



# REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

Versão impressa: ISSN 0102-3543

Volume XL - 1º Trimestre de 2023

## ENGENHARIA MILITAR

**Mobilidade,  
Contramobilidade e  
Proteção**

Identificação de sistemas não lineares por meio do ajuste de modelos LPV com coeficientes polinomiais - Pág 3

Produção e caracterização de grânulos de biomateriais HA, HA/SiO<sub>2</sub> e KNN - Pág 24

Comando e controle como inovação organizacional na prestação de serviços públicos de saúde - Pág 36

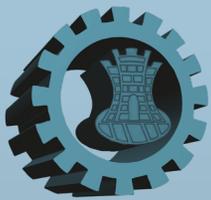
Engenharia Dirigida a Modelos Aplicada à Cognição de Rádios em Operações Militares - Pág 53

Análise de Hidroxiapatita substituída com vidro sob diferentes rotas de sinterização - Pág 67

Recomendações para preenchimento de resumos de dados geoespaciais - Pág 74

Pralidoxima: revisão sobre sua síntese e propriedades antidotais contra agentes neurotóxicos de guerra - Pág 87





REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Comandante do Exército:

Gen Ex Tomás Miguel Ribeiro Paiva

Departamento de Ciência e Tecnologia:

Gen Ex Achilles Furlan Neto

Departamento de Educação e Cultura do Exército:

Gen Ex Francisco Carlos Machado Silva

Comandante do Instituto Militar de Engenharia:

Gen Div Juraci Ferreira Galdino

Diretor da BIBLIEx:

Cel Art Marcos Walfrido Ricarte Figueiredo

CORPO REDATORIAL:

Editor-chefe:

Prof. Dr. Fernando Manuel Araújo Moreira

Editor-chefe adjunto:

Prof. Dr. Álvaro José Boareto Mendes

Editores adjuntos:

Prof. Dr. Marcelo de Miranda Reis

Prof. Dr. Paulo Henrique Coelho Maranhão

Editores de área:

Engenharia Civil, Transportes e Ciências Ambientais: Prof. Dr. Filipe Almeida Corrêa do Nascimento • Engenharia Elétrica e áreas afins: Prof. Dr. Antônio Eduardo Carrilho da Cunha • Engenharia Mecânica e áreas afins: Prof. Dr. André Luiz Tenório Rezende • Engenharia Química e áreas afins: Prof. Dr. Julio Zukerman Schpector • Engenharia Cartográfica: Prof. Dr. Wagner Braga Nunes Coelho • Engenharia Nuclear: Profa. Dra. Inaya Correa Barbosa Lima • Ciência e Engenharia de Materiais: Prof. Dr. André Ben-Hur da Silva Figueiredo • Ciência e Engenharia da Computação: Prof. Dr. Paulo Cesar Salgado Vidal • Engenharia de Defesa: Prof. Dr. Giuseppe Miceli Junior • Outras áreas: Prof. Dr. Marcelo de Miranda Reis

Editores associados externos:

• Dr. André Fenili – Universidade Federal do ABC, Santo André, SP • 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. 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

DIREÇÃO, IMPRESSÃO E DISTRIBUIÇÃO:

Diretor:

Cel Art Marcos Walfrido Ricarte Figueiredo

Editor executivo:

Cap R1 Antônio Carlos Manhães de Souza

ADMINISTRAÇÃO, REVISÃO, PROGRAMAÇÃO E DIAGRAMAÇÃO:

Coordenação: INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA – IME

Redação, Diagramação e OJS:

Rubenildo Python de Barros

Marcela Fagundes Casotti

Luiz Tadeu Carqueija Mota

Revisão Tikinet:

Revisores: Cristina Saez; Guilherme Oliveira; Picro Kanaan • Diagramador: Ilário Junior

Impressão e distribuição:

BIBLIEx



Desde 1949

"A Gráfica do Exército" - Compromisso com a Qualidade

Impresso na Gráfica do Exército

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

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

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

PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL



REVISTA MILITAR de  
CIÊNCIA e TECNOLOGIA

REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA - Volume XL

1º Trimestre de 2023

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA - IME

Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha -

Rio de Janeiro-RJ - CEP 22.290-270 -

Tel.: (21) 2546-7115

Website: <https://ebrevistas.eb.mil.br/CT> - Email:

[rmct@ime.eb.br](mailto:rmct@ime.eb.br)

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 NOSSA REVISTA DIGITAL



Nossa capa:

Homenagem ao Quadro de Engenheiros Militares





O século XIX é conhecido como a era das grandes máquinas, o século XX é a era da informação, e o século XXI começou como a era da inovação. Mas isso durou pouco mais de uma década, quando mudou para a era das tecnologias quânticas. Estamos vivendo uma quebra total de paradigmas na ciência, na tecnologia, na inovação (CT&I) e, mais do que nunca, nos conflitos bélicos. O século XXI conheceu nada menos do que três gerações de guerra, e provavelmente novas gerações aparecerão. Tudo isso decorreu dos incríveis avanços em CT&I aplicados ao aumento tanto da capacidade de defesa quanto do poder de combate nos diferentes domínios de guerra e teatros de operações.

Em 1915, o almirante britânico John Fisher declarou que as guerras no futuro seriam ganhas pelas invenções – nada mais visionário do que isso. A Segunda Guerra Mundial alçou a CT&I ao patamar de assunto de extrema relevância para nortear os destinos de um país. Para incentivar, países proeminentes, como os Estados Unidos da América, desencadearam políticas e ações estratégicas de longo prazo. O relatório elaborado por Vannevar Bush, diretor do Escritório de Pesquisa Científica e Desenvolvimento, em 1945, por determinação do presidente Franklin D. Roosevelt, e as contribuições de outros visionários ajudaram a definir o novo modelo norte-americano de desenvolvimento em CT&I, em substituição àquele que destinava a maioria dos investimentos governamentais a pesquisas militares. Em essência, nesse novo modelo a pesquisa científica básica, desenvolvida sem preocupação de aplicação imediata, assume importância crucial pelo vasto rol de conhecimentos produzidos que, utilizados por terceiros, gerariam aplicações de outro modo impossíveis de vislumbrar. Nele, atores públicos e privados, civis e militares, compartilham a responsabilidade pela realização da pesquisa científica básica e aplicada e pelo desenvolvimento tecnológico. Hoje são inúmeras as invenções e inovações de vital importância no mundo civil e decorrentes diretamente de conflitos bélicos.

É nesse contexto que se encontra o Instituto Militar de Engenharia, uma universidade corporativa bicentenária que tem como objetivo primordial atender às necessidades do Exército Brasileiro, sem deixar de lado aplicações duais que possam contribuir de alguma maneira para a sociedade civil.

Nessa conjuntura, é primordial o papel desempenhado pela *Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT)*, uma publicação regular do Exército Brasileiro. Visando alcançar esses objetivos, esta edição da RMCT marca a retomada dos trabalhos, colocando-a em dia, com novo corpo editorial e uso de novas tecnologias, por meio da contratação de editora especializada e de excelência. O periódico está aberto à publicação de trabalhos com aderência e de boa qualidade, oriundos de autores civis e militares. Recepcionando artigos tanto do Brasil quanto do exterior, a RMCT publica sem custo algum, tendo como um dos objetivos ser uma opção de publicação de acesso aberto (*open access*).

Nesta edição, apresentamos sete artigos de diferentes áreas da engenharia, com especial ênfase em engenharia militar. Desejamos a todos uma profícua leitura!

**Dr. Eng. Fernando M. Araujo-Moreira**  
Editor-chefe da RMCT

---

# SUMÁRIO

---

- 3** Identificação de sistemas não lineares por meio do ajuste de modelos LPV com coeficientes polinomiais  
Itamar Pifano Silva, Roberto Ades, Paulo Cesar Pellanda, Marcelo de Araujo Oliveira
- 24** Produção e caracterização de grânulos de biomateriais HA, HA/SiO<sub>2</sub> e KNN  
Pedro de Farias Vanzan, Suzana Noronha Ferreira Ribeiro, Amal Elzubair, Marcelo Henrique Prado da Silva
- 36** Comando e controle como inovação organizacional na prestação de serviços públicos de saúde  
Sylvio Jorge Souza Junior, Fabio Oliveira Paula, Paulo Cesar Pellanda
- 53** Engenharia Dirigida a Modelos Aplicada à Cognição de Rádios em Operações Militares  
Marcus Albert Alves da Silva, Gabriel Bozza, Milena Mayara Ruy, Cláudia Reis Cavalcanti, David Fernandes Cruz Moura, David Fernandes Cruz Moura
- 67** Análise de Hidroxiapatita substituída com vidro sob diferentes rotas de sinterização  
Andrey Mariano dos Santos, Iana Costa Carvalho, Ygor Pereira de Lima, A. Elzubair, Suzana Noronha Ferreira Ribeiro, André Luís de Vasconcelos Cardoso, Marcelo Henrique Prado da Silva
- 74** Recomendações para preenchimento de resumos de dados geoespaciais  
Carolina Coutinho Salustiano Silva, Ivanildo Barbosa
- 87** Pralidoxima: revisão sobre sua síntese e propriedades antidotais contra agentes neurotóxicos de guerra  
Pedro Augusto Gomes Buitrago, Samir Frontino de Almeida Cavalcante, Valdir Florêncio da Veiga Júnior

# Identificação de sistemas não lineares por meio do ajuste de modelos LPV com coeficientes polinomiais

Itamar Pifano Silva<sup>1\*</sup>, Roberto Ades<sup>2</sup>, Paulo Cesar Pellanda<sup>1</sup>, Marcelo de Araujo Oliveira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia - Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 29.270-030

<sup>2</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica – Av. Maracanã, 229, Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 20.271-110

\*itamarps@ime.eb.br

roberto.ades@cefet-rj.br

pcpellanda@ieee.org

oliveira.marcelo@ime.eb.br

**RESUMO:** Este artigo apresenta um método para a identificação ou ajuste de modelos LPV com coeficientes polinomiais. O método é aplicável a sistemas multivariáveis e para a aproximação do comportamento de sistemas não lineares. Discute-se também a extensão para múltiplos parâmetros variantes. Um modelo de suspensão de um automóvel foi empregado para ilustrar o método proposto, tendo sido ajustados modelos com parâmetros endógenos e exógenos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Identificação de sistema; Sistemas não lineares; Sistemas LPV; Quasi-LPV; Modelos LPV.

**ABSTRACT:** This paper presents a method for the identification or tuning of LPV models with polynomial coefficients. The method is applicable to multivariable systems and to fit the behavior of nonlinear systems. It also presents an extension for multiple varying parameters. A Quarter-Car suspension model was used to illustrate the proposed method, and models with endogenous and exogenous parameters were adjusted.

**KEYWORDS:** System identification; Nonlinear systems; LPV systems; Quasi-LPV; LPV model.

## 1. Introdução

Em termos de controle de sistemas não lineares, entre as abordagens propostas na literatura consta o clássico método de *gain scheduling*, que faz uso dos métodos de projeto linear e suas ferramentas já consolidadas. Apesar de ser bastante empregado, este não garante a estabilidade e o desempenho fora dos pontos de operação considerados nos projetos lineares, especialmente nos casos em que a taxa de variação paramétrica é elevada. O fato de existir uma ligação entre a formulação de LMIs (do inglês *Linear Matrix Inequalities*) e a Teoria de Lyapunov tem permitido que os critérios de estabilidade e desempenho desenvolvidos para sistemas lineares sejam estendidos para sistemas lineares não estacionários, em especial para a classe geral de sistemas LPV (do inglês *Linear Parameter Varying*) [1].

O controle LPV, com estabilidade local ou global e desempenho garantidos em grandes envelopes do domínio de operação de sistemas multivariáveis, tem se apresentado como uma alternativa real ao clássico

método de *gain scheduling*. Os ganhos dos controladores LPV são automaticamente programados sem a necessidade de nenhum método *ad hoc* ou interpolação. Desde meados da década de 1990, as técnicas de controle LPV evoluíram significativamente através de três métodos distintos [2, 3]: politópicos, de gradeamento e LFT (do inglês *Linear Fractional Transformation*). Nos métodos politópicos, consideram-se os modelos de alguns pontos de operação, em princípio gerados pelos valores extremos das coordenadas do vetor de parâmetros variantes. Os demais pontos de operação são obtidos a partir da combinação afim entre esses modelos extremos, o que pode não ser verdadeiro. A desvantagem deste tipo de abordagem está relacionada também com o conservadorismo, que provavelmente incluirá uma gama de situações que, apesar de consideradas, podem não ocorrer na prática. Por outro lado, o problema de otimização a ser resolvido, inicialmente de dimensão infinita, se transforma em um problema com dimensão finita e igual ao número de vértices do politopo, uma vez que os demais modelos são determinados pela combinação afim dos modelos nesses vértices [4, 5, 6].

Nos métodos de gradeamentos, testa-se o espaço de parâmetros variantes em um *grid* de valores, considerando trajetórias realistas. A vantagem desse tipo de metodologia é a redução do conservadorismo em relação a abordagem politópica. Encontram-se na literatura algoritmos recursivos e por LMIs desse tipo de metodologia. Por outro lado, ela apresenta sérias restrições em relação ao número de parâmetros variantes, isto é, o esforço computacional cresce exponencialmente e inviabiliza o tratamento de sistemas LPV com mais de dois parâmetros variantes. Além disso, conta-se também com a hipótese de que o sistema sob análise seja relativamente bem-comportado, de maneira que sua dinâmica possa ser aproximada sem um grande aumento da densidade do *grid* [7, 8, 6].

No caso das abordagens LFT, o modelo LPV deve ser transformado em um modelo LFT. Com isso, as aplicações desta metodologia ficam restritas aos casos em que os modelos LPV apresentam funções específicas dos parâmetros variantes, como por exemplo funções polinomiais dos parâmetros variantes. Uma vez obtido o modelo LFT, a síntese  $\mu$  e outras podem ser empregadas para o cálculo do controlador [9, 10].

Uma grande variedade de aplicações de controle LPV foi inicialmente desenvolvida na área aeronáutica, porém as aplicações estão se expandindo para diversas outras áreas, sendo validadas por experimentos ou simulações de alta fidelidade, conforme apresentado em [11]. Um dos principais gargalos hoje na aplicação das técnicas de controle LPV é a ausência de métodos para obtenção de modelos LPV. Essa necessidade promoveu o interesse da comunidade científica que atua na área de identificação de sistema, de forma a se conseguir produzir modelos de sistemas não lineares ou não estacionários, com o objetivo final de uso dos métodos de controle LPV existentes.

Os métodos de identificação de sistemas visam a obtenção de modelos a partir dos sinais medidos das entradas e saídas de uma planta sob estudo [12]. Basicamente, podem ser classificados em duas frentes, dependendo da estrutura do modelo: a identificação paramétrica e a não paramétrica. O caso da identificação não paramétrica envolve uma estrutura não determinada e, conseqüentemente, um número in-

determinado a priori de parâmetros. A identificação não paramétrica LPV tem basicamente se dividido em três principais abordagens: (a) da função de dispersão; (b) da máquina de vetor de suporte de mínimos quadrados LS-SVM (do inglês *Least Squares-Support Vector Machine*) e (c) baseadas na configuração Bayesiana, respectivamente [13, 14, 15] *apud* [16]. Quanto à estimação paramétrica, a estrutura a ser identificada encontra-se estabelecida previamente e um número determinado de parâmetros deverá ser ajustado.

Os métodos de identificação de sistemas LPV [17] podem ser classificados, conforme definido em [18], em duas principais áreas, de acordo com a representação matemática utilizada, LPV-IO (do inglês, *Input-Output*) e LPV-SS (do inglês, *State Space*).

Os métodos LPV-SS adotam uma representação discreta em espaço de estado ou sua equivalente LFR (do inglês, *Linear Fractional Representation*), que permitem a representação de sistemas MIMO (do inglês, *Multiple-Input Multiple-Output*). Mais informações sobre as abordagens que fazem uso da estrutura LPV-SS podem ser obtidas em [18].

Este trabalho faz uso da representação LPV-IO, que utiliza como estrutura matemática os modelos discretos de séries temporais. Na maioria dos casos, faz uso da configuração de predição de erro LTI e geralmente é tratado somente para o caso SISO (do inglês, *Single-Input Single-Output*). Um modelo discreto na forma de séries temporais pode ser representado como:

$$y(k) = -\sum_{i=1}^n a_i(\theta)q^i y(k) + \sum_{j=0}^m b_j(\theta)q^j u(k) + e(k) \quad (1)$$

em que  $q$  é o operador de atraso no domínio do tempo, de forma que:

$$q^p y(k) = y(k - p) \quad (2)$$

A variável  $e(k)$  é o ruído do processo, normalmente um ruído branco com média nula,  $n \geq m$ , e os coeficientes  $\{a_i\}_{i=1}^n$  e  $\{b_j\}_{j=0}^m$  são dependentes do parâmetro  $\theta$ .

A estimação dos coeficientes  $a_i$  e  $b_j$  no modelo (1) pode ser realizada conforme definido em [18]:

(i) Abordagem por interpolação. Os métodos que utilizam essa abordagem são aqueles oriundos do

clássico conceito de *gain-scheduling*, caracterizados por considerar como ponto de operação valores específicos do parâmetro variante que, uma vez congelado, determina a estrutura de predição de erro do sistema LTI, permitindo a identificação de modelos locais. O modelo global é obtido através da interpolação dos modelos locais, conforme desenvolvido em [19, 20].

(ii) Abordagem por associação de conjuntos. Nesse caso, o ruído nos dados medidos é tratado como incerteza determinística e, em vez de uma estimativa direta dos coeficientes, é calculado um conjunto de valores viáveis deles, conforme apresentado em [21, 22]. Este conjunto viável representa os valores dos coeficientes que satisfazem a equação do modelo em (1) e a priori com um erro assumido menor ou igual ao do ruído nos dados medidos. Uma estimativa direta do coeficiente é obtida calculando-se a média dos valores no conjunto viável. Geralmente, essa abordagem utiliza métodos de programação não convexa.

