que é atribuído à grande quantidade de CeO_2 presente no material.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- [1] H. Bayrakdar, Complex permittivity, complex permeability and microwave absorption properties of ferrite-paraffin polymer composites, J. Magn. Magn. Mater. 323 (2011) 1882.
- [2] H. Jing, M. Gao, X. Wang, W. Pei e W. Jiao, Preparation and Properties of Ce-doped Cobalt Ferrite, Chin. J. Mater. Res. 32 (2018) 449.
- [3] M. Kamran e M. Anis-ur-Rehman, Enhanced transport properties in Ce doped cobalt ferrites nanoparticles for resistive RAM applications, J. Alloys Compd. 822 (2020) 153583.
- [4] A. Hashhash e M. Kaiser, Influence of Ce-Substitution on Structural, Magnetic and Electrical Properties of Cobalt Ferrite Nanoparticles, J. Electron. Mater. 45 (2016) 462.
- [5] A. Hashhash, I. Bobrikov, M. Yehia, M. Kaiser e E. Uyanga, Neutron diffraction and Mössbauer spectroscopy studies for Ce doped $CoFe_2O_4$ nanoparticles, J. Magn. Magn. Mater. 503 (2020) 166624.

Resistência ao ataque químico em placas cerâmicas de revestimento sustentáveis produzidas a partir de resíduo vítreo

Daysianne K M Isidorio^{a*}, Francisco S B G Júnior^b, Maria I B Rorigues^b, Breno P Bezerra^c

^aInstituto Militar de Engenharia (IME)

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

^bUniversidade Federal do Cariri (UFCA)

Av. Tenente Raimundo Rocha Nº 1639 –Bairro Cidade Universitária
Juazeiro do Norte - Ceará

^c Universidade Federal de São Carlos

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310 – 13565-905 - São Carlos - SP

*daysiannekessy@ime.eb.br

RESUMO: As cerâmicas de revestimento esmaltado são baseadas em vidros que utilizam fritas cerâmicas, ocasionando custos de produção que podem ser reduzidos usando resíduos vítreos. Neste trabalho, foram incorporados resíduos vítreos às três camadas da placa cerâmica de revestimento (suporte, engobe e esmalte), com teores diferentes, para avaliar a resistência ao ataque químico e a presença de defeitos. Três matérias-primas para a produção das placas foram usadas: argila caulínica, resíduo vítreo incolor e Pedra Cariri. Foram analisadas três formulações com diferentes teores de resíduo vítreo, e três diferentes temperaturas de queima, 1000, 1100 e 1200 °C. Ensaios físico-químicos mostraram que é possível substituir fritas cerâmicas por resíduos vítreos para produzir placas de revestimento cerâmico resistentes a ataque químico e livres de falhas de processamento.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos vítreos. Resistência a ataque químico. Revestimentos cerâmicos. Sustentabilidade.

ABSTRACT: Glazed ceramic tiles are based on glass, that use ceramic frits whose costs may be reduced using vitreous residues. The purpose of this work was to incorporate vitreous residue in the three layers of the ceramic tile plates (support, glaze and engobe) with different concentrations to evaluate the resistance to chemical attack and the absence of defects. Three raw materials for the production of the plates were used: kaolinitic clay, colorless glassy residue and Cariri stone. Three support formulations were studied which had different concentrations of vitreous residue and different firing temperatures, 1000, 1100 and 1200 °C. Physicochemical tests showed that there is a possibility of replacing ceramic frits by vitreous residues to produce resistant glazed ceramic tile plates to chemical attack and free from processing defects.

KEYWORDS: Vitreous residues. Resistance to chemical attack. Ceramic coating. Sustainability.

1. Introdução

O Brasil é um grande produtor e consumidor de revestimentos cerâmicos; por conta disso e também pela necessidade de produção de materiais mais sustentáveis, há um interesse relevante no desenvolvimento de revestimentos cerâmicos produzidos a partir de resíduos sólidos [1].