(iii) Abordagem por programação não linear. Os coeficientes  $\{a_i\}_{i=1}^n$  e  $\{b_j\}_{j=0}^m$  do modelo de séries temporais em (1) são estimados por meio de métodos de programação não linear para minimizar o erro médio quadrático de predição [13, 23]. O objetivo é realizar uma melhor estimativa que a dos métodos de regressão linear. Em alguns casos, isso é feito por meio de uma parametrização não linear:

$$\begin{aligned} a_i(\theta) &= \alpha_{i,0} + \alpha_{i,1}Z \\ b_j(\theta) &= \beta_{j,0} + \beta_{j,1}Z \end{aligned}$$

em que  $\alpha_{i,0}$ ,  $\alpha_{i,1}$ ,  $\beta_{j,0}$  e  $\beta_{j,1} \in \mathbb{R}$  e a variável  $Z$  é a saída de uma rede neural artificial que utiliza como entradas o vetor de saídas  $[(y(k) \ y(k-1) \ \dots)]^T$ , o vetor de entradas  $[(u(k) \ u(k-1) \ \dots)]^T$  e o vetor das medidas do parâmetro variante  $[(\theta(k) \ \theta(k-1) \ \dots)]^T$  do sistema a ser identificado. Esta abordagem, na maioria dos casos, utiliza um procedimento misto de programação linear e não linear por meio de métodos de regressão linear combinados com redes neurais.

(iv) Abordagem por regressão linear. Emprega-se estruturas de modelos lineares de séries temporais discretas, como por exemplo o ARX (do inglês *Autoregressive with Exogenous Inputs*), bastante difundido na literatura de identificação de sistemas LTI, o qual

faz parte do pacote de identificação de sistemas do software MATLAB®.

No caso LPV, os coeficientes  $\{a_i\}_{i=1}^n$  e  $\{b_j\}_{j=0}^m$  de (1) são funções polinomiais do parâmetro variante, como:

$$\begin{aligned} a_i(\theta) &= \alpha_{i,0} + \sum_{p=1}^{N_i} \alpha_{i,p} \theta^p \\ b_j(\theta) &= \beta_{j,0} + \sum_{p=1}^{M_j} \beta_{j,p} \theta^p \end{aligned}$$

Dessa forma, faz uso do conceito de predição do erro LTI via mínimos quadrados, recursivos ou não, bem como variáveis instrumentais que conduzem a um ajuste melhor na presença de sinais com ruído. Como resultado, um modelo linear nos parâmetros é obtido por regressão linear, conforme o trabalho precursor de [24], abordagem utilizada neste trabalho.

Em [25] é proposto um método de identificação LPV-IO pela abordagem por regressão linear, que busca uma estrutura de modelo parcimoniosa, não paramétrica, que possa capturar a dependência desconhecida dos coeficientes  $\{a_i\}_{i=1}^n$  e  $\{b_j\}_{j=0}^m$  em função do parâmetro variante em (1). Essa dependência pode variar entre as formas polinomial, racional ou ainda funções descontínuas. Para obter uma solução eficiente, é proposto no artigo o método LS-SVM, que conduz a uma construção do modelo sem as informações a priori de ordem e atraso do sistema em estudo. Originalmente desenvolvido como uma classe dos métodos de aprendizagem supervisionado, conforme apresentado em [26, 27] *apud* [25], onde é usado para obter a estrutura do modelo.

Em [28], um método baseado em IV (do inglês, *Instrumental-Variable*) para correção de viés foi desenvolvido para a identificação de modelos SISO LPV-IO, do tipo ARX, a partir de medições da saída e do sinal do parâmetro variante, corrompidas por ruído. O processo de ruído associado à saída é considerado colorido, de média zero e com distribuição desconhecida, enquanto as medições do sinal do parâmetro variante são afetadas por um ruído gaussiano branco. O método proposto elimina o viés resultante dos métodos originários de LS (do inglês, *Least-Squares*)

quando negligenciam o ruído de medição existente no sinal do parâmetro variante. Assim, fornece uma estimativa consistente de modelos LPV com dependência polinomial do parâmetro variante, cujo instrumento usado só precisa ser não correlacionado com o ruído que corrompe as observações de saída. Dessa forma, uma aproximação para o parâmetro variante sem ruído não precisa ser calculada.

O trabalho desenvolvido em [29] é uma análise do critério de predição de erro um passo à frente usado nos processos de identificação LPV, com o objetivo de obter novas funções de *kernel* [27, 30], a serem aplicadas em processos de identificação LPV-IO de modelos não paramétricos do tipo *Box-Jenkins*.

Em [31] é apresentado um esquema de correção de viés para identificação de malha fechada de modelos LPV-IO, pela abordagem de regressão, causado pela correlação entre o sinal de entrada que excita o processo e o ruído de saída. O algoritmo de identificação proposto fornece uma estimativa consistente dos parâmetros do modelo de malha aberta quando o sinal de saída e o sinal da variável do parâmetro variante são corrompidos pelo ruído de medição.

Em [32] é apresentada uma identificação LPV-IO não paramétrica por regressão, usando LS-SVM para a estimação do ângulo de derrapagem de um automóvel de passeio, em substituição do sensor usado em automóveis comerciais, devido ao seu alto custo. A problemática do artigo é inspirada em [21], que utiliza o método de abordagem de associação de conjuntos, porém o artigo faz uso do método proposto em [25].

O trabalho de [33] apresenta um estudo de identificação LPV-IO através da abordagem de regressão, na busca de um modelo global com estrutura não paramétrica sem exigir muita informação a priori da ordem do modelo, usando o espaço de Hilbert por meio do RKHS (do inglês, *Reproducing Kernel Hilbert Space*), que corresponde a um problema de otimização quadrática global diretamente solucionável com restrições de LMI, para a seleção da estrutura do modelo parcimonioso a ser identificado.

Em [34] é apresentado um método LPV-IO por regressão *online*, em que a análise da dinâmica é realizada no domínio do parâmetro variante ou em função

deste nomeado pelos autores de regressor causal, em vez do domínio do tempo. Como resultado, os coeficientes a serem identificados são reestimados usando apenas dados presentes e, pelo menos, uma estimativa anterior, ou seja, cada predição de coeficientes não depende necessariamente de sua estimativa no instante anterior, mas de uma de suas estimativas passadas em um instante em que seus regressores causais associados são semelhantes aos presentes. O critério proposto para medir essa semelhança é a norma das diferenças entre os regressores causais atuais e os passados. O método proposto apresentou baixo custo computacional para ajuste semelhante dos coeficientes, em comparação aos métodos tradicionais *offline*.

Neste trabalho foram adotadas algumas ideias apresentadas em [24], tendo sido propostos os seguintes desenvolvimentos adicionais: extensão do método para sistemas multivariáveis; obtenção da solução a partir de um lote de dados armazenados em vez da estimação pela forma recursiva; utilização de polinômios com graus independentes em cada coeficiente do modelo; expansão com múltiplos parâmetros variantes e a realização da defasagem temporal no modelo entre a saída corrente e a entrada mais recente, que corresponde ao aumento do grau relativo da função de transferência do modelo identificado. A técnica proposta foi também utilizada para aproximar modelos não lineares no formato Quasi-LPV por modelos LPV com coeficientes polinomiais. Para ilustrar o método proposto, explorou-se um sistema de suspensão de automóvel em diversas situações, com variações de parâmetros e não linearidades, aproximando-as por modelos LPV.

Com relação à estrutura deste trabalho, a seção 2 apresenta as definições de sistemas LPV e Quasi-LPV, a seção 3 apresenta o método proposto com a extensão para sistema multivariável e expansão para múltiplos parâmetros variantes. Na seção 4, encontra-se formulado o problema tratado para suspensão de  $\frac{1}{4}$  de automóvel com diversas situações de não linearidades, dependendo do tipo e da quantidade de parâmetros variantes. Por fim, a seção 5 segue com as considerações finais e conclusões.

## 2. Sistemas LPV/Quasi-LPV

Um sistema LPV ou Quasi-LPV é aquele cujas matrizes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  na representação em espaço de estados não são constantes e variam em função de parâmetros exógenos ou endógenos ao sistema. Esses parâmetros, que alteram a dinâmica do sistema, são denominados parâmetros variantes  $\theta$ . Um parâmetro variante exógeno é aquele que é externo ao sistema; já o endógeno é caracterizado como um parâmetro interno, representado por um dos estados do sistema ou uma função dele. Ambos os parâmetros variantes devem ser mensuráveis para que possam retratar o sistema. Dependendo dos parâmetros variantes utilizados na representação do sistema, os modelos podem ser classificados como LPV ou Quasi-LPV.

Um modelo LPV é reconhecido por ter todos os parâmetros variantes exógenos e mensuráveis. A seguir, apresenta-se a definição de modelos LPV.

**Definição 1** – Modelo LPV [35], *apud* [36]: Dado um subconjunto compacto  $P \subset \mathbb{R}^d$ ,  $F_p$  representa o operador que mapeia  $t \in \mathbb{R}^+$  em um vetor  $\theta(t) \in P$  de parâmetros externos, cujas componentes são funções contínuas por partes  $\forall t \in \mathbb{R}^+$ . Considere ainda as funções contínuas,  $A:P \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B:P \rightarrow \mathbb{R}^{n \times w}$ ,  $C:P \rightarrow \mathbb{R}^{z \times n}$  e  $D:P \rightarrow \mathbb{R}^{z \times w}$ . Um modelo LPV de ordem  $n$  é definido como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\theta(t)) & B(\theta(t)) \\ C(\theta(t)) & D(\theta(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Pode-se acrescentar que o modelo LTV (do inglês, *Linear Time Varying*) é um caso particular de sistema LPV, em que as matrizes da dinâmica dependem do parâmetro variante  $\theta(t) = t$ .

Um modelo Quasi-LPV é um modelo não linear que se assemelha ao modelo LPV em (3). Neste caso, o vetor  $\theta(t)$  é composto por dois tipos de parâmetros variantes, os exógenos e os endógenos, ambos mensuráveis.

**Definição 2** – Modelo Quasi-LPV [36]: Seja  $\theta(t) \in P$  tal que  $\theta(t) = [\Omega(t)^T z(t)^T]^T$ , em que  $\Omega(t)$  corresponde ao vetor das variáveis exógenas, de forma similar ao sistema LPV em (3), e  $z(t)$  corresponde ao vetor das variáveis endógenas, contendo alguns estados do sistema

ou funções destes, que interferem na dinâmica do sistema. O modelo Quasi-LPV pode ser definido por:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}(t) \\ \dot{\eta}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(\theta(t)) & A_{12}(\theta(t)) & B_1(\theta(t)) \\ A_{21}(\theta(t)) & A_{22}(\theta(t)) & B_2(\theta(t)) \\ C_1(\theta(t)) & C_2(\theta(t)) & D(\theta(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ \eta(t) \\ u(t) \end{bmatrix},$$

em que o vetor de estados  $x(t) = [z(t)^T \eta(t)^T]^T$  e  $\eta(t)$  representa o vetor contendo os estados que não interferem nas matrizes do modelo.

O exemplo a seguir retrata uma manipulação matemática para transformar um sistema não linear em um modelo Quasi-LPV. Os parâmetros variantes endógenos considerados são os responsáveis pelas não linearidades do sistema e devem ser mensuráveis para caracterizar essa representação.

Conforme [2], a título de exemplificação, considere a planta não linear modelada pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \text{sen}(x_1) + x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_1 x_2 + u \end{aligned}$$

em que  $u$  é a entrada do sistema e considerando  $x_1$  e  $x_2$  como os estados do modelo, pode-se definir  $x = [x_1 \ x_2]$  como o vetor de estados. Assim, uma representação Quasi-LPV desse modelo não linear poderia ser

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \text{sen}(x_1)/x_1 & 1 \\ x_2 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u.$$

Essa representação pode não ser adequada, a menos que  $x_1$  e  $x_2$  sejam mensuráveis e  $x_1 \neq 0 \forall t \in \mathbb{R}^+$ . Nesse caso, existem somente os parâmetros variantes endógenos e  $\eta(t) = \emptyset$ . Assim  $x(t) = z(t)$  e  $z(t) = [x_1 \ x_2]^T$ .

Supondo que se tenha somente  $x_1$  mensurável, uma representação mais adequada poderia ser:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \text{sen}(x_1)/x_1 & 1 \\ 0 & x_1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u,$$

que permite reescrever a equação de forma que a matriz de estado somente possua dependência na variável  $x_1$ , ou seja,  $z(t) = x_1$  e  $\eta(t) = x_2$ .

## 3. Método proposto

O problema aqui tratado consiste em ajustar um modelo LPV com coeficientes polinomiais, de forma que a

sua saída  $\hat{y}$  se aproxime, segundo alguma norma previamente definida, da saída do sistema físico não linear. A proposta é que o modelo seja discreto e esteja sob a forma de uma série temporal, cujos coeficientes possam ser polinômios dependentes do parâmetro variante  $\theta = \theta(t)$ . Trata-se inicialmente apenas do caso SISO com um único parâmetro variante. Para identificação do modelo, considera-se que o sistema sob estudo esteja previamente monitorado com sensores, de forma que os dados temporais de suas entradas, saídas e do parâmetro variante, ainda que contínuos, sejam aquisitados segundo uma conveniente taxa de amostragem  $T$ .

Do mesmo modo que em [24], adotou-se a classe de modelos LPV discretos no tempo, parametrizados da seguinte forma:

$$A(q, \theta)y(k) = B(q, \theta)u(k) \quad (4)$$

em que  $q$  é o operador de atraso, conforme definido em (2), o qual conduz aos polinômios em função do parâmetro variante, de acordo com:

$$A(q, \theta) = 1 + a_1(\theta)q + \dots + a_n(\theta)q^n \quad (5)$$

$$B(q, \theta) = b_1(\theta)q^r + b_2(\theta)q^{r+1} + \dots + b_m(\theta)q^{r+m-1} \quad (6)$$

Além disso, considerou-se que o parâmetro variante  $\theta$ , embora contínuo, tenha sido transformado em uma função do tempo discreto, ou seja,  $\theta := \theta(kT) = \theta_k$ , em que  $T$  é o período de amostragem.

Assim, por (4), (5) e (6), a estrutura do modelo identificado, em forma de série temporal, pode ser escrita como:

$$y_k = -a_1 y_{k-1} - a_2 y_{k-2} - \dots - a_n y_{k-n} + b_1 u_{k-r} + b_2 u_{k-r-1} + \dots + b_m u_{k-r-m+1}, \quad (7)$$

em que  $y_k = y(kT)$  e  $u_k = u(kT)$ ,  $n$  é a ordem do modelo e representa o número de termos autorregressivos do sinal de saída,  $m$  é o número de termos da entrada,  $r$  é o atraso entre a saída atual e a entrada mais recente considerada, e em que  $m + r - 1 \leq n$ .

Considerou-se, ainda, que os coeficientes do modelo acima possuam dependência polinomial em relação ao parâmetro variante  $\theta = \theta_k$ . Assim,  $\forall i \in \{1, \dots, n\}$  e  $N_i \in \mathbb{N}$ :

$$a_i = a_i(\theta) = \alpha_{i,0} + \alpha_{i,1}\theta + \alpha_{i,2}\theta^2 + \dots + \alpha_{i,N_i}\theta^{N_i}. \quad (8)$$

Da mesma forma, para os coeficientes da variável de entrada  $u$ ,  $\forall j \in \{1, \dots, m\}$  e  $M_j \in \mathbb{N}$ :

$$b_j = b_j(\theta) = \beta_{j,0} + \beta_{j,1}\theta + \beta_{j,2}\theta^2 + \dots + \beta_{j,M_j}\theta^{M_j} \quad (9)$$

O parâmetro variante  $\theta(t)$  é considerado mensurável, mas pode estar defasado da saída corrente, ou seja:

$$y_k = f(\theta_{k-\gamma}), \quad (10)$$

em que  $\gamma \in \{0, \dots, n\}$ . Usualmente, adota-se  $\gamma = 1$ , ou seja, a determinação da saída atual depende do valor de  $\theta$  no instante anterior.

Embora tenha sido adotada a estrutura em (7) na forma de série temporal, é importante observar que assim definida, possuirá uma correspondência biunívoca com os modelos na forma em espaço de estado, bastando a utilização de uma realização canônica. Desta forma, o cálculo de autovalores de um modelo poderá ser determinado da forma usual, a partir da equação característica:

$$\det(A(\theta(t) - \lambda I) = 0.$$

Tendo em vista os exemplos na seção 4, definem-se os vetores contendo as ordens dos polinômios em cada coeficiente dos termos autorregressivos da saída e dos termos da entrada, conforme (8) e (9):

$$N = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_n] \in \mathbb{N}^n \\ M = [M_1 \quad M_2 \quad \dots \quad M_m] \in \mathbb{N}^m \quad (11)$$

O número  $\xi$  de parâmetros a serem identificados pode ser calculado por meio de:

$$\xi = n + m + \sum_{i=1}^n N_i + \sum_{j=1}^m M_j. \quad (12)$$

Dado o sistema (4), estruturado conforme (5) a (12), o **Teorema 1** mostra como são determinados os coeficientes polinomiais a serem identificados, a partir da resolução de um sistema de equações lineares e dos dados de entrada, de saída e do parâmetro variante, todos medidos previamente no sistema físico.

**Teorema 1** – Considere  $u_k, y_k$  e  $\theta_k$ , com  $k \in \{1, \dots, p\}$ , as séries de dados medidos referentes, respectivamente,

à entrada, à saída e ao parâmetro variante do sistema em (4). Os coeficientes polinomiais em (5) e (6) do modelo LPV podem ser determinados por meio da resolução do seguinte sistema de equações lineares:

$$AX = \begin{bmatrix} A_\alpha & A_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = B, \quad (13)$$

em que:

$$A_\alpha = \begin{bmatrix} Y_{n-1,N_1} & Y_{n-2,N_2} & \cdots & Y_{0,N_n} \\ Y_{n,N_1} & Y_{n-1,N_2} & \cdots & Y_{1,N_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{p-1,N_1} & Y_{p-2,N_2} & \cdots & Y_{p-n,N_n} \end{bmatrix},$$

$$A_\beta = \begin{bmatrix} U_{n-r,M_1} & U_{n-r-1,M_2} & \cdots & U_{n-r-m+1,M_m} \\ U_{n-r+1,M_1} & U_{n-r,M_2} & \cdots & U_{n-r-m+2,M_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ U_{p-r,M_1} & U_{p-r-1,M_2} & \cdots & U_{p-r-m+1,M_m} \end{bmatrix},$$

$$X_\alpha = -[\alpha_{1,0} \quad \alpha_{1,1} \quad \cdots \quad \alpha_{1,N_1} \quad \alpha_{2,0} \quad \cdots \quad \alpha_{n,N_n}]^T,$$

$$X_\beta = [\beta_{1,0} \quad \beta_{1,1} \quad \cdots \quad \beta_{1,M_1} \quad \beta_{2,0} \quad \cdots \quad \beta_{m,M_m}]^T,$$

$$B = [y_n \quad y_{n+1} \quad y_{n+2} \quad \cdots \quad y_p]^T \in \mathbb{R}^{p-n+1},$$

$$Y_{k,p} = y_k [1 \quad \theta_{k-\gamma} \quad \theta_{k-\gamma}^2 \quad \cdots \quad \theta_{k-\gamma}^p] \in \mathbb{R}^{p+1},$$

$$U_{k,p} = u_k [1 \quad \theta_{k-\gamma} \quad \theta_{k-\gamma}^2 \quad \cdots \quad \theta_{k-\gamma}^p] \in \mathbb{R}^{p+1}.$$

*Demonstração:* O sistema de equações lineares em (13) decorre diretamente de (7). Para um determinado instante de tempo  $t = kT$ , a equação (7) pode ser reescrita com o auxílio de (8) e (9) da seguinte forma:

$$y_k = -(\alpha_{1,0} + \cdots + \alpha_{1,N_1} \theta^{N_1}) y_{k-1} - \cdots - (\alpha_{n,0} + \cdots + \alpha_{n,N_n} \theta^{N_n}) y_{k-n} + (\beta_{1,0} + \cdots + \beta_{1,M_1} \theta^{M_1}) u_{k-r} + \cdots + (\beta_{m,0} + \cdots + \beta_{m,M_m} \theta^{M_m}) u_{k-r-m+1},$$

de maneira que:

$$y_k = [Y_{k-1,N_1} \quad \cdots \quad Y_{k-n,N_n} \quad U_{k-r,M_1} \quad \cdots \quad U_{k-r-m+1,M_m}] \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix}.$$

Considerando que  $k \in \{n, n + 1, \dots, p\}$ , chega-se ao sistema de equações lineares em (13).

O sistema linear resultante do **Teorema 1** é sobredeterminado. Vários métodos podem ser utilizados para a sua solução, como a pseudo-inversa, escalonamento e pivoteamento parcial, Gauss-Jordan e outros. Uma alternativa consiste na utilização de métodos de programação não linear, buscando a minimização de  $\|AX - B\|$ , que é um problema convexo [37]. Não obstante neste caso, por meio de transformações matemáticas, também é possível a utilização de métodos de programação linear, tais como os pacotes de resolução de LMI [38].

No caso de um sistema multivariável com  $\omega$  entradas e  $\zeta$  saídas, considera-se que cada uma das saídas possa ser identificada independentemente, isto é, que o problema original possa ser decomposto em um conjunto de  $\zeta$  problemas MISO (do inglês, *Multiple-Input Single-Output*) com  $\omega$  entradas independentes. Assim, para cada saída  $i$ , com  $i \in \{1, 2, \dots, \zeta\}$ :

$$A_i(q, \theta) y_{i,k} = B_1(q, \theta) u_{1,k} + \cdots + B_\omega(q, \theta) u_{\omega,k}, \quad (14)$$

em que  $y_{i,k}$  representa a saída  $y_i$  no instante  $t = kT$ . Utilizando o **Teorema 1** e desenvolvendo (14), de forma análoga ao caso SISO, é possível determinar um sistema de equações lineares para calcular os coeficientes dependentes do parâmetro variante  $\theta$  em  $A_i, B_1, \dots, B_\omega$ .

Com múltiplas entradas, o vetor  $\mathbf{M}$  em (11) se transforma em uma matriz, com cada linha apresentando os graus das expansões polinomiais dos termos de cada entrada. O número de coeficientes  $\xi$  a serem identificados em (12), considerando um único parâmetro variante  $\theta$  passará a ser:

$$\xi = n + m + \sum_{i=1}^n N_i + \sum_{i=1}^{\omega} \sum_{j=1}^m M_{i,j}. \quad (15)$$

### 3.1 Índices de Ajuste

A avaliação do erro de ajuste entre o comportamento do modelo e do sistema dinâmico real é realizado em duas partes. Na primeira, denominada de erro de ajuste dos coeficientes, testa-se o erro no cálculo dos coeficientes durante o processo de identificação, a partir dos dados medidos na entrada e na saída do sistema físico. Utilizando (13) e que  $v = p - n + 1$ , define-se o vetor de erro de ajuste como:

$$\begin{bmatrix} e_{a,1} \\ e_{a,2} \\ \vdots \\ e_{a,v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 - a_{11}x_1 - \dots - a_{1v}x_v \\ b_2 - a_{21}x_1 - \dots - a_{2v}x_v \\ \vdots \\ b_v - a_{v1}x_1 - \dots - a_{vv}x_v \end{bmatrix},$$

e os índices de ajuste dos coeficientes como:

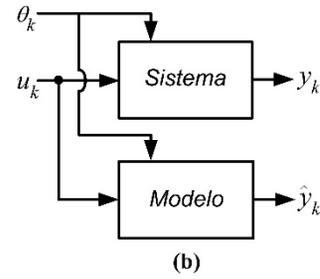
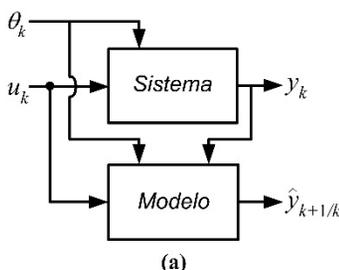
$$J_2^a = \|E_a\|_2 = \sqrt{|e_{a,1}|^2 + |e_{a,2}|^2 + \dots + |e_{a,v}|^2}, \quad (16)$$

$$J_\infty^a = \|E_a\|_\infty = \max\{|e_{a,1}|, |e_{a,2}|, \dots, |e_{a,v}|\}, \quad (17)$$

Observa-se que  $B$  é o vetor contendo as saídas medidas do sistema. Neste caso, avalia-se o erro para a geração da saída atual, considerando que as saídas medidas anteriormente estejam disponíveis. Isto corresponde à estimação um passo à frente da saída, ou seja,  $\hat{y}_{k+\frac{1}{k}}$ , conforme encontra-se ilustrado na Figura 1(a). Também equivale a dizer que o modelo utiliza para a estimação as medidas de saída anteriores do sistema em tempo real. É importante observar que a utilização do modelo neste formato não se confunde com a estimação recursiva, uma vez que seus coeficientes já estão determinados e não serão ajustados durante a operação.

Tendo o modelo sido identificado, é possível avaliar o erro de estimação independente do sistema, a partir de uma simulação, o que é bem mais rigoroso. Adota-se um novo sinal de entrada para a validação, com as mesmas condições iniciais para o sistema e para o modelo. Neste caso, considera-se o modelo de forma autônoma, isto é, que sua saída  $\hat{y}_k$  é gerada exclusivamente a partir da entrada fornecida e da trajetória do parâmetro variante  $\theta$  sem que haja a interferência da saída  $y$  do sistema, conforme mostra a Figura 1(b).

**Figura 1** - Simulação das saídas estimadas: (a) um passo à frente; (b) independente.



O erro para um horizonte de  $h$  períodos de simulação é avaliado da seguinte forma:

$$E_s = \begin{bmatrix} e_{s,1} \\ e_{s,2} \\ \vdots \\ e_{s,h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - \hat{y}_1 \\ y_2 - \hat{y}_2 \\ \vdots \\ y_h - \hat{y}_h \end{bmatrix} = y - \hat{y},$$

e os índices de simulação ou validação por:

$$J_2^s = \|E_s\|_2 = \sqrt{|e_{s,1}|^2 + |e_{s,2}|^2 + \dots + |e_{s,h}|^2}, \quad (18)$$

$$J_\infty^s = \|E_s\|_\infty = \max\{|e_{s,1}|, |e_{s,2}|, \dots, |e_{s,h}|\}, \quad (19)$$

Cabe observar que, utilizando condições iniciais, sinais de entrada, taxa de amostragem e tamanho de amostra iguais na simulação um passo à frente e na simulação livre, obtém-se  $J_2^a \leq J_2^s$ .

### 3.2 Expansão por Múltiplos Parâmetros Variantes

Na situação em que há múltiplos parâmetros variantes  $\theta(t) = [\theta_1(t) \theta_2(t) \dots \theta_d(t)]^T$ , a expansão dos coeficientes do modelo poderá ser realizada em analogia com (8) e (9), considerando também os termos cruzados dos parâmetros variantes. Assim, para o caso de dois parâmetros variantes, os coeficientes dos termos de saída do modelo e, de forma equivalente para os de entrada, teriam o seguinte formato:

$$\begin{aligned} a_i = a_i(\theta_1, \theta_2) = & \alpha_{i,0} + \alpha_{i,1}\theta_1 + \alpha_{i,2}\theta_1^2 + \dots + \\ & + \alpha_{i,N_i}\theta_1^{N_i} + \alpha_{i,N_i+1}\theta_2 + \dots + \alpha_{i,2N_i}\theta_2^{N_i} + \\ & + \alpha_{i,2N_i+1}\theta_1\theta_2 + \alpha_{i,2N_i+2}\theta_1^2\theta_2 + \alpha_{i,2N_i+3}\theta_1^2\theta_2^2 + \\ & + \dots + \alpha_{\frac{i,N_i(N_i+3)}{2}}\theta_1^{N_i-1}\theta_2 \end{aligned}$$

Também neste caso, o número de parâmetros  $\xi$  a serem identificados é impactado de maneira significativa pelo número de componentes  $d$  do vetor  $\theta(t)$ , o que inviabiliza a metodologia proposta para  $d \gg 1$ . Para  $d=2$ :

$$\xi = n + m + \sum_{i=1}^n N_i + \sum_{i=1}^o \sum_{j=1}^m M_{i,j} + \sum_{i=1}^n \gamma_i \frac{N_i(N_i - 1)}{2} + \sum_{i=1}^o \sum_{j=1}^m \rho_{i,j} \frac{M_{i,j}(M_{i,j} - 1)}{2}$$

em que para  $i \in \{1, \dots, n\}$ :  $\gamma_i = \begin{cases} 0, & N_i \leq 1 \\ 1, & N_i > 1 \end{cases}$ ;

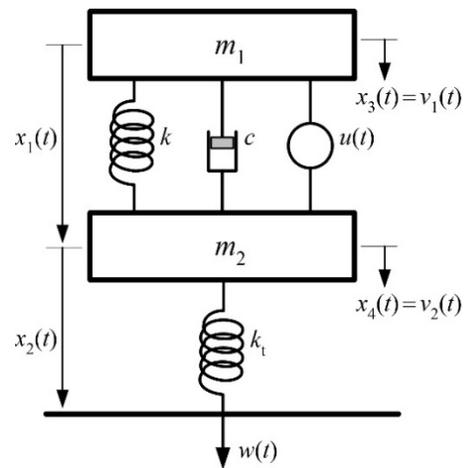
e para  $i \in \{1, \dots, w\}, j \in \{1, \dots, m\}$ :  $\rho_{i,j} = \begin{cases} 0, & M_{i,j} \leq 1 \\ 1, & M_{i,j} > 1 \end{cases}$ .

#### 4. Identificação de modelos LPV em um sistema de suspensão de 1/4 de automóvel

Nesta seção utiliza-se o modelo de suspensão ativa de um automóvel, de quarta ordem, conforme [39] *apud* [40]. Esse modelo, em cada subseção a seguir, sofreu novas considerações em relação ao parâmetro variante, o que conduziu a diferentes graus de não linearidades e possibilitou uma análise mais detalhada e estendida do método proposto.

A Figura 2 ilustra o modelo físico da suspensão ativa de 1/4 de automóvel. A constante  $m_1$  representa a massa amortecida de 1/4 do veículo e  $m_2$  a massa não amortecida de um conjunto roda e pneu. A mola superior, com constante elástica  $k$  e o amortecedor, com constante de amortecimento  $c$ , representam a suspensão propriamente dita do veículo. A mola inferior, com constante de elasticidade  $k_t$ , se refere ao amortecimento gerado pela deformação do pneu durante o deslocamento do veículo na pista. A perturbação  $w(t)$  representa a entrada de excitação do modelo e consiste em um sinal de velocidade vertical devido a irregularidades encontradas na pista. Já a entrada  $u(t)$  representa a força de atuação produzida pelo mecanismo de suspensão ativa. Esta tem por objetivo o isolamento das vibrações na massa  $m_1$ , além de proporcionar maior aderência do veículo à pista.

**Figura 2** - Modelo físico da suspensão ativa de 1/4 de automóvel.



Para a modelagem matemática do conjunto, as variáveis de estado do sistema podem ser definidas como em [39]:

- $x_1$ : distância entre as massas  $m_1$  e  $m_2$ , a partir da posição de equilíbrio;
- $x_2$ : distância entre o eixo da roda e sua base, também da posição de equilíbrio;
- $x_3$ : velocidade vertical  $v_1(t)$  da carroceria em relação ao referencial inercial;
- $x_4$ : velocidade vertical  $v_2(t)$  do eixo da roda em relação ao referencial inercial.

Partindo da definição apresentada dos estados, é possível concluir que:

$$\dot{x}_1 = x_4 - x_3, \quad (20)$$

e ainda,

$$w(t) = \dot{x}_2 + x_4 \text{ ou } \dot{x}_2 = w(t) - x_4, \quad (21)$$

Aplicando a segunda lei de Newton na massa  $m_1$  e considerando que haja uma dependência linear da força com a velocidade no amortecedor, por meio da constante  $c$ :

$$m_1 \dot{x}_3 = kx_1 + cx_3 + u. \quad (22)$$

De (20) em (22):

$$\dot{x}_3 = \frac{k}{m_1} x_1 - \frac{c}{m_1} x_3 + \frac{c}{m_1} x_4 + \frac{1}{m_1} u(t). \quad (23)$$

Aplicando a segunda lei de Newton na massa  $m_2$ :

$$m_2 \dot{x}_4 = -kx_1 + k_t x_2 + cx_3 - cx_4 - u(t),$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{k}{m_2} x_1 + \frac{k_t}{m_2} x_2 + \frac{c}{m_2} x_3 - \frac{c}{m_2} x_4 - \frac{1}{m_2} u(t), \quad (24)$$

Além disso, considerou-se como variáveis de saída a aceleração da massa amortecida  $m_1$  e o estado  $x_2$  [40]. Assim, é possível escrever o modelo matemático sob a forma de espaço de estado, de acordo com:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ \frac{k}{m_1} & 0 & -\frac{c}{m_1} & \frac{c}{m_1} \\ -\frac{k}{m_2} & \frac{k_t}{m_2} & \frac{c}{m_2} & -\frac{c}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ -\frac{1}{m_2} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w(t)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k}{m_1} & 0 & -\frac{c}{m_1} & \frac{c}{m_1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1} \\ 0 \end{bmatrix} u(t). \quad (25)$$

em que  $y(t) = [y_1(t) \ y_2(t)]^T$ ,  $y_1(t)$  é a aceleração da massa  $m_1$  e  $y_2(t)$  o deslocamento da massa  $m_2$ . As saídas do modelo, conforme [40], estão relacionadas com a aceleração da massa amortecida  $x_3$  e a deformação do pneu,  $x_2$ .

Os valores nominais dos parâmetros adotados [39] foram:  $m_1 = 288,9$  kg;  $m_2 = 28,58$  kg;  $c = 850 \frac{Ns}{m}$ ;  $k = 10.000 \frac{N}{m}$ ; e  $k_t = 155.900 \frac{N}{m}$ . Em todos os casos tratados à frente, utilizou-se o período de amostragem  $T=0,0025s$  e a duração das simulações de 2 s, o que totaliza 800 períodos. Neste artigo, os modelos foram determinados com  $\gamma=0$  em (10).

No caso da suspensão ativa, considerando todos os estados mensuráveis, foi adotada a lei de controle  $u(t) = Kx(t)$ , onde  $x(t)$  é o vetor de estados, sabendo que o valor de  $K$  empregado foi obtido de modo a manter um compromisso entre o conforto dos passageiros e a aderência do pneu à pista. O valor de apresentado em [40] e utilizado neste trabalho foi:

$$K = 10^3 \times [-9,9997 \quad -0,0002 \quad +0,8325 \quad -0,8461]$$

Para a simulação dos dados a serem utilizados na identificação, considerou-se que a base do pneu, em

contato com a pista, esteja submetida a uma perturbação em velocidade  $w(t)$  da forma:

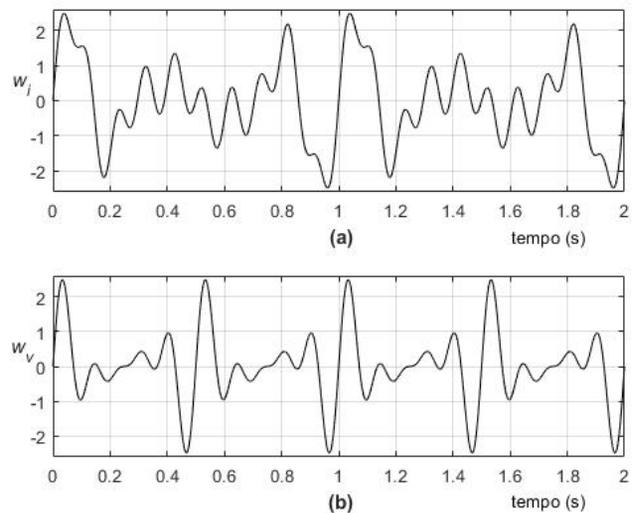
$$w(t) = w_i(t) = 0,9\text{sen}(6\pi t) + 0,5\text{sen}(10\pi t) + 0,75\text{sen}(8\pi t) + 0,6\text{sen}(20\pi t), \quad (26)$$

e para a validação dos modelos, utilizou-se o mesmo sinal que em [40], representado pela equação:

$$w(t) = w_v(t) = 0,6\text{sen}(8\pi t) + 0,75\text{sen}(12\pi t) + 0,9\text{sen}(16\pi t) + 0,5\text{sen}(20\pi t), \quad (27)$$

A Figura 3 apresenta os gráficos dos sinais de entrada  $w(t)$  utilizados para a identificação e validação.