As placas cerâmicas para revestimento são materiais compostos de argila e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos

e paredes, sendo conformadas por extrusão ou por prensagem [2]. Essas placas durante o processamento são secadas e queimadas à temperatura de sinterização podendo ser esmaltadas.

Uma placa de revestimento cerâmico divide-se em três camadas: suporte, engobe e esmalte. Para o suporte é utilizado argila. Os engobes cerâmicos como camadas intermediárias entre o suporte e o esmalte, os quais podem ser constituídos por matérias-primas não plásticas como fritas, caulins, zirconita, feldspatos, alguns tipos de argilas, entre

outras [2]. O esmalte é feito de uma camada de vidro aplicada a um corpo de cerâmica.

Dentre a análise do ciclo de vida dos revestimentos cerâmicos, a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres coloca aos fabricantes a necessidade de seguir alguns princípios de sustentabilidade importantes em relação à matéria-prima, energia, resíduos, limpeza, durabilidade, entre outros [1]. Dessa forma a incorporação de resíduo vítreos na produção de placas de revestimentos cerâmicos se torna bastante interessante tanto em relação a custos financeiros e energéticos como na melhora de algumas propriedades do material, como a resistência ao ataque químico das placas.

Um resíduo que pode ser introduzido ao material é a Pedra Cariri, a qual vem se tornando alvo de estudos em vários projetos por ser uma rocha formada por uma grande quantidade de óxido de cálcio que reduz a solubilidade dos vidros. Consequentemente, diminui a energia usada na produção.

Devido à grande quantidade de placas de revestimentos cerâmicos produzidos e de resíduos vítreos gerados por diversas indústrias, há crescentes debates acerca da sustentabilidade tornando imprescindível avaliar produtos que reduzam o descarte desses resíduos, podendo ainda, fornecer peças que tenham boas propriedades e tragam muitos benefícios à sociedade local.

2. Desenvolvimento

2.1 Materiais para placas cerâmicas

Quatro materiais foram utilizados para constituir o suporte, engobe e esmalte: Argila Caulinítica (obtida na Cerâmica Gomes de Mattos, localizada na cidade de Crato – CE), resíduo vítreo (em formato de ampolas, sem coloração, sem contaminação, cedido por uma empresa que atua no segmento industrial farmacêutico da Região do Cariri – CE), resíduos da Pedra Cariri (coletadas amostras significativas de resíduos da Pedra Cariri

amarela das mineradoras existentes no município cearense de Nova Olinda – CE) e agente ligante carboximetilcelulose (CMC).

2.2 Formulação do suporte

Os suportes cerâmicos foram formulados a partir dos resultados do FRX com intuito de incorporar à massa cerâmica diferentes teores do resíduo vítreo e estudar seus efeitos, **tabela 1**.

Pesou-se as matérias-primas em uma balança analítica da Shimadzu, modelo UW620H, posteriormente foram misturadas e homogeneizadas a seco em moinho de bolas por 10 min. Cada formulação foi umedecida e homogeneizada com 7% de água, em peso, sendo peneirada com ABNT 30 (600 μ m), embalada em saco plástico e mantida por 24 h para obter uma boa uniformidade. Para conformação, foi utilizada uma prensa hidráulica manual Bovenau P15 ST, através de uma matriz metálica de base retangular com dimensões de 80 mm x 25 mm. A massa utilizada para cada corpo de prova foi de 22 g, tendo aplicação de carga máxima de 4 t mantida por 1 min, obtendo-se uma espessura cerca de 6 mm. Após a prensagem, a etapa seguinte é a secagem, que ocorreu a 110 °C por 24 h em uma estufa *Ethick* 208D. Em seguida, foram medidas as dimensões dos corpos de prova com o auxílio de um paquímetro digital e esses foram pesados em balança analítica. Foram feitos ao todo quarenta e cinco corpos de prova, sendo quinze de cada formulação. Foram utilizadas três temperaturas para a queima (1000, 1100 e 1200 °C), em que cinco corpos de prova, de cada formulação, foram queimados nas respectivas temperaturas a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e manutenção por três horas na temperatura máxima.