**Figura 3** - Sinais de entrada para: (a) identificação  $w_i$ ; (b) validação  $w_v$ .

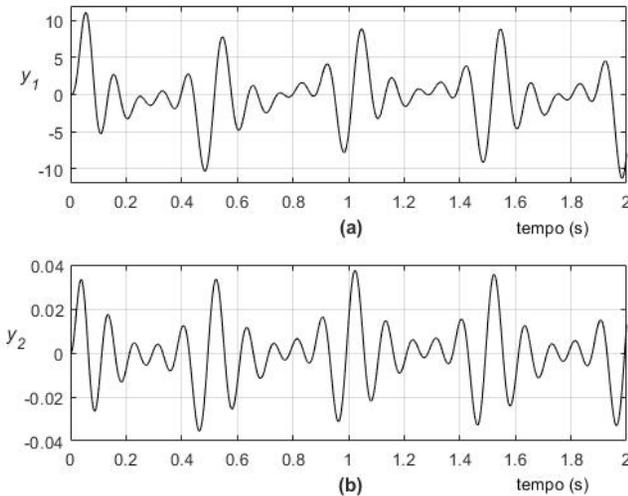


### 4.1 Modelos LTI

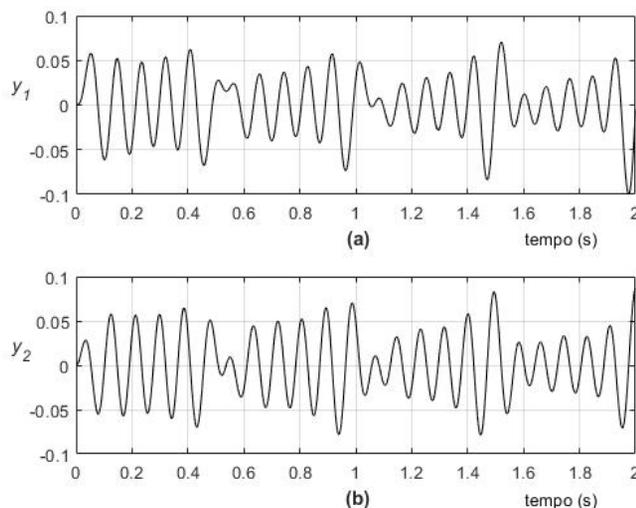
Neste item e no seguinte, considerou-se que a massa  $m_1(\theta) = 288,9 + 100\theta$  e o sinal do parâmetro variante  $\theta(t) = 0,5t$  para  $0 \leq t \leq 2s$ , na fase de identificação. Na validação do modelo, utilizou-se outro sinal para o parâmetro variante, isto é,  $\theta(t) = \text{sen}(0,5\pi t)$ . Assim, a massa apresentou valores na faixa de  $288,9 \leq m_1 \leq 388,9$ ; o que poderia corresponder ao acréscimo de passageiros e bagagens na massa não amortecida. Essa consideração é bastante conservadora em termos da taxa de variação do parâmetro variante, levando em conta um período de 2 segundos de simulação. Ou seja, uma taxa de variação do parâmetro um pouco maior ao que pode acontecer na prática, porém respeitando que todo sistema físico real é um sistema passa baixa.

As Figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, as saídas do sistema nos casos de suspensão passiva e ativa em função da excitação com o sinal de validação  $w_v(t)$  e  $m_1(\theta)$ .

**Figura 4** - Sinais de saída para a validação do modelo de suspensão passiva: (a)  $y_1$ ; (b)  $y_2$ .



**Figura 5** - Sinais de Saída para a validação do modelo de suspensão ativa: (a)  $y_1$ ; (b)  $y_2$ .



Na Tabela 1, encontram-se as características de quatro modelos LTI que foram ajustados para as saídas  $y_1$  e  $y_2$ , nos casos de suspensão passiva e ativa, lembrando que  $m_1 = m_1(\theta)$ .

**Tabela 1** - Características dos modelos LTI identificados.

	Modelos			
	M1	M2	M3	M4
<b>susp.</b>	passiva	passiva	ativa	ativa
<b>saída</b>	$y_1$	$y_2$	$y_1$	$y_2$
<b>n/m/r</b>	4/4/1	4/4/1	2/2/1	2/2/1
<b>N</b>	[0 0 0 0]	[0 0 0 0]	[0 0]	[0 0]
<b>M</b>	[0 0 0 0]	[0 0 0 0]	[0 0]	[0 0]
<b><math>\xi</math></b>	8	8	4	4
<b><math>J_2^a</math></b>	3,4697e-3	5,3165e-7	1,2436e-3	2,8967e-8
<b><math>J_\infty^a</math></b>	6,0661e-4	8,3421e-8	1,6489e-4	2,5778e-9
<b><math>J_2^s</math></b>	38,274	1,0384e-2	1,5798e-1	1,0063e-5
<b><math>J_\infty^s</math></b>	4,2958	6,8445e-4	2,4096e-2	8,5410e-7
<b>max <math>\lambda</math> </b>	0,9952	0,9970	0,9994	0,9998

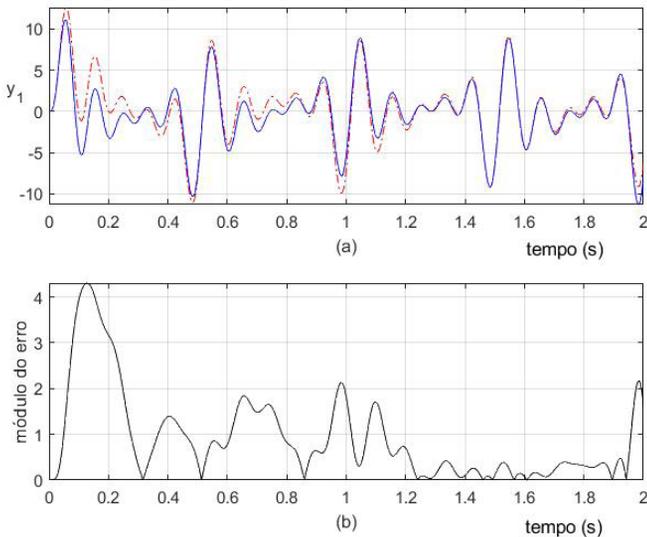
Vale mencionar [40] que a deformação  $x_2$  do pneu, quando comparadas às saídas  $y_2$  nas Figuras 4(b) e 5(b), na suspensão ativa, a excursão foi aproximadamente o dobro, enquanto a aceleração  $y_1$  na Figura 5(a) da massa  $m_1$  amortecida foi da ordem de 1% daquela ocorrida para a suspensão passiva na Figura 4(a).

Cabe observar na Tabela 1 que os elementos dos vetores **N** e **M** em (11) foram nulos, o que corresponde ao ajuste dos modelos LTI. Os valores de  $J_2^a$  e  $J_\infty^a$  nessa tabela e nas seguintes correspondem ao custo de estimação um passo à frente, conforme a Figura 1(a), utilizando a entrada de validação  $w_v(t)$ . Também é oportuno mencionar que os modelos LTI M2 e M4 das saídas  $y_2$ , tanto para a suspensão passiva como para a ativa, tiveram ajustes satisfatórios, não sendo mais essas saídas abordadas nos próximos casos. Os gráficos dos modelos M2 e M4 são exatamente os apresentados nas Figuras 4(b) e 5(b).

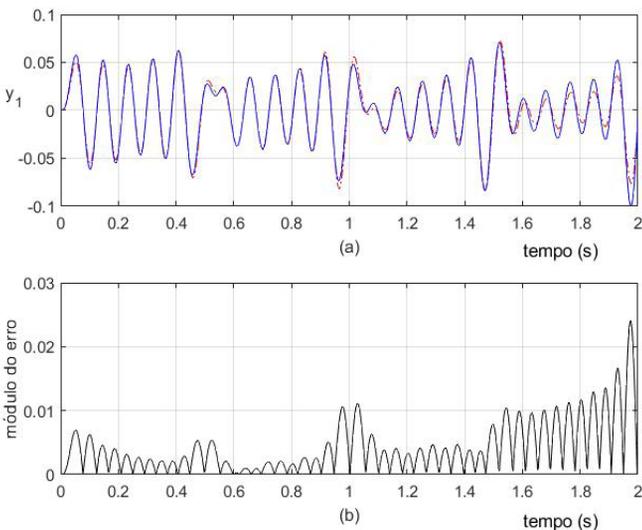
A Figura 6(a) apresenta as saídas  $y_1$  do sistema, em azul, e do modelo LTI M1 identificado, em vermelho, para a suspensão passiva. Na Figura 6(b), ilustra-se o valor

absoluto do erro entre estes sinais de saída. A Figura 7 é a equivalente da Figura 6 para o caso da suspensão ativa.

**Figura 6** - (a) Saídas  $y_1$  do sistema (azul) e do modelo LTI M1 (verm.) com suspensão passiva; (b) valor absoluto do erro entre estas saídas.



**Figura 7** - (a) Saídas  $y_1$  do sistema (azul) e do modelo LTI M3 (verm.) com suspensão ativa; (b) valor absoluto do erro entre estas saídas.



Cabe observar que os valores máximos dos erros de ajuste apresentados nas Figuras 6(b) e 7(b) correspondem aos respectivos valores de  $J_\infty^s$  na Tabela 1 para os modelos M1 e M3.

## 4.2 Modelos LPV com 1 parâmetro exógeno

Nesse caso, identificou-se os modelos lineares a parâmetros variantes (LPV) M5 e M6 na Tabela 2 que melhor reproduziram, respectivamente, o comportamento das saídas  $y_1$  da suspensão passiva e ativa do automóvel, considerando que a massa  $m_1$  é variante no tempo.

**Tabela 2** - Características dos modelos identificados em 4.2 e 4.3.

	Modelos			
	M5	M6	M7	M8
<b>susp.</b>	passiva	ativa	passiva	passiva
<b><math>n/m/r</math></b>	4/4/1	2/2/1	4/4/1	4/4/1
<b>N</b>	[1 0 0 0]	[1 0]	[0 0 0 0]	[1 0 0 0]
<b>M</b>	[2 0 2 2]	[0 1]	[0 0 0 0]	[1 2 1 1]
<b><math>\xi</math></b>	15	6	8	21
<b><math>J_2^a</math></b>	5,6473e-4	3,1939e-4	3,2598e-3	3,5658e-4
<b><math>J_\infty^a</math></b>	1,0453e-4	6,0073e-5	4,0924e-4	5,6716e-5
<b><math>J_2^s</math></b>	3,1698	9,1048e-2	39,014	2,6949
<b><math>J_\infty^s</math></b>	3,4643e-1	9,2476e-3	3,8391	2,4190e-1
<b>max <math>\lambda</math> </b>	0,9966	0,9995	1,0012	0,9980

Comparando os valores de  $J_2^s$  dos modelos M5 e M6 na Tabela 2 com seus correspondentes M1 e M3 na Tabela 1, verifica-se que seus ajustes são significativamente melhores, mas logicamente às custas do aumento do número de parâmetros.

A Figura 8 apresenta os valores absolutos do erro entre as saídas  $y_1$  do sistema e dos modelos validados, tanto para a suspensão passiva quanto para a suspensão ativa. Vale observar que os valores máximos absolutos desses erros nos gráficos da Figura 8 correspondem aos valores de  $J_\infty^s$  na Tabela 2. Comparando os gráficos das Figuras 6(b) e 8(a), verifica-se que o erro de ajuste do modelo LPV encontra-se na faixa de 8% dos valores apresentados pelo modelo LTI. Da mesma forma, para o caso da suspensão ativa com a saída  $y_1$ , comparando-se os gráficos das Figuras 7(b)

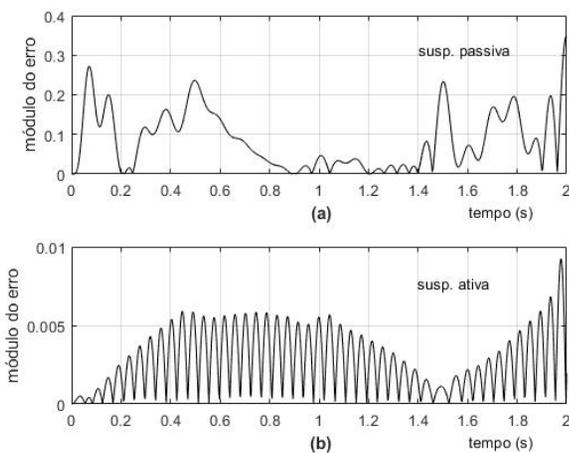
e 8(b), verifica-se que o erro de ajuste do modelo LPV apresenta valores menores que 40% daqueles do LTI.

Uma característica importante observada nos modelos LPV é que seus coeficientes dependem de  $\theta$  e, conseqüentemente, variam ao longo do tempo. Por este motivo, observa-se que seus autovalores também se alteram durante a simulação. Assim, como os modelos são discretos, deseja-se que os autovalores  $\lambda_i = \lambda_i(t)$  atendam a seguinte condição:

$$\max_{0 \leq t \leq 2s} |\lambda_i(t)| < 1.$$

a fim de manter a estabilidade do modelo. Contudo, verificou-se que pequenas ultrapassagens nesse limite nem sempre provocam desajustes entre a saída do modelo e a da planta. Outro aspecto que merece ser citado se refere ao aumento significativo do número de parâmetros a serem ajustados nos modelos LPV. Por fim, observou-se que o ajuste do modelo é bastante dependente da trajetória do parâmetro  $\theta$  e de sua velocidade.

**Figura 8** - Valor absoluto do erro da saída  $y_1$  para os modelos LPV: (a) M5 e (b) M6.



### 4.3 Modelos LPV com 2 parâmetros exógenos

Neste caso, considerou-se que o sistema apresenta dois parâmetros variantes exógenos independentes, que parametrizam a massa  $m_1$  e a constante elástica da mola, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} m_1(\theta_1) &= 288,9 + 100\theta_1, \\ k(\theta_2) &= 9.000 + 2.000\theta_2, \end{aligned}$$

sendo que, para  $0 \leq t \leq 2$  s:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_1(t) = 0,5t, \\ \theta_2 &= \theta_2(t) = \text{sen}(0,5\pi t). \end{aligned}$$

Assim, os parâmetros  $m_1$  e  $k$  variaram durante a simulação nos seguintes intervalos:

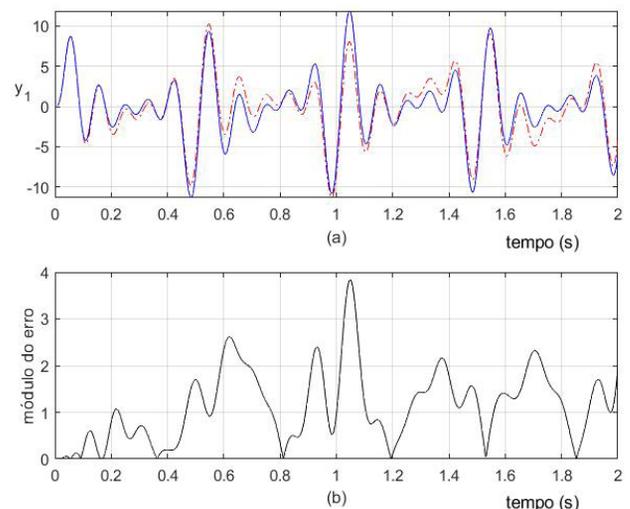
$$\begin{aligned} 288,9 \leq m_1 \leq 388,9; \\ 9.000 \leq k \leq 11.000. \end{aligned}$$

Os parâmetros  $\theta_1$  e  $\theta_2$  acima foram utilizados durante a identificação. Na validação,  $\theta_1 = \text{sen}(0,5\pi t)$  e  $\theta_2 = 0,5t$ .

A Tabela 2 apresenta as características de dois modelos, M7 e M8, ajustados para a saída  $y_1(t)$ , no caso da suspensão passiva com a variação simultânea de  $m_1$  e  $k$ . O modelo M7 é o do tipo LTI, enquanto o M8 é o LPV para os mesmos dados. A Figura 9 apresenta a saída estimada pelo modelo M7, em vermelho, e a correspondente saída do sistema. Observa-se na Tabela 2 que o custo de ajuste  $J_2^s$  de M8 foi menor que 7% do apresentado por M7. Vale mencionar que a saída do modelo M8 coincide com a saída do sistema, em azul, na Figura 9.

A identificação para a suspensão ativa não foi realizada, pois o controlador  $k$  em [39] leva o sistema em malha fechada para instabilidade com a variação simultânea de  $m_1$  e  $k$ .

**Figura 9** - (a) Saídas  $y_1$  do sistema (azul) e do modelo LTI M7 (verm.) com suspensão passiva; (b) valor absoluto do erro entre estas saídas.



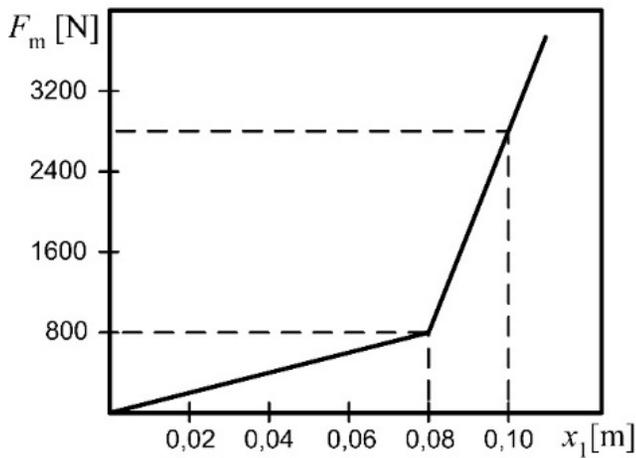
#### 4.4 Modelos LPV com 1 parâmetro endógeno

Neste caso, considerou-se a massa  $m_1 = 288,9$  kg, fixa em seu valor nominal, mas o modelo da mola foi substituído por outro mais realista [41], que considera a constante elástica  $k$  variável a partir de certa deformação, conforme a Figura 10. Como a deformação da mola é o estado  $x_1$ , então  $k$  passa a ser dependente dele, ou seja:

$$k = k(x_1) = \begin{cases} 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}}, & |x_1| \leq 0,08 \text{ m} \\ \frac{800+10^5(|x_1|-0,08)}{|x_1|} \frac{\text{N}}{\text{m}}, & |x_1| > 0,08 \text{ m} \end{cases}$$

e (25) se transforma em um modelo não linear Quasi-LPV, com  $\theta = x_1$ .

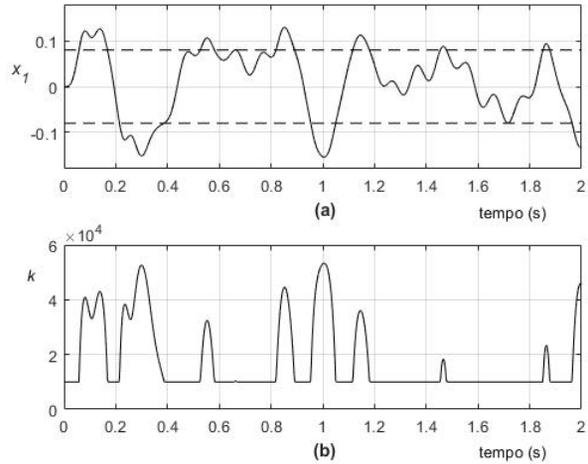
**Figura 10** - Força da mola da suspensão versus deformação.



Na Figura 11, encontra-se ilustrado o comportamento de  $x_1$  e de  $k$  ao longo do tempo para o sinal de entrada  $w_i$ . Quando a deformação  $x_1$  ultrapassa 0,08 m, caracterizada pelas linhas tracejadas na Figura 11(a), a constante elástica  $k$  da mola se torna variável, conforme a Figura 11(b).

Para este caso, foram determinados os modelos M9 e M10 da Tabela 3, que se distinguem pela estrutura paramétrica e pela quantidade de parâmetros. Os ajustes destes modelos LPV não foram tão bons quanto os identificados nos casos anteriores.

**Figura 11** - Evolução temporal para a entrada de identificação: (a) estado  $x_1$ ; (b) constante elástica da mola.



**Tabela 3** - Características dos modelos LPV identificados para a suspensão passiva em 4.4 e 4.5.

	Modelos			
	M9	M10	M11	M12
$n/m/r$	4/2/3	2/2/1	4/4/1	4/5/0
<b>N</b>	[5 0 3 0]	[2 2]	[0 3 1 2]	[1 0 0 0]
<b>M</b>	[3 4]	[5 2]	[4 2 1 0]	[0 0 3 1 1]
<b>x</b>	21	15	45	24
$J_2^a$	4,1019	4,7566	8,0199	9,8109
$J_\infty^a$	1,7896	1,8838	2,8412	3,3706
$J_2^s$	57,719	61,040	52,349	63,038
$J_\infty^s$	6,4872	6,2101	7,5600	8,5038
$\max \lambda $	1,0104	1,0067	1,1402	0,9294

A Figura 12 apresenta a resposta do sistema, em azul, e a do modelo validado M9, em vermelho. Entretanto, observou-se que para a estimação um passo à frente, este modelo apresenta uma melhora significativa em seus ajustes, pois suas respostas estimadas praticamente coincidem com a do sistema, em azul, nessa figura. A Tabela 3 confirma essa informação a partir dos valores de  $J_2^a$  apresentados pelos modelos M9 e M10. Na Figura 12(b), ilustra-se a evolução

temporal do máximo módulo dos autovalores. É interessante notar que em alguns intervalos de tempo, esse ultrapassa o valor unitário.

É oportuno observar que como o estado  $x_1$  é o próprio parâmetro variante,  $\theta$  será alterado com a modificação da entrada de identificação para a de validação.

#### 4.5 Modelos LPV com 2 parâmetros endógenos

Nesse caso, considerou-se que a suspensão seja submetida a altas velocidades. Assim, um comportamento mais realista para a força gerada pelo amortecedor é que apresente uma relação cúbica com a velocidade de compressão ou de expansão. O modelo matemático deixa de ter um comportamento linear, mas pode ser transformado na forma Quasi-LPV, conforme apresentado a seguir. A equação (22) poderá ser reescrita como:

$$kx_1 + c(\dot{x}_1)^3 + u = m_1\dot{x}_3. \quad (27)$$

De (20):

$$(\dot{x}_1)^3 = (x_4 - x_3)^3 = x_4^3 - 3x_4^2x_3 + 3x_4x_3^2 - x_3^3. \quad (28)$$

De (28) em (27):

$$\dot{x}_3 = \frac{k}{m_1}x_1 - \frac{c}{m_1}(3x_4^2 + x_3^2)x_3 + \frac{c}{m_1}(3x_3^2 + x_4^2)x_4 + \frac{u(t)}{m_1}. \quad (29)$$

Desenvolvendo (24) de forma análoga, chega-se a:

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 = & \frac{k}{m_2}x_1 + \frac{k_r}{m_2}x_2 + \frac{c}{m_2}(3x_4^2 + x_3^2)x_3 + \\ & - \frac{c}{m_2}(3x_3^2 + x_4^2)x_4 - \frac{u(t)}{m_2} \end{aligned} \quad (30)$$

Utilizando (20), (21), (29) e (30), chega-se ao modelo da suspensão ativa em alta velocidade:

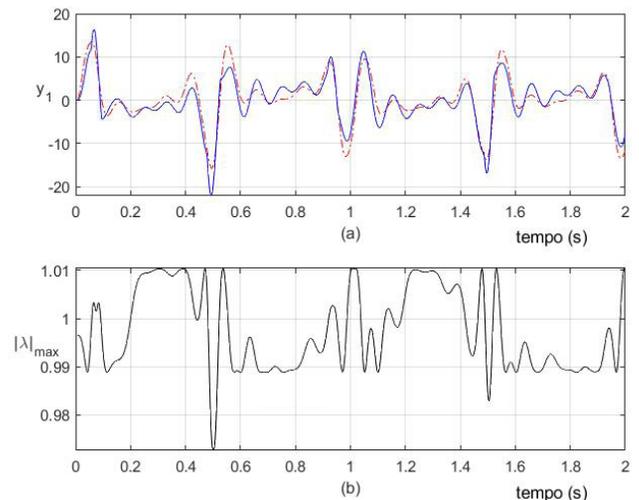
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ \frac{k}{m_1} & 0 & -\frac{c}{m_1}(3x_4^2 + x_3^2) & \frac{c}{m_1}(3x_3^2 + x_4^2) \\ -\frac{k}{m_2} & \frac{k_r}{m_2} & \frac{c}{m_2}(3x_4^2 + x_3^2) & -\frac{c}{m_2}(3x_3^2 + x_4^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ -\frac{1}{m_2} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w(t) \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k}{m_1} & 0 & -\frac{c}{m_1}(3x_4^2 + x_3^2) & \frac{c}{m_1}(3x_3^2 + x_4^2) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1} \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

Pelo modelo em (31), verifica-se que os estados  $x_3$  e  $x_4$  compõem as matrizes A e C da dinâmica, transformando-o em um modelo não linear do tipo Quasi-LPV.

**Figura 12** - (a) Saídas do sistema (azul) e do modelo M9 (verm.) com suspensão passiva; (b) Máximo módulo dos autovalores durante a validação.

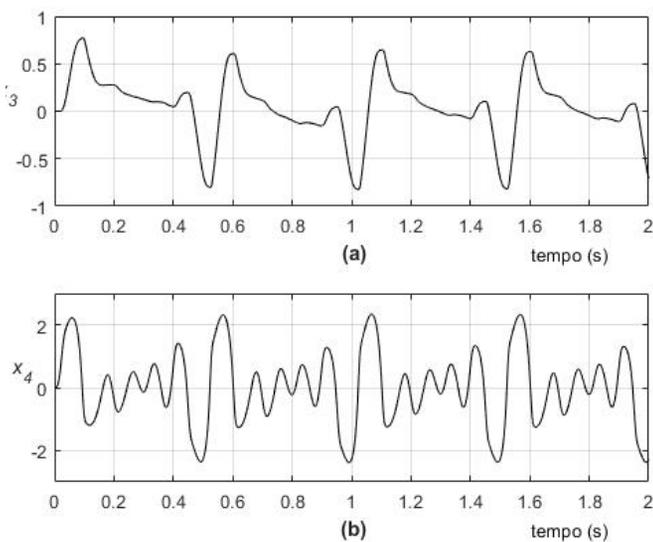


A Figura 13 apresenta a evolução temporal dos estados  $x_3$  e  $x_4$  em face da aplicação da entrada de validação. Neste caso, estes estados serão considerados os parâmetros variantes do modelo LPV.

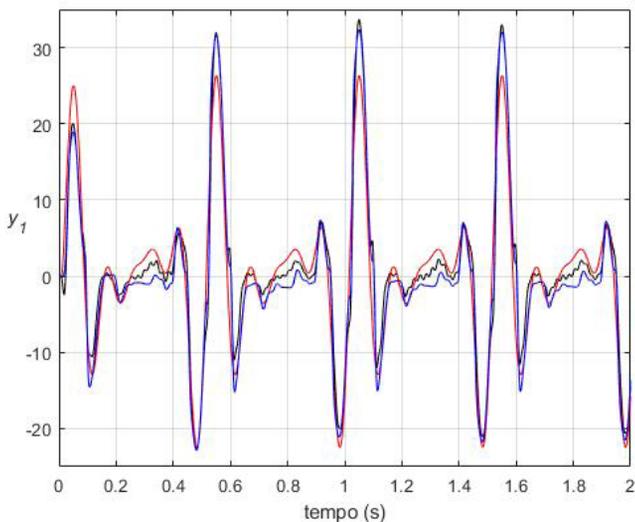
Na Tabela 3, encontram-se apresentadas as características dos modelos M11 e M12, ajustados para este problema. Embora M12 tenha um desempenho pior em relação a M11, no que se refere ao custo  $J_2^s$ , ele foi selecionado devido ao critério da parcimônia, por apresentar um número de parâmetros significativamente menor.

Mesmo que o ajuste não tenha sido perfeito, ainda assim é bem melhor que o do correspondente modelo LTI, que possui  $J_2^s = 90,21$ . Esse modelo não foi apresentado nas tabelas, mas a Figura 14 mostra, a curva de saída do sistema (azul), do modelo M11 (preto) e a saída desse modelo LTI (vermelho).

**Figura 13** - Evolução do estado com a entrada de validação: (a)  $x_3$ ; (b)  $x_4$ .



**Figura 14** - Saídas  $y_1$  da suspensão passiva para o sistema (azul), M11 (preto) e LTI (verm.).



## 5. Conclusões

Neste artigo, apresentou-se um método multivariável para a identificação de modelos LPV com coeficientes polinomiais. Entre as aplicações do método, além da identificação propriamente dita, existe a possibilidade de aproximar modelos não lineares por modelos LPV, com a finalidade de aplicação de técnicas de controle LPV. Os resultados foram explorados por meio de um exemplo relacionado com a suspensão de um automóvel. Diversos casos foram abordados, com múltiplos parâmetros variantes endógenos e exógenos, procurando aproximar inclusive sistemas não lineares do tipo Quasi-LPV. Algumas contribuições em relação às ideias de [24] foram implementadas, como a extensão do método para sistemas multivariáveis, a obtenção da solução a partir de um lote de dados, a utilização de polinômios com graus independentes por parâmetro, a possibilidade de realizar a defasagem temporal entre a saída corrente e a entrada mais recente no modelo, bem como a extensão do método para múltiplos parâmetros variantes. Embora os ajustes dos modelos LPV tenham sido significativamente melhores que os modelos LTI, em contrapartida, há também um grande aumento do número de parâmetros a serem determinados. Observou-se, ainda, que o gráfico do máximo módulo dos autovalores do modelo ao longo do tempo é uma importante ferramenta para analisar a qualidade do modelo identificado e de sua estrutura paramétrica escolhida. Vale lembrar que a estimativa um passo à frente apresentou excelentes resultados para todos os modelos apresentados, embora haja a dependência das medidas de saída do sistema em tempo real. Por fim, verificou-se, principalmente na aproximação de sistema não lineares, a forte dependência para o ajuste do modelo com a trajetória do parâmetro variante e com sua taxa de variação.

## Agradecimentos

Este artigo foi elaborado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Referências

- [1] SIMÕES, A.M. Controle linear a parâmetros variáveis de sistemas não lineares. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.
- [2] RUGH, W. J.; SHAMMA, J. S.; Survey paper research on gain scheduling. *Automatica*, v.36, n.10, p.1401-1425, 2000.
- [3] MOHAMMADPOUR, J.; SCHERER, C. W. (Ed.). *Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications*. New York: Springer, 2012.
- [4] BECKER, G.; PACKARD, A. K. Robust performance of linear parametrically va-rying systems using parametrically dependent linear feedback. *Systems & Control Letters*, v.23, n.3, p.205-215, 1994.
- [5] APKARIAN, P.; GAHINET, P.; BECKER, G.; Self-scheduled  $H^\infty$  control of linear parameter-varying systems: A design example. *Automatica*, 31, n.9, p.1251-1261, 1995.
- [6] PELLANDA, P. C. ; *Commande de Systèmes Instationnaires: Séquencement de Compensateurs et Commande LPV*. Thèse (Docteur) — L'École Nationale Supérieure de L'Aéronautique et de L'Espace, Toulouse, 2001.
- [7] WU, F.; Control of linear parameter varying systems. Thesis (PhD, University of Berkeley, Berkeley, 1995.
- [8] APKARIAN, P.; ADAMS, R. J.; Advanced gain-scheduling techniques for uncer-tain systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v.6, n.1, 1998.
- [9] APKARIAN, P.; GAHINET, P.; A convex characterization of gain-scheduled  $H^\infty$  controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v.40, n.5, p.853-864, 1995.
- [10] ZHOU, K.; DOYLE, J. C.; GLOVER, K.; *Robust and optimal control*. London: Pearson, 1996.
- [11] HOFFMANN, C.; WERNER, H.; A survey of linear parameter-varying control applications validated by experiments or high-fidelity simulations. *IEEE Transacti-ons on Control Systems Technology*, v.23, n.2, p.416-433, 2015.
- [12] LJUNG, L.; *System Identification: Theory for the User Second Edition*. London: Prentice Hall PTR, 1999.
- [13] HSU, K.; VINCENT, T. L.; POOLLA, K.; Nonparametric methods for the identification of linear parameter varying systems. In: *Proceedings of the International Symposium on Computer-Aided Control System Design*, San Antonio, p.846-851, 2008.
- [14] PIGA, D.; TÓTH, R.; LPV model order selection in an LS-SVM setting. In: *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2013.
- [15] GOLABI, A.; MESKIN, N.; TÓTH, R.; MOHAMMADPOUR, J.; A bayesian approach for estimation of linear regression LPV models. In: *IEEE Conference on Decision and Control*, 53, p.2555-2560, 2014.
- [16] DARWISH, M. A. H.; COX, P. B.; PROIMADIS, I.; PILLONETTO, G.; TÓTH, R.; Prediction-error identifica-tion of LPV systems: A nonparametric gaussian regression approach. *Automatica*, v.97, p.92-103, 2018.
- [17] SANTOS, P. L.; PERDICOÚLIS, T. P. A.; NOVARA, C.; RAMOS, J. A.; RIVERA, D. E.; *Linear parameter-varying system identification: new developments and trends*. Hackensack: World Scientific, 2012.
- [18] TÓTH, R.; *Modeling and identification of linear parameter-varying systems*. Berlin: Springer, 2010.
- [19] FUJIMORI, A.; LJUNG, L.; Model identification of linear parameter varying air-craft systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, v.220, n.4, p.337-346, 2006.
- [20] GHOSH, D.; BOMBOIS, X.; HUILLERY, J.; SCORLETTI, G.; MERCÈRE, G.; Optimal identification experi-ment design for LPV systems using the local approach, *Automatica*, v.87, p.258-266, 2018.
- [21] CERONE, V.; PIGA, D.; REGRUTO, D.; Set-membership LPV model identification of vehicle lateral dynamics. *Automatica*, v.47, n.8, p.1794-1799, 2011.
- [22] CERONE, V.; PIGA, D.; REGRUTO, D.; A convex relaxation approach to set-membership identification of LPV systems. *Automatica*, v.49, n.9, p.2853-2859, 2013.
- [23] LAURAIN, V.; GILSON, M.; TÓTH, R.; GARNIER, H.; Refined instrumental va-riable methods for identifi-cation of LPV Box-Jenkins models. *Automatica*, v.46, n.6, p.959-967, 2010.
- [24] BAMIEH, B.; GIARRÉ, L.; Identification of linear parameter varying models. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, v.12, n.9, p.841-853, 2002.
- [25] TÓTH, R.; LAURAIN, V.; ZHENG, W. X.; POOLLA, K.; Model structure learn-ing: A support vector machi-ne approach for LPV linear-regression models. In: *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. 50, p.3192-3197, 2011.
- [26] VAPNIK, V. N.; *Statistical Learning Theory*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1998.
- [27] SCHÖLKOPF, B.; SMOLA, A. J.; *Learning with kernels: support vector machi-nes, regularization, optimiza-tion, and beyond*. Cambridge, MIT Press, 2002.