2.3 Formulação e preparação do suporte, engobe e esmalte

Para a aplicação do engobe, foi avaliado o engobe e suporte que tiveram suas retrações lineares de queima com maior aproximação, a fim de reduzir falhas. Na

tabela 2, encontram-se os dados das formulações de ambas as camadas.

Tab. 1 – Formulação dos suportes cerâmicos (% em peso).

Matéria-prima	Formulações		
	Suporte 1	Suporte 2	Suporte 3
Argila Caulinitica	100%	95%	90%
Resíduo Vítreo	-	5%	10%

Tab. 2 – Formulação da composição adequada para suporte cerâmico engobe e esmalte (% em peso).

Matéria-prima	Camadas		
	Suporte	Engobe	Esmalte
Argila Caulinitica	95%	40%	-
Resíduo Vítreo	5%	55%	100%
Pedra Cariri	-	5%	-
CMC	-	-	0,2%

A produção dos corpos de prova do suporte escolhido se deu de forma similar ao item 2.2, na produção dos suportes 1, 2 e 3, seguindo as mesmas etapas. Foram feitos ao todo cinquenta corpos de prova. Quarenta corpos de prova foram produzidos pela formulação do suporte 2 e dez do suporte 3.

Para a preparação do engobe, foram pesados 80 gramas de argila, 110 gramas de vidro moído e 10 gramas de Pedra Cariri. Toda a massa foi peneirada em ABNT 200 e misturada em agitador mecânico, adicionando-se água às matérias-primas. A adição de água se deu por teores no máximo de 95 mL de água, o que resultou em uma ótima viscosidade para aplicação. O esmalte foi misturado em moinho de bolas por 30 min, o qual foi composto por 135,6 g de resíduo vítreo e 0,27 g de CMC. A aplicação do engobe se deu através de pinceladas de forma simples, porém uniforme. Após a secagem, o esmalte foi aplicado por derramamento uniforme em toda a superfície. Aplicadas as camadas, esperou-se por 24 h para a secagem total de dez dos corpos de prova (suporte 2), em estufa a 100 °C, e quarenta (trinta do suporte 2 e dez do suporte 3) corpos de prova secaram

à temperatura ambiente. Na sinterização, os corpos de prova foram levados ao forno, que foi programado para atingir a temperatura de 800 °C, permanecendo no patamar por uma hora. A taxa utilizada foi de 5 °C/min.

2.4 Materiais para o ataque químico

Para a avaliação da resistência ao ataque químico, foram utilizados os seguintes reagentes na forma sólida: ácido cítrico, cloreto de amônia e hidróxido de potássio.

2.4.1 Aplicação dos reagentes

Para diluição dos reagentes foi seguido a norma ABNT 13818 [3]. Nessa etapa do estudo, cada reagente, em forma de solução, foi aplicado a cinco corpos de prova (apenas para o suporte 2). Para o cloreto de amônia é definido 100g/L para diluir a solução. Manipulou-se 5 gramas de reagente sólido em 50 mL de água destilada. Seguindo de aplicação nos corpos de prova ficando sob ataque por 24 h. Para o hidróxido de potássio, a norma orienta que para cada litro de água, diluir 30 g de reagente, utilizando 1,5 gramas do reagente em 50 mL de água. Com esse agente agressivo o tempo de ataque foi de 96 horas. O terceiro reagente, ácido cítrico, seguiu o mesmo padrão do cloreto de amônia e mesmo tempo de exposição. Após diluir os reagentes, limpou-se a superfície esmaltada a ser ensaiada com álcool isopropílico, seguido de aplicação do engobe.