	M9	M10	M11	M12
1	-2,1451	-1,8308	-2,6426	-2,8394
2	1,9944e-1	8,0398e-2	3,0743	-1,9056e-2
3	-3,2760	-4,5524	-1,9459e-1	2,1094e-3
4	-24,188	8,3022e-1	-1,2791e-2	3,4121
5	28,608	-5,1005e-2	-2,7967e-2	-2,0704
6	536,92	4,9448	-1,2417e-1	5,2334e-1
7	1,4962	8,8089e-1	-4,5444e-2	-255,01
8	-3,3536e-1	-9,3699e-1	3,4387e-3	1024,2
9	-1,2673e-1	-5,1392e-1	9,8325e-2	-1548,7
10	2,9411	70,379	-1,2912e-2	-5,6339
11	10,771	-850,63	3,6693e-2	1,1043e-1
12	-1,5032e-2	-4000,2	-1,6806	-1,0481e-1
13	8,7969e-1	-8,7297e-1	4,6561e-1	1,8862e-1
14	-5,7447e-1	6,8925e-1	2,1312e-1	2,5113e-2
15	15,912	16,264	3,3240e-1	7,4621e-3
16	144,42		-2,3406e-1	-1,0500e-1
17	-8,5403e-1		-2,3056e-2	-4,1403e-2
18	7,6552e-1		-1,0547e-1	9,2937e-2
19	-5,0067		2,7712e-2	1045,4
20	-176,37		-6,0313e-2	11,942
21	-565,46		-8,8240	-5,4097e-1
22			-3,6792	-265,75
23			3,8992	-6,4258
24			-1,4866e-1	3,4988e-1
25			-3,3907e-1	
26			-9,5981e-2	
27			7,8418e-1	
28			2,0652e-2	
29			-3,9837e-2	
30			-2,6922	
31			-1,1238e-1	
32			2,9413e-1	
33			2,7791e-1	
34			-5,6398e-1	
35			5,4148e-1	
36			26,288	
37			6,5098	
38			-3,2759	

- [28] PIGA, D.; COX, P.; TÓTH, R.; LAURAIN, V.; LPV system identification under noise corrupted scheduling and output signal observations. *Automatica*, v.53, p.329-338, 2015.
- [29] DARWISH, M. A. H.; COX, P. B.; PROIMADIS, I.; PILLONETTO, G.; TÓTH, R.; Prediction-error identification of LPV systems: A nonparametric Gaussian regression approach. *Automatica*, v.97, p.92-103, 2018.
- [30] PILLONETTO, G.; DINUZZO, F.; CHEN, T.; de Nicolao, G.; LJUNG, L.; Kernel methods in system identification, machine learning and function estimation: A survey. *Automatica*, v.50, n.3, p.657-682, 2014.
- [31] MEJARI, M.; PIGA, D.; BEMPORAD, A.; A bias-correction method for closed-loop identification of linear parameter-varying systems. *Automatica*, v.87, p.128-141, 2018.
- [32] BRESCHI, V.; FORMENTIN, S.; RALLO, G.; CORNO, M.; SAVARESI, S. M.; Vehicle sideslip estimation via kernel based LPV identification: Theory and experiments. *Automatica*, v.122, 2020.
- [33] LAURAIN, V.; TÓTH, R.; PIGA, D.; DARWISH, M. A. H.; Sparse RKHS estimation via globally convex optimization and its application in LPV-IO identification. *Automatica*, v.115, 2020.
- [34] ALEGRIA, E. J.; GIESBRECHT, M.; BOTTURA, C. P.; Causal regression for online estimation of highly non-linear parametrically varying models. *Automatica*, v.125, 2021.
- [35] BECKER, G. S.; Quadratic stability and performance of linear parameter dependent systems. Ph.D. thesis, University of California-Berkeley, Berkeley, 1993.
- [36] MARCOS, A.; BALAS, G.J.; Development of linear-parameter-varying models for aircraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. v.27, n.2, p.218-228, 2004.
- [37] AGUIRRE, L. A.; *Introdução à Identificação de Sistemas. Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Aplicação*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015.
- [38] LOFBERG, J.; Yalmip: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p.284-289, 2004.
- [39] EL-MADANY, M. M.; AL-MAJED, M. I.; Quadratic synthesis of active controls for a quarter-car model. *Journal of Vibration and Control*, v.7, n.8, p.1237-1252, 2001.
- [40] PALHARES, R. M.; GONÇALVES, E. N.; *Desigualdades matriciais lineares em controles*. In: AGUIRRE, L. A. *Enciclopédia de automática, controle e automação*, São Paulo: Editora Blucher, 2007.
- [41] KARNOPP, D. C.; MARGOLIS, D. L.; ROSEMBERG, R. C.; *System Dynamics. Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems*. John Wiley & Sons, 2012.

## Apêndice A - Coeficientes dos modelos

**Tabela A1** - Coeficientes dos modelos identificados.

	M1	M2	M3	M4
1	-3,8899	-3,8875	-1,9650	-1,9657
2	5,7064	5,6979	9,9883e-1	9,9966e-1
3	-3,7426	-3,7329	2,0657e-4	2,4858e-3
4	9,2613e-1	9,2258e-1	1,8604e-4	-2,4850e-3
5	-1,4126e-2	2,4678e-3		
6	1,2122e-1	-7,2040e-3		
7	-1,9795e-1	7,0104e-3		
8	9,0897e-2	-2,2742e-3		

	M5	M6	M7	M8
1	-3,8854	-1,9650	-3,9020	-3,8902
2	-1,6614e-6	-4,2788e-5	5,7371	1,5265e-6
3	5,6915	9,9900e-1	-3,7683	8,0307e-7
4	-3,7266	1,9014e-4	9,3315e-1	5,7055
5	9,2050e-1	2,6350e-4	1,3017e-1	-3,7401
6	4,7693e-2	-1,1792e-4	-3,1863e-1	9,2488e-1
7	-1,0689e-2		2,4856e-1	3,7301e-2
8	2,3814e-3		-6,0094e-2	1,1522e-2
9	-4,4441e-2			1,1000e-2
10	-5,1441e-2			-3,8458e-2
11	3,1428e-2			-1,0157e-2
12	-7,0396e-3			-4,3035e-5
13	4,8188e-2			-3,5744e-2
14	-2,0730e-2			-4,7985e-6
15	4,6544e-3			-5,4108e-7
16				-3,3115e-2
17				-1,3655e-2
18				3,8937e-2
19				3,4275e-2
20				1,2319e-2
21				-1,4199e-2

	M9	M10	M11	M12
39			1,4140e-1	
40			-6,5476e-1	
41			1,9229	
42			-27,293	
43			-2,5943	
44			-1,2012e-1	
45			10,132	

Os coeficientes dos modelos apresentados na Tabela A1, encontram-se dispostos conforme a ordem em (7), isto é,  $a_1, a_2, a_3, \dots, b_1, b_2, b_3, \dots$ . Como cada coeficiente possui diversos parâmetros, estes encontram-se na sequência apresentada no item 3.2.

# Produção e caracterização de grânulos de biomateriais HA, HA/SiO<sub>2</sub> e KNN

Pedro de Farias Vanzan<sup>1</sup>, Suzana Noronha Ferreira Ribeiro<sup>1</sup>, Amal Elzubair<sup>1</sup>, Marcelo Henrique Prado da Silva<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80 – Urca, Rio de Janeiro (RJ), Brasil

\*marceloprado@ime.eb.br

**RESUMO:** O reparo e a substituição de tecido lesado ou perdido é um problema de extrema importância para a medicina contemporânea. A hidroxiapatita, Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>, (HA), é a biocerâmica mais similar à fase inorgânica do tecido ósseo, além de ser bioativa. Hidroxiapatitas com substituições iônicas parciais e outras biocerâmicas bioativas são adotadas como enxertos ósseos sintéticos. Estes podem ser produzidos em diferentes formas, tais como microesferas, arcabouços porosos ou grânulos. Neste trabalho, HA parcialmente substituída com sílica biogênica e niobato de sódio e potássio (KNN) foram sintetizados e processados sob a forma de grânulos. Os materiais foram calcinados, prensados e sinterizados, posteriormente sendo moídos e peneirados. As amostras foram caracterizadas por difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS). Os resultados mostraram a presença de poros micrométricos e nanométricos nas amostras de HA, com maior porosidade naquelas com maior porcentagem da sílica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidroxiapatita. Piezoelectricidade. Biomateriais. Grânulos.

**ABSTRACT:** Repair and replacement of damaged or lost tissue is a problem of utmost importance for contemporary medicine. Hydroxyapatite, Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>, (HA), is the bioceramic most similar to the inorganic phase of bone tissue, besides being bioactive. Hydroxyapatites with partial ionic substitutions and other bioactive bioceramics are adopted as synthetic bone grafts. These grafts can be produced in different forms, such as microspheres, porous scaffolds, or granules. In this work, HA partially replaced with biogenic silica and sodium-potassium niobates (KNN) were synthesized and processed in the form of granules. The materials were calcined, pressed, sintered, later being ground and sieved. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersion spectroscopy (EDS). The results showed the presence of micrometric and nanometric pores in the HA samples, with higher porosity in the samples with higher percentage of silica.

**KEYWORDS:** Hydroxyapatite. Piezoelectricity. Biomaterials. Granules.

## 1. Introdução

Os biomateriais são materiais biocompatíveis, naturais ou sintéticos, e podem pertencer a qualquer uma das classes de metais, cerâmicas, polímeros ou compósitos. Eles devem ser capazes de substituir parcial ou completamente órgãos ou funções do corpo humano. Os biomateriais metálicos são utilizados em aplicações estruturais, onde a resistência à tração, compressão, flexão e torção são requeridas. Como exemplo, os implantes ortopédicos e odontológicos são projetados de forma que os metais ou ligas metálicas cumpram a função de acordo com a aplicação e o sítio hospedeiro [1]. Uma aplicação de biomaterial metálico não estrutural envolve os “stents” com efeito memória de forma, que são estruturas metálicas flexíveis inseridas no corpo humano após serem deformadas plasticamente, e então, quando atingem a temperatura corpórea, retomam a sua forma original [2].

As cerâmicas biocompatíveis, ou biocerâmicas, são utilizadas em aplicações diversas. Os tipos inertes, ou bioinertes, são utilizados quando a inércia química é um requisito fundamental. De modo geral, são muito duras e resistentes à abrasão. A alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e a zircônica, ZrO<sub>2</sub>, são exemplos de biocerâmicas bioinertes, utilizadas em próteses de cabeça de fêmur, onde a inércia química, bem como a resistência à abrasão e à dureza são requisitos relevantes [3]. As biocerâmicas bioativas, por outro lado, têm a capacidade de se ligar quimicamente ao osso. Por esse motivo, são utilizadas como recobrimentos bioativos sobre implantes metálicos, fornecendo a interface de ligação química entre o tecido ósseo e o implante metálico, que cumpre a função estrutural que a biocerâmica não cumpriria [4].

Os biovidros, ou vidros biocompatíveis, são frequentemente elencados no grupo das biocerâmicas, uma vez que são formados por átomos de elementos

metálicos e não metálicos. Além disso, ao sofrerem tratamentos térmicos, podem se tornar parcialmente cerâmicos, ou vitrocerâmicos, e, ainda, se cristalizar totalmente, dando origem a biocerâmicas. Os biovidros bioativos também podem ser utilizados como recobrimentos de implantes metálicos.

Entre as biocerâmicas bioativas, as pesquisas em materiais à base de fosfatos de cálcio vêm se destacando, por apresentarem resultados promissores no reparo de defeitos ósseos. As biocerâmicas bioativas encontram aplicações em tratamentos traumatológicos para regeneração, cicatrização e reconstituição óssea. A sua biocompatibilidade é um resultado direto da composição química. A hidroxiapatita,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , é a biocerâmica mais utilizada como enxerto ósseo sintético, pois é bioativa, ou seja, capaz de se ligar quimicamente ao osso. Adicionalmente, substituições iônicas alteram sua taxa de bioreabsorção em meio biológico. A síntese de hidroxiapatitas com substituições é um assunto muito estudado, uma vez que o osso humano é um material compósito à base de colágeno e nanopartículas de hidroxiapatita, com substituições de íons como  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$  [5].

Biovidros adicionados à hidroxiapatita durante o processo de sinterização dão origem às hidroxiapatitas reforçadas com vidro. Se esses biovidros forem silicáticos, o silício ou o grupo silicato podem entrar na estrutura da hidroxiapatita [6,7]. O dióxido de silício ou sílica ( $\text{SiO}_2$ ), na sua forma amorfa, vem sendo utilizado em aplicações médicas e odontológicas, pois a presença da sílica na composição de um biomaterial contribui com a bioatividade [8]. Isso está diretamente relacionado à facilidade de o material formar pontes de na presença da sílica em meios biológicos [8].

Outras questões relacionadas à sinterização de hidroxiapatitas reforçadas com vidros envolvem a presença de fase líquida, a possibilidade de substituições iônicas durante o processo e a decomposição da hidroxiapatita em fases mais solúveis *in vitro* e *in vivo*.

A sinterização em presença de fase líquida é um pressuposto da produção de compósitos de hidroxiapatitas reforçadas com biovidro. O reforço é proveniente da maior densificação alcançada pela adição do pó de biovidro. Ao fundirem-se, o biovidro molha as partículas de hidroxiapatita e as forças de capilaridade promovem a

densificação. Além disso, há um incremento nos mecanismos difusionais, uma vez que a difusão no estado líquido é muito mais efetiva do que a no estado sólido. Uma vez que a densificação ocorre por mecanismos difusionais que aproximam os centros de massa das partículas de pó cerâmico, amostras de GR-HA tendem a ser mais densas do que as de HA prensadas e sinterizadas nas mesmas condições.

Aditivos de sinterização podem reagir com o pó cerâmico majoritário de várias formas: dando origem a uma nova fase, promovendo substituições iônicas parciais na fase majoritária, ou até mesmo se mantendo como uma segunda fase não solúvel na fase majoritária [9]. Uma vez que a estrutura da hidroxiapatita admite substituições de grupos aniônicos e catiônicos, a utilização de biovidros como aditivos de sinterização (reforço) ao pó de hidroxiapatita é uma estratégia para a síntese de hidroxiapatitas parcialmente substituídas [10]. Dependendo da composição do biovidro, grupos catiônicos e/ou aniônicos podem promover substituições parciais ou totais na estrutura da HA [10].

Propriedades da hidroxiapatita, como bioatividade, estabilidade térmica e taxa de biorreabsorção *in vivo* e *in vitro* são diretamente relacionadas à cristalinidade e a substituições catiônicas e aniônicas na rede cristalina da HA [10]. Substituições catiônicas e aniônicas alteram a cristalinidade da HA em função da criação de defeitos na rede. As substituições com íons  $\text{F}^-$  e  $(\text{CO}_3)^{2-}$  têm efeitos opostos na cristalinidade: enquanto a substituição de grupos  $(\text{OH})^-$  por ânions  $\text{F}^-$  aumenta a cristalinidade, substituições dos mesmos grupos  $(\text{OH})^-$  por grupos aniônicos  $(\text{CO}_3)^{2-}$  diminuem a cristalinidade da HA – este efeito é observado também quando grupos  $(\text{CO}_3)^{2-}$  substituem grupos  $(\text{PO}_4)^{3-}$  [10]. Isso explica porque as fluorapatitas são mais cristalinas do que as carbonato apatitas.

Entre os elementos químicos com relevância biológica, o silício se destaca por favorecer a biomineralização, tendo importante papel no metabolismo ósseo [8, 11]. O silício é, portanto, um dos elementos estudados em substituição parcial na estrutura da hidroxiapatita e biovidros. Na hidroxiapatita, os grupos silicato,  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ , substituem parcialmente os grupos fosfato,  $(\text{PO}_4)^{3-}$ . Muitos autores estabelecem o limite de 5 %p/p Si (aproximadamente. 1.7 mol de Si/1 mol de HA). As

adições de silício introduzem defeitos na estrutura da HA, induzindo à decomposição em fases como fosfato tricálcico,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , após sinterização [11].

A cristalinidade da hidroxiapatita é afetada pelas substituições iônicas e atinge diversas propriedades, entre elas a bioatividade. Quanto mais cristalina, menos bioativa e menor será a taxa de reabsorção *in vivo* e *in vitro*. Por esse motivo, as fluorapatitas são menos bioativas e apresentam baixas taxas de biorreabsorção *in vivo* e *in vitro* [12]. A estabilidade térmica também é dependente da cristalinidade: quanto mais cristalina, mais estável termicamente a HA será. Portanto, a sinterização de hidroxiapatitas com diferentes graus de cristalinidade, à mesma temperatura, pode dar origem a diferentes fases. Hidroxiapatitas altamente cristalinas são também altamente estáveis termicamente, aumentando a temperatura de decomposição térmica da HA. Por outro lado, substituições que causem redução de cristalinidade reduzem a temperatura de decomposição térmica da HA. Como exemplo, a sinterização de fluorapatita e carbonato apatita, à mesma temperatura, pode gerar fluorapatita altamente cristalina como única fase, na amostra de fluorapatita sinterizada, e hidroxiapatita e fosfato tricálcico, na amostra de carbonato apatita sinterizada [13]. Esses efeitos mostram que os compósitos GR-HA podem ser mais ou menos bioativos do que a HA pura; mais ou menos biorreabsorvíveis *in vivo* e *in vitro* do que a HA pura; constituídos por diferentes fases, como HA, HA parcialmente substituída, fosfato tricálcico ortorrômbico ( $\alpha$ -TCP) ou fosfato tricálcico romboédrico ( $\beta$ -TCP), entre outras [14]. Comparando a hidroxiapatita com fosfatos tricálcicos, a ordem de biorreabsorção *in vivo* e *in vitro* é:  $\alpha$ -TCP >  $\beta$ -TCP > HA.