3 Resultados e discussão

3.1 Análise química das matérias-primas (FRX)

Para o melhor engobe, os vidros foram cominuídos em moinho de bolas por 3 h (via seca), enquanto a argila e os resíduos de Pedra Cariri foram cominuídos em moinho martelo. Em seguida, peneirados em uma ABNT nº 200. As amostras das matérias-primas foram caracterizadas por fluorescência de raios X (FRX) conforme Tabela 3.

Há uma baixa concentração de óxidos cromóforos

(Fe_2O_3 e TiO_2) tornando a matéria-prima atrativa para a obtenção de produtos de cerâmica de queima branca. As concentrações mínimas (<1%) de K_2O , MgO , CaO e outros óxidos foram considerados como impurezas. Observou-se dentro dos analitos da argila e do vidrado que há uma quantidade alta de SiO_2 . O vidro soda-cal é composto basicamente de sílica (mais de 70%) [5]. Óxidos como TiO_2 e o Al_2O_3 , presentes na amostra, são estabilizantes que reduzem o ponto de fusão e viscosidade do vidro melhorando a trabalhabilidade em baixas temperaturas.

Tab. 3 – Análise química por Fluorescência de Raios X (FRX) das matérias-primas.

Concentrações em peso (%)		
Analito	Argila	Resíduo de Vidro
SiO_2	64,37	81,72
Al_2O_3	29,03	8,76
Fe_2O_3	3,04	0,07
K_2O	1,07	0,13
MgO	0,91	-
TiO_2	0,71	-
CaO	0,51	1,88
BaO	0,17	-
SO_3	0,10	0,25
Na_2O	-	7,19
MnO	0,03	-
ZnO	0,01	-
Outros	0,05	-

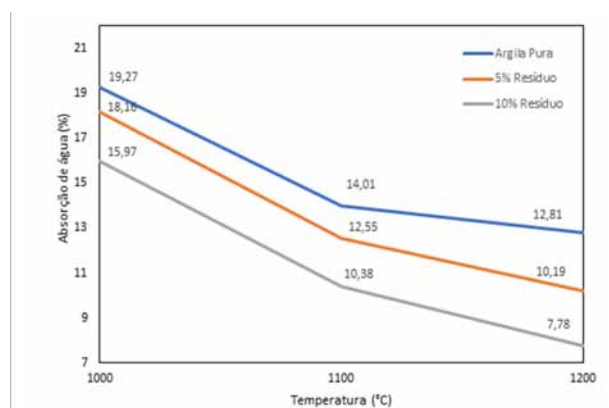


Fig. 1 - Absorção de água dos três suportes a diferentes temperaturas.

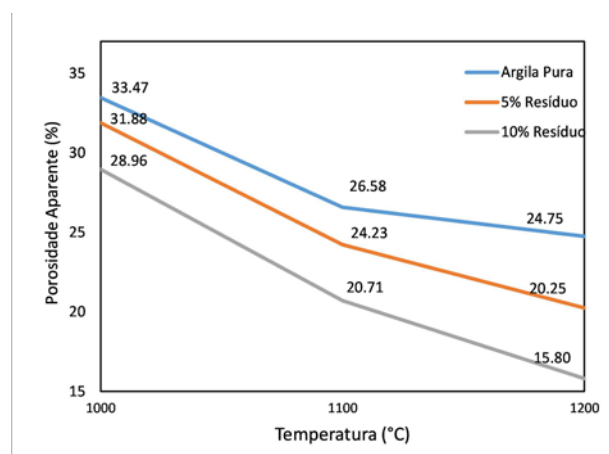


Fig.2 - Porosidade aparente dos três suportes a diferentes temperaturas.

3.2 Propriedades físico-mecânicas do suporte

3.2.1 Absorção de água

Em análise da absorção de água (**figura 1**), vemos que as amostras com os maiores teores de resíduo vítreo resultam em menor absorção de água, bem como o aumento de temperatura influencia na redução de absorção. Dado o fato de que argilas plásticas tendem a perder água, anteriormente atraída na umidificação, durante a sinterização. Através da ISO 13006, o suporte 3 é considerado como o grupo BIIb ($6 < E \leq 10$), os demais fazem parte do grupo BIIIb ($E > 10\%$).

3.2.2 Porosidade aparente

A porosidade aparente diminui pela existência do resíduo vítreo e conforme seu aumento na composição, influenciando também no aumento da temperatura (**figura 2**). Esse fenômeno ocorre devido à difusão do vidro para o interior dos poros, eliminando-os significativamente.

3.2.3 Massa específica aparente

A massa específica aparente determina a densidade aparente do corpo cerâmico. Conferindo a veracidade dos resultados anteriores sobre a relação entre absorção de água e porosidade, mostrados na **figura 3**.

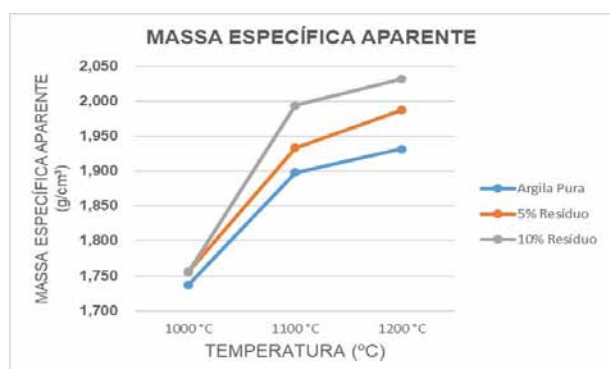


Fig. 3 – Massa específica aparente dos três suportes a diferentes temperaturas.

De acordo com o gráfico, na temperatura de 1000 °C, os valores obtidos foram relativamente baixos. Pode-se notar uma maior densidade para os corpos cerâmicos com 10% de resíduo sólido queimados na temperatura de 1200 °C, esse valor pode ser explicado em consequência do teor de vidro na formulação, haja visto que o vidro tem um ponto de fusão menor que o corpo cerâmico e quando se torna um líquido, difunde-se para os poros, fazendo-os cessar.

3.2.4 Retração linear de queima

A retração linear é uma propriedade importante, que influencia na planaridade de uma placa de revestimento, sendo observada durante processo, justificando as falhas de curvatura, pois as dimensões das peças queimadas não devem produzir diferenças de retrações. As retrações lineares de ambas as camadas devem ter a menor diferença em porcentagem, a fim de obter a anulação de curvaturas. A **figura 4** mostra o comportamento da retração linear para os três suportes, à diferentes temperaturas.

As retrações lineares obtidas para os engobes foram: E1 (7,52%), E2 (3,78%), E3 (4,14%), E4 (7,15%) e E5 (7,5%). Em conformidade com o exposto (**figura 4**), a escolha para a análise é do E2, com formulação de 40% em argila, 55% de vidro A e 5% de pedra Cariri, o qual tem variação mínima de retração comparado ao suporte 2.

3.2.5 Resistência mecânica à flexão

No intuito de caracterizar os corpos de prova

segunda essa propriedade, utilizou-se do ensaio de resistência mecânica à flexão de carregamento em três pontos, seguindo ainda o anexo C da NBR 13818:1997, através da máquina flexora da marca Gabbrielli, modelo Flexi 1000 LX-650. Há uma associação significativa dessa resistência aos defeitos contidos no material em especial os defeitos ligados aos poros.

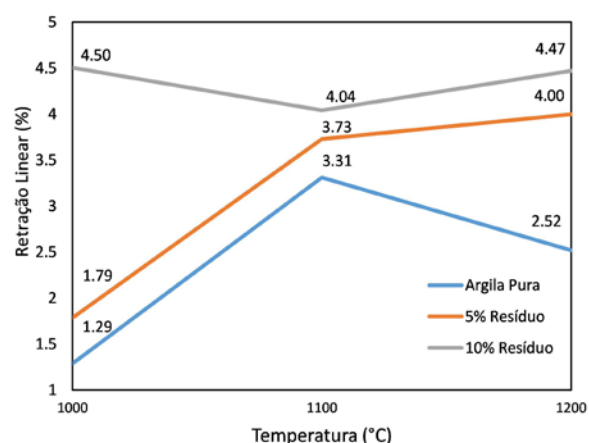


Fig. 4 – Retração linear dos três suportes a diferentes temperaturas.