Cerâmicas à base de fosfatos de cálcio bifásicos, contendo HA +  $\beta$ -TCP, ou trifásicos, contendo HA +  $\alpha$ -TCP +  $\beta$ -TCP, são uma estratégia para o desenvolvimento de enxertos ósseos aloplásticos (sintéticos). Os enxertos ósseos podem ser autógenos, quando provêm do próprio paciente; alógenos, quando vêm de doadores da mesma espécie; xenógenos, quando têm origem em animais de outra espécie; e aloplásticos ou sintéticos [15]. Os enxertos aloplásticos apresentam a vantagem, sobre os alógenos e xenógenos, de não serem vetores transmissores de patógenos. Os enxertos autógenos são considerados o padrão ouro para reparo ósseo, pois

carregam fatores de crescimento do próprio doador. Esses enxertos são osteoindutores, capazes de induzir a diferenciação de células indiferenciadas em osteoblastos. Entretanto, lesões extensas necessitariam a criação de um defeito extenso no doador, o que representa uma morbidade [16]. As biocerâmicas mais utilizadas como enxertos aloplásticos são a HA, fosfato de cálcio bifásico (HA + TCP) e os biovidros.

**Fig. 1** - Regeneração óssea com ajuda de enxerto contendo HA. Fonte [17].



(a) (b) (c)

A Figura 1 ilustra a utilização de um enxerto aloplástico no reparo de um defeito ósseo. Dessa forma, apresenta, em (a), um defeito ósseo; em (b), pode-se observar o defeito logo após o preenchimento com grânulos de HA; e, em (c), observa-se a imagem radiográfica do defeito logo após a cirurgia, bem como 3 anos depois. [17]. A última geração de enxertos aloplásticos abrange grânulos e arcabouços porosos de biocerâmicas bioativas, biorreabsorvíveis e, preferencialmente, osteoindutoras. Estudos recentes apresentam biocerâmicas piezoelétricas como uma nova alternativa aos fosfatos de cálcio e biovidros [18]. Estudos *in vivo* indicam que a estimulação elétrica de corrente contínua aplicada a um local de implante melhora a osseointegração do implante em estágio inicial e a resistência interfacial, além disso, aumenta a formação de tecido ósseo. Materiais piezoelétricos podem ser usados para mimetizar a capacidade do osso de gerar potenciais elétricos, sob ação de uma carga mecânica, sem a necessidade de uma fonte de energia externa

[18]. As biocerâmicas bioativas e piezoelétricas, como os niobatos de sódio – que são potássio –, unem bioatividade e piezoeletricidade, uma combinação única de propriedades que mostra o potencial do KNN como candidato para enxerto aloplástico [18].

Neste trabalho, grânulos de hidroxiapatita pura, (HA0), hidroxiapatita com sílica biogênica, (HA5) e (HA10), e KNN foram produzidos e caracterizados.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram: pós de HA; sílica,  $\text{SiO}_2$ ; pós de KNN calcinados a diferentes temperaturas; e esferas de cera de polietileno (Licowax PE 830 da Clariant). A sílica utilizada no trabalho é proveniente da esponja de água doce da espécie *Metaniareticulata*, coletada na região amazônica. Os pós da HA foram misturados com 5% a 10% do peso de sílica.

O método de obtenção da hidroxiapatita baseou-se na precipitação em meio aquoso de uma solução precursora contendo cátions,  $\text{Ca}^{2+}$ , e ânions,  $(\text{PO}_4)^{3-}$ , com controle de pH em temperatura ambiente. A rota de síntese é descrita por [19]. Esse método envolve reações aquosas entre os precursores do fosfato e do cálcio, com controle de e temperatura da solução. Primeiramente, foi preparada uma suspensão de hidróxido de cálcio 0,5M, , sob agitação magnética; em seguida, uma solução 1M, (ácido láctico), também sob agitação magnética, e adicionada à primeira suspensão. Uma solução de 0,3M, (ácido fosfórico), foi preparada, sob agitação magnética, e adicionada à mistura lentamente, a uma taxa de . A solução final foi denominada solução precursora. Após 24 horas em agitação, adicionou-se uma solução de hidróxido de sódio, , para ajuste do da solução ao valor de 12, permitindo a precipitação da hidroxiapatita. O precipitado resultante foi envelhecido por 24 horas, sem agitação, e filtrado em papel filtro, com sistema de vácuo e ressuspensão dos precipitados filtrados em água deionizada em abundância, para a retirada do NaOH remanescente. Nessa etapa, foi alcançado o 7. O precipitado foi retirado do filtro e seco em estufa a 60°C durante 24 horas.

Para incorporação da sílica na hidroxiapatita, foi utilizada uma rota que se baseia na produção de um

compósito contendo hidroxiapatita obtida pelo método de precipitação em meio aquoso e sílica proveniente da esponja de água doce calcinada. Foram utilizadas cinco diferentes porcentagens para a produção de uma barbotina à base de hidroxiapatita, sílica biogênica, água e polietilenoglicol (PEG). Após a obtenção do compósito em forma de pasta, com as cinco composições diferentes, realizou-se a impregnação dessa pasta em esponjas poliméricas, que funcionam como arcabouço poroso para a impregnação da pasta cerâmica. As esponjas poliméricas foram imersas na pasta por 12 horas, após esse processo foram retiradas e encaminhadas para tratamento térmico, com taxa de aquecimento de 0,5°C/min até 550°C, com permanência em patamar de 550°C durante 2 horas para a eliminação do PEG e outros aditivos orgânicos, quando há.

A síntese do KNN foi realizada pelo método sol gel. A princípio, segundo o método proposto por Jigong et al. [8], a síntese pelo método sol gel foi escolhida pela simplicidade e pelo nível de homogeneidade que o material final apresenta. Foram usados como matéria-prima: carbonato de potássio, ; carbonato de sódio, ; óxido de nióbio (V), e ácido cítrico, . Os carbonatos pesados foram dissolvidos em água deionizada e agitados por 20 minutos. O ácido cítrico foi dissolvido em água deionizada em um béquer e, então, adicionado à solução de carbonatos. Uma pequena quantidade de uma solução de amônia foi gotejada para ajustar o e formar o sol. Óxido de nióbio (V) foi adicionado ao sol e a mistura foi moída utilizando bolas de alumina por 8 horas. A pasta (Figura 3) foi seca a 120°C para formar o xerogel. O xerogel resultante foi calcinado nas diferentes temperaturas de 650°C, 700°C e 750°C por 2 horas para obter os pós.

Os pós foram misturados individualmente com esferas de cera de polietileno, em uma proporção volumétrica de 65% (v/v) e 35% (v/v) de pó. A etapa seguinte foi a prensagem dos pós, sendo aplicada pressão de 50MPa por 1 minuto. Os corpos verdes das amostras foram sinterizados, com rampa de aquecimento até 550°C, para eliminação das esferinhas de PE, com taxa de aquecimento de 0.5°C/min, permanência de 2 horas em 550°C. A sinterização ocorreu a uma taxa de 3°C/min até a temperatura de sinterização de 1100°C

com permanência de 1 hora em 1100°C. As pastilhas sinterizadas foram moídas e, posteriormente, peneiradas com tamanhos de grânulos entre 0.18mm e 0.71mm. Finalmente, a estrutura dos grânulos produzidos foi caracterizada por DRX em um difratômetro X'PERT PRO MRD, PANalytical, operando com fonte de cobalto-CoK $\alpha$  ( $\lambda=1,789 \text{ \AA}$ ), corrente de 30 mA e voltagem de 40 kV, varredura de 10 a 80° 2 $\theta$  e um passo de 0,02 segundos. As análises qualitativas de fases das amostras foram realizadas com o *software* HighScore Plus. A morfologia e a composição química dos grânulos foram avaliadas utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura, com fonte de emissão de campo (MEV-FEG), modelo QUANTA 250 FEG da fabricante FEI, acoplado com espectrômetro de dispersão de energia (EDS), modelo Bruker 6-60.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

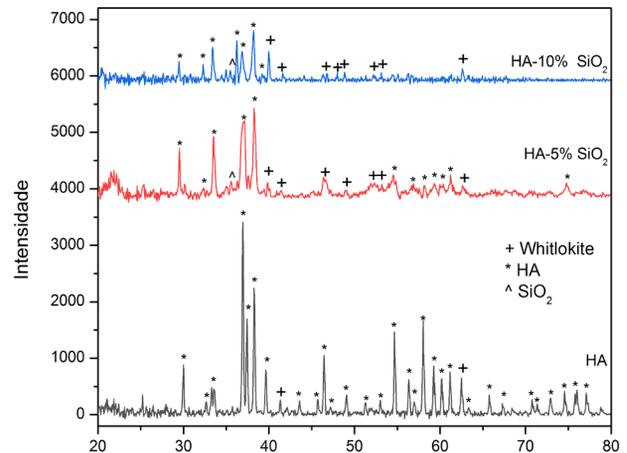
#### 3.1 Análise em DRX

Os resultados das análises por DRX nas amostras de HA e HA parcialmente substituídas com SiO $_2$ , após sinterização a 1100°C, são apresentados na Figura 2. Observou-se que as amostras sem adição de sílica biogênica apresentaram uma única fase: hidroxiapatita (HA). As amostras que receberam 5%p/p e 10%p/p de SiO $_2$  tiveram presença de whitlockita, Ca $_3$ (PO $_4$ ) $_2$ , e sílica, SiO $_2$ . Esses resultados comprovam o efeito da adição de sílica biogênica na estabilidade térmica da HA, uma vez que as amostras que receberam adição dessa substância exibiram transformação de fase após sinterização a 1100°C, enquanto as amostras de HA pura exibiram uma única fase, hidroxiapatita, após o tratamento térmico na mesma temperatura. Esse resultado corrobora os estudos que apontam o efeito da adição de sílica à HA.

Observou-se, ainda, que a fase HA mostrou picos menos intensos e mais largos nas amostras que receberam adição de sílica biogênica. Este resultado corrobora o efeito de substituições iônicas com grupos (SiO $_4$ ) $^{4-}$  na cristalinidade da HA [11]. Esses autores reportam a criação de defeitos na estrutura da HA, em decorrência de substituições de grupos (PO $_4$ ) $^{3-}$  por grupos (SiO $_4$ ) $^{4-}$ . De fato, [21] reportaram a criação de vacâncias de grupos (OH) $^-$  devido à necessidade do

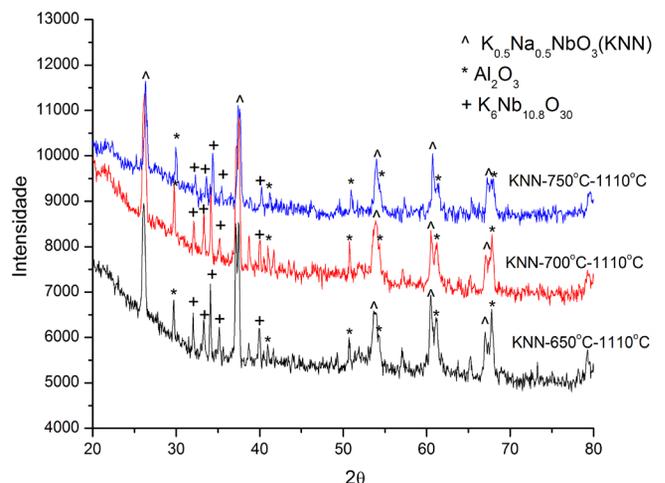
reequilíbrio de cargas, já que há diferença entre as cargas dos grupos (PO $_4$ ) $^{3-}$  e grupos (SiO $_4$ ) $^{4-}$ . A divergência entre os raios iônicos das espécies envolvidas também contribui para a geração e tensões na rede da HA e, conseqüentemente, redução da cristalinidade observada em amostras com substituições iônicas.

**Fig. 2** - Difratoograma de raios X das amostras de HA com e sem adição de sílica biogênica.



Os resultados das análises por DRX nas amostras de KNN são apresentados nas Figuras de 3 a 5. Foram identificadas três fases: K $_{0,5}$ Na $_{0,5}$ NbO $_3$ , K $_6$ Nb $_{10,8}$ O $_{30}$  (KNN) e Al $_2$ O $_3$ , sendo o KNN a fase majoritária. Observaram-se alguns picos correspondentes à presença de alumina, Al $_2$ O $_3$ . Esse resultado provavelmente está associado ao processo de moagem durante a síntese.

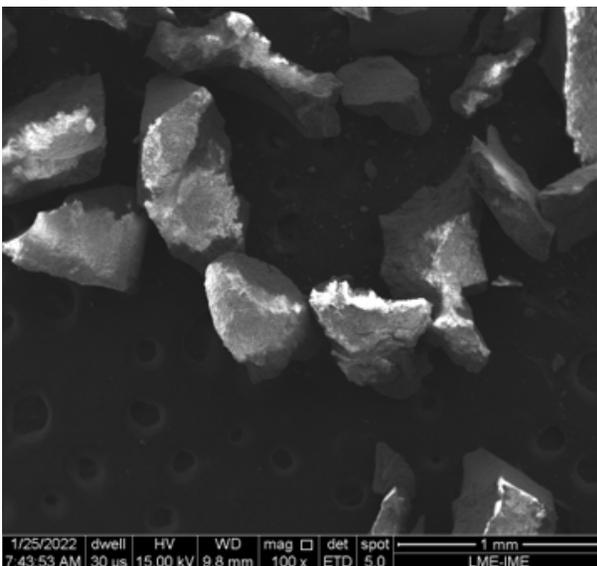
**Fig. 3** - Difratoogramas de raios X das amostras de KNN.



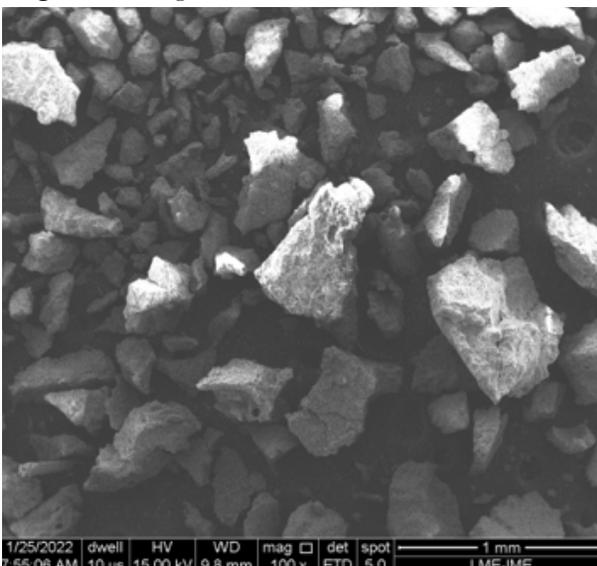
### 3.2 Análise em MEV

Os resultados das análises das amostras de HA por microscopia eletrônica de varredura com fonte de emissão de campo (MEV-FEG) são apresentados nas Figuras de 4 a 9. Essas figuras mostram que o tamanho dos grânulos se situou na faixa prevista pelo peneiramento. Um aumento na porosidade, à medida que se aumenta a porcentagem da sílica, pode ser visto nas Figuras de 7 a 9.

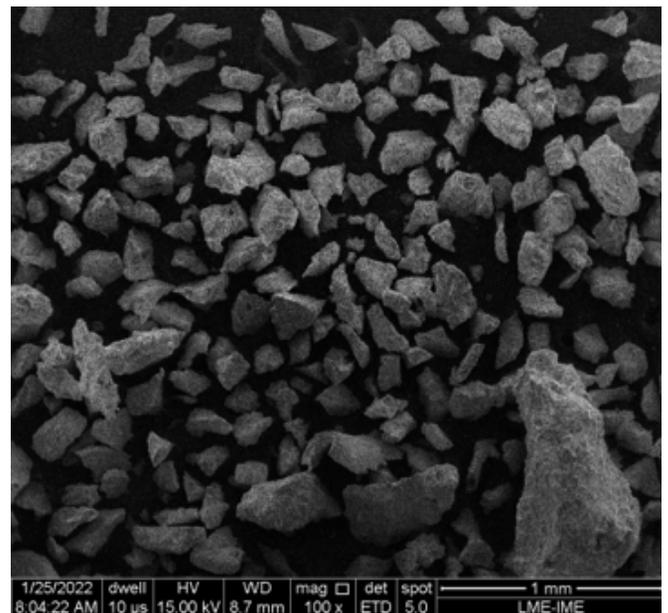
**Fig. 4** - Micrografia (MEV) da amostra HA0 - 100X.



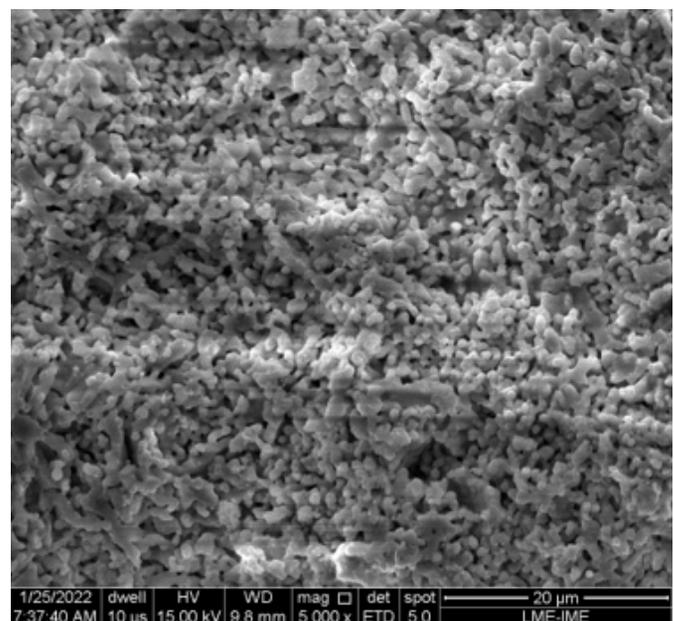
**Fig. 5** - Micrografia (MEV) da amostra HA5 - 100X.