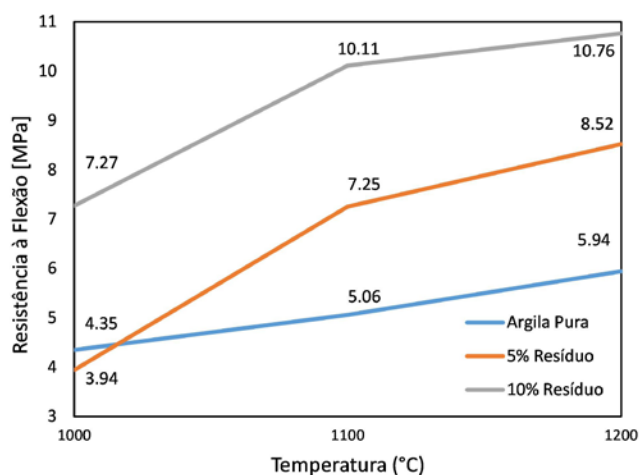


Fig. 5 – Módulo de resistência à flexão dos três suportes à diferentes temperaturas.

Comparando as matérias-primas estudadas (**figura 5**), observa-se que o aumento da resistência mecânica do suporte está associado a dois

fatores: (1) aumento da temperatura de queima, fornecendo combinação da sílica com o CaO da própria argila, observada através do gráfico, em que seguindo o aumento da temperatura há o aumento de resistência; (2) a adição de resíduo de vidro que contém temperatura de fusão menor que a argila provoca difusão entre os contornos de grãos depositando-se nos poros.

3.3 Propriedades físico-químicas e mecânicas da placa esmaltada

Como os resultados, obtidos para o suporte 2, foram compatíveis para a retração linear do engobe e o suporte 03 atingiu ótimos resultados de propriedades físico-mecânicas, em conformidade com as análises, o suporte escolhido para o prosseguimento foi o suporte 2, pela aproximação da retração linear ter menor variação, e assim estudar a possibilidade de melhor acoplamento e menor falha durante a produção. E o suporte 3 devido às outras propriedades.

3.3.1 Absorção de água

Os poros caracterizam o material por enfraquecê-lo. Após a sinterização, as cerâmicas vítreas usualmente são porosas, o que posteriormente é reduzido devido à aplicação de engobe seguida de esmaltagem. Em relação à absorção de água, para o suporte 2, obteve-se o resultado de absorção de água 10,91% em média. Foi realizado também o mesmo ensaio para o suporte 3, o qual obteve porcentagem de 6,29%. De acordo com a NBR 13.818, o suporte 2 é classificado como BIII, enquanto que o suporte 3 é classificado como BIIb, devido a seu melhor desempenho, já que os poros foram fechados, provavelmente, devido à incorporação do vidrado ao biscoito.

3.3.2 Porosidade aparente

Avaliando as duas formulações de corpos de prova, é possível notar que os valores caracterizam a veracidade da absorção de água. O suporte 2 obteve maior porosidade, 20,82% de poros totais abertos, enquanto que o suporte 3 alcançou menor

valor, com 12,25%.

3.3.3 Massa específica aparente

As densidades caracterizadas pelo ensaio de absorção de água e porosidade foram capazes de comprovar a coerência no estudo dessa placa, o qual informa os valores de densidades para o suporte 2 com 1,909 g/cm³ e para o suporte 3, o valor 1,955 g/cm³, isso decorre da quantidade de poros oriundos pela quantidade de resíduo vítreo na formulação, bem como pela temperatura máxima durante a queima. Fatos esses que tendem a diminuir a porosidade de acordo com o aumento no resíduo e temperatura.

3.3.4 Resistência mecânica à flexão

Nesse estudo, o resultado obtido com relação à resistência mecânica para o suporte 2 foi 201,61 N. De acordo com o anexo T da NBR 13.818, essa placa de revestimento cerâmico com o teor de 5% resíduo vítreo e queima à temperatura máxima de 1100 °C é apropriada para uso de revestimento em parede, pela sua carga de ruptura ter alcançado o valor 200 N \geq suporte 2 \geq 400 N. O módulo de resistência à flexão foi de 8,71 MPa, sendo regulamentado o valor de 12 MPa como o mínimo para uso, embora tenha sido desconsiderado devido à irregularidade em relação as curvas na camada superficial.

3.3.5 Resistência ao ataque químico

Para afirmar a possibilidade de utilizar essa placa de revestimento cerâmico em paredes, protegidas ao ataque químico quanto às soluções envolvidas no estudo, houve o ensaio dos efeitos visíveis, não encontrados na superfície. Então utilizou-se do ensaio do lápis, o qual também foi removido com facilidade. As placas de revestimento cerâmico com o resíduo vítreo incorporado às três etapas de produção tiveram seus ensaios de resistência ao ataque químico realizados coerente à Norma, em que definiu para as soluções utilizadas (ácido cítrico, cloreto de amônia e hidróxido de potássio) os seguintes resultados mostrados na **tabela 4**.

Tab. 4 – Resultados da classificação de resistência ao ataque químico em acordo com as soluções utilizadas. G (Esmaltado), A (classe de resistência química) e L (baixa concentração).

Soluções	Classificação da Resistência
Ácido Cítrico	GLA
Cloreto de Amônia	GLA
Hidróxido de Potássio	GLA

De acordo com a norma, a placa de revestimento cerâmico está apta a ser utilizada para revestimento quanto à resistência ao ataque químico pelas soluções

utilizadas. Tendo sua resistência à lápis também. A classificação A para as três soluções recomenda que a placa é caracterizada pela resistência química mais elevada.

4 Conclusão

Os resíduos vítreos quando adicionados às massas formuladas em toda a placa de revestimento cerâmico, obtiveram resultados adequados em relação às caracterizações físico-químicas para uma produção sustentável pela indústria.

Referências Bibliográficas

- [1] ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. O mercado brasileiro: a indústria brasileira de cerâmica para revestimento. [Acesso em: 03 mar. 2019]. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/brasil>.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13816: Placas cerâmicas para revestimento - Terminologia. Rio de Janeiro, 1997.
- [3] BOSCHI, A. et al. Efeito das propriedades dos esmaltes e engobes sobre a curvatura de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica*, v. 58, n. 345, p. 118–125, 2012.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.
- [5] PEREIRA FILHO, F.I.; COSIN, S.; TOFFOLI, S.M. (2002). Utilização de vidro em pó em cerâmica vermelha. Parte 2: influência da granulometria. Congresso Brasileiro de engenharia e Ciência dos Materiais. Natal – RN.

Agora, você tem mais facilidade em suas mãos.

Acesse. Simule. Contrate.

Sujeito a alteração sem aviso prévio.
Consulte as normas e condições vigentes.



Correção pela
TR, pelo **IPCA**
ou juros
Prefixados

Juros ainda
menores

#fiqueemcasa



www.poupex.com.br

0800 61 3040



PÓS-GRADUAÇÃO NO IME

Bolsas: CAPES, CNPq e FAPERJ

Mestrado

- Engenharia Nuclear
- Engenharia Elétrica
- Engenharia de Transportes
- Sistemas e Computação

Mestrado e Doutorado

- Química
- Ciência dos Materiais
- Engenharia de Defesa



Apoio:



CREA-RJ
Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura
e Agronomia do Rio de Janeiro

Matrículas: Fluxo Contínuo

Tel.: (21) 2546-7114 – Fax: (21) 2546-7089 – www.ime.eb.br – sd1@ime.eb.br