**Fig. 6** - Micrografia (MEV) da amostra HA10 - 100X.

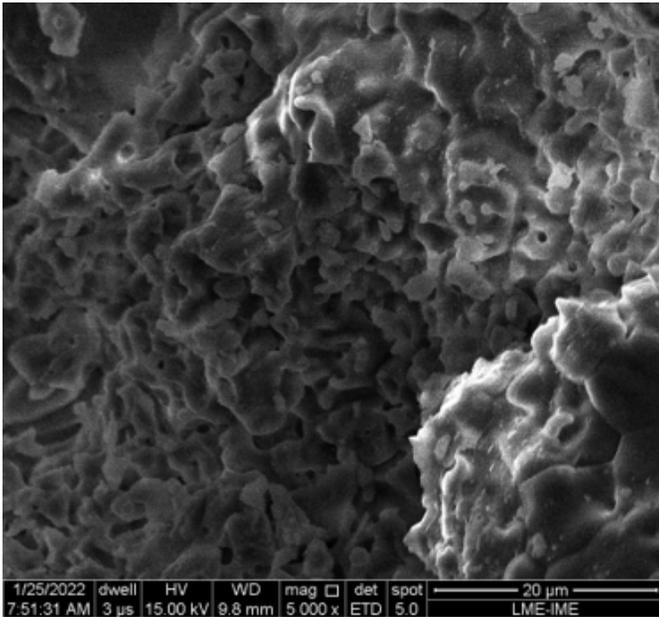


**Fig. 7** - Micrografia (MEV) da amostra HA0- 5000X.

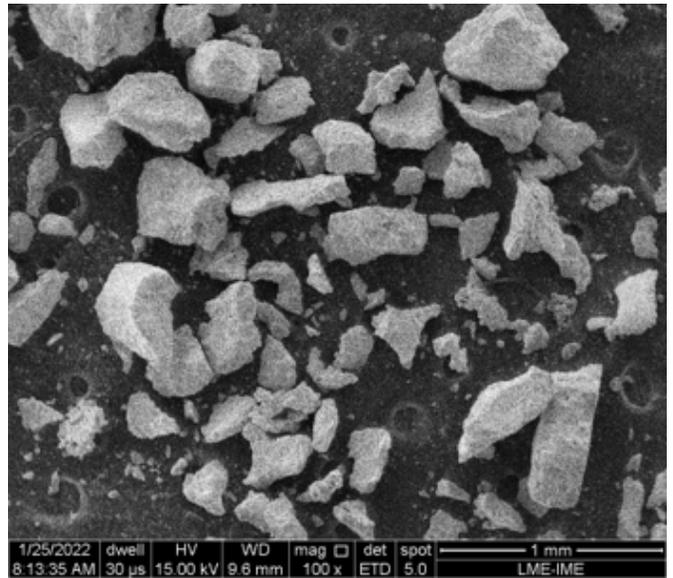


Os resultados das análises em MEV das amostras de KNN são apresentados nas Figuras de 10 a 15. As figuras de 10 a 12 também confirmaram a faixa de tamanhos de partículas, de acordo com o processo de peneiramento. As figuras de 12 a 15 revelaram alterações nas morfologias dos grânulos, com aumento da temperatura de calcinação.

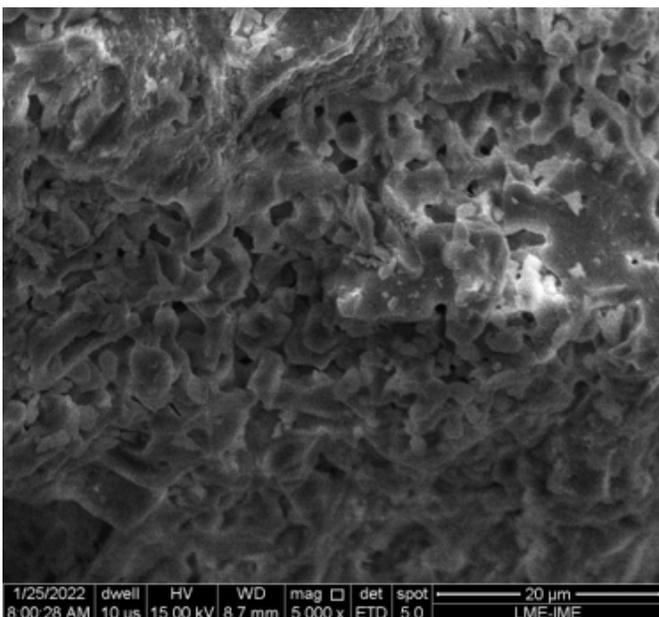
**Fig. 8** - Micrografia (MEV) da amostra HA5 - 5000X.



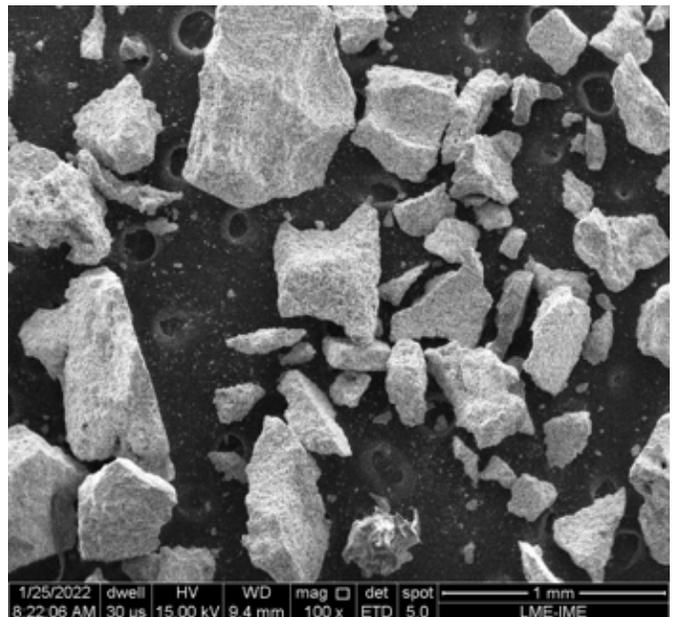
**Fig. 10** - Micrografia (MEV) da amostra KNN650 - 100X.



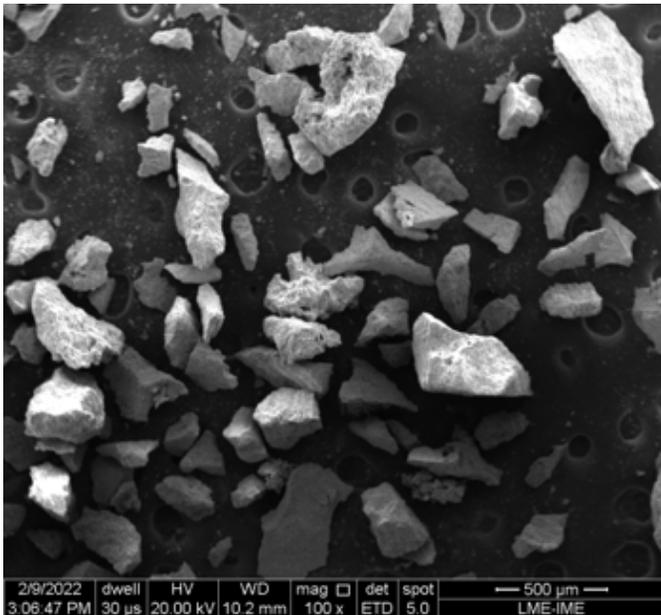
**Fig. 9** - Micrografia (MEV) da amostra HA10 - 5000X.



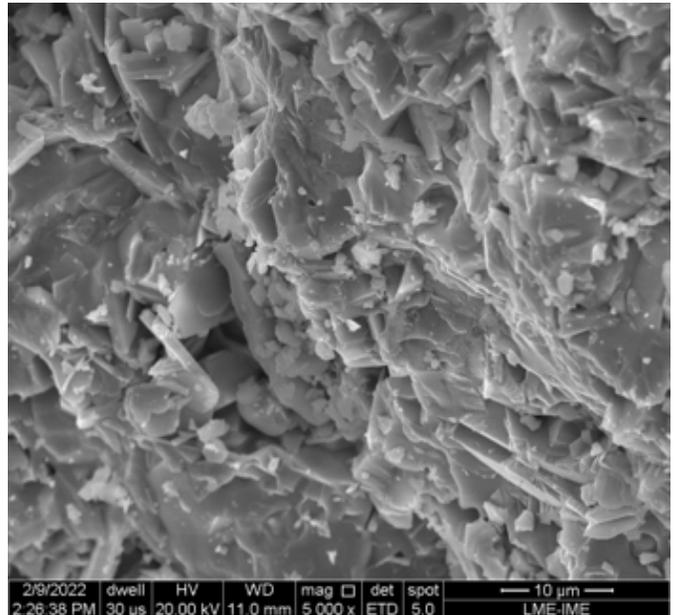
**Fig. 11** - Micrografia (MEV) da amostra KNN700 - 100X.



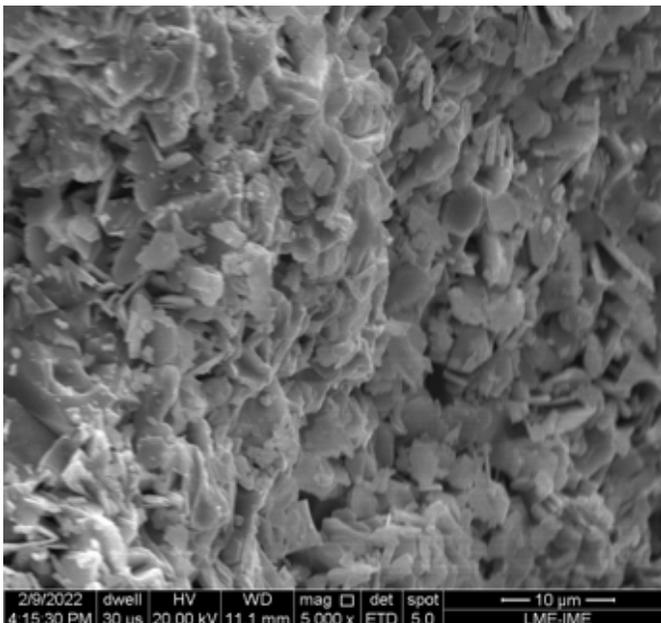
**Fig. 12** - Micrografia (MEV) da amostra KNN750 - 100X.



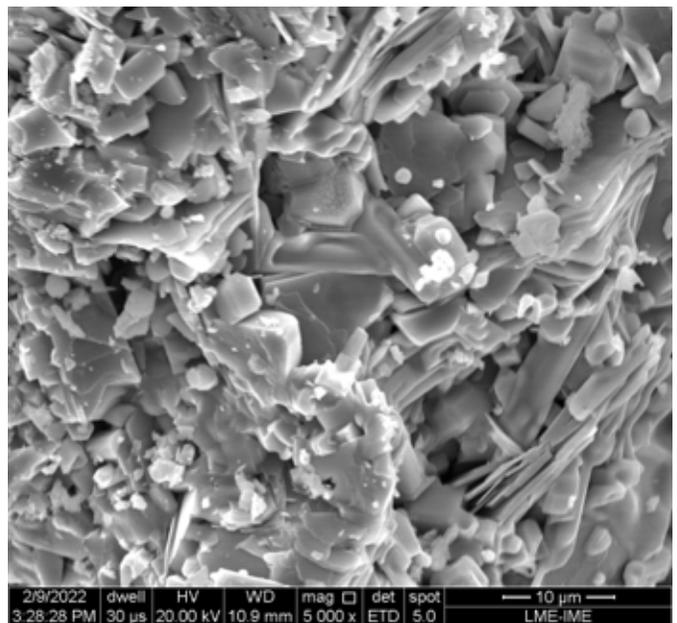
**Fig. 14** - Micrografia (MEV) da amostra KNN700 - 5000X.



**Fig. 13** - Micrografia (MEV) da amostra KNN650 - 5000X.



**Fig. 15** - Micrografia (MEV) da amostra KNN750 - 5000X.

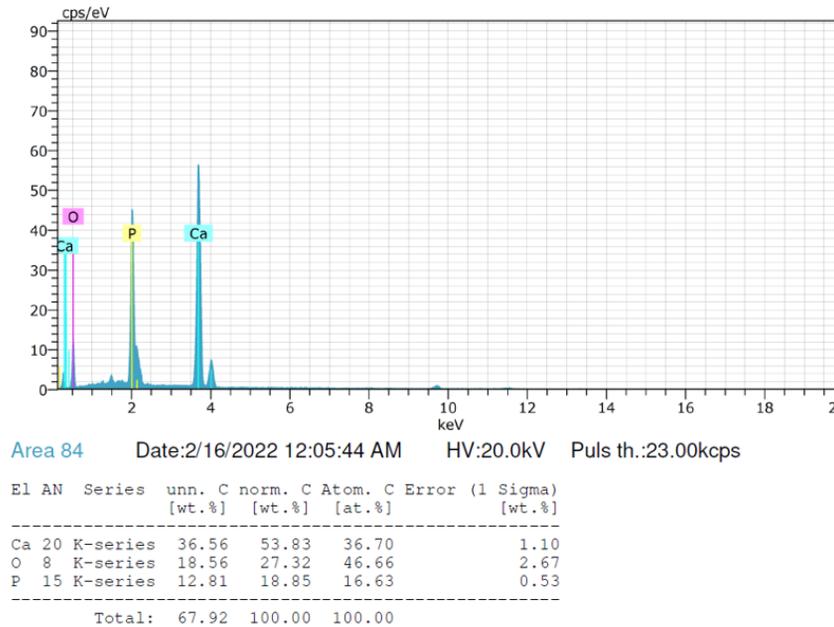


### 3.2 Análise em EDS

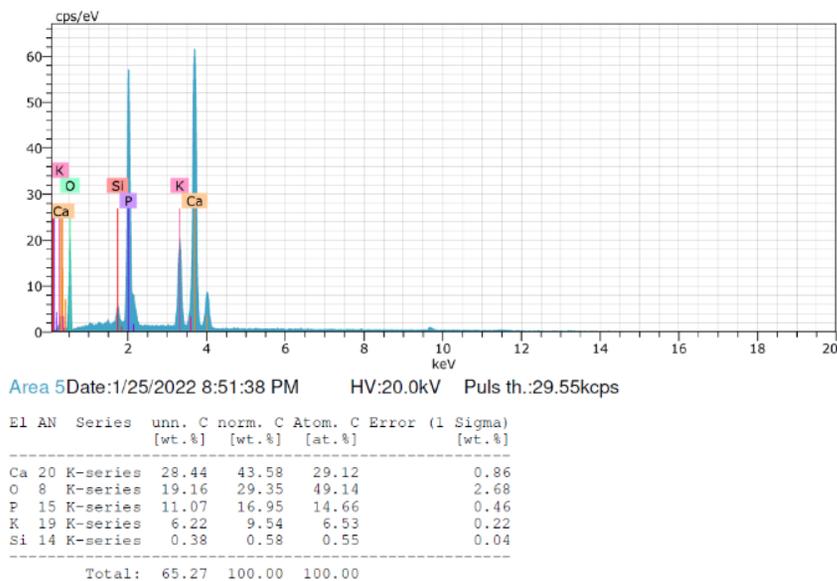
As análises por espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS), nas amostras de HA, confirmaram a presença dos elementos Ca, P e O, como mostrado no espectro apresentado na Figura 16. Nesta

mesma figura, uma tabela com as frações atômicas e em peso também é apresentada. Entretanto, cumpre salientar que a EDS é uma técnica de análise química semiquantitativa. Apesar dessa limitação, os resultados das análises por EDS corroboraram os resultados obtidos pelas análises em DRX nas amostras de HA.

**Fig. 16** - Espectro de EDS da amostra HA0.



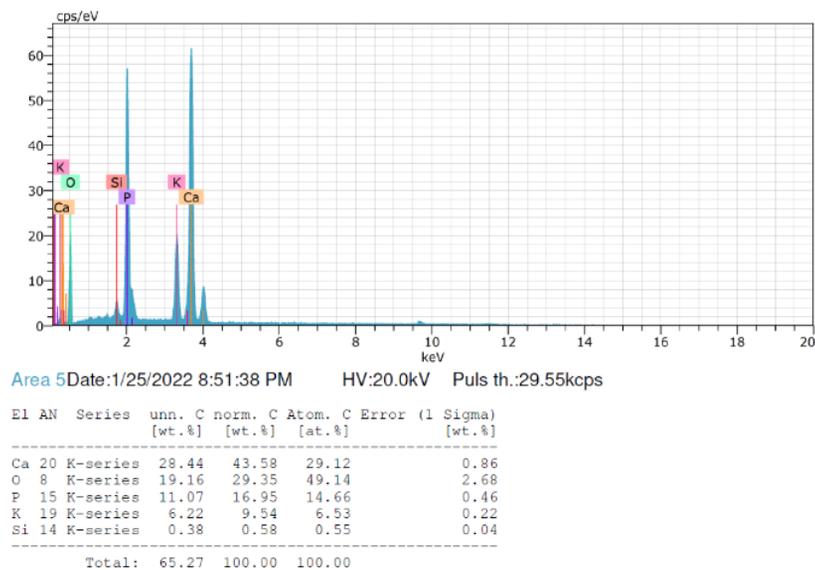
**Fig. 17** - Espectros de EDS da amostra HA5.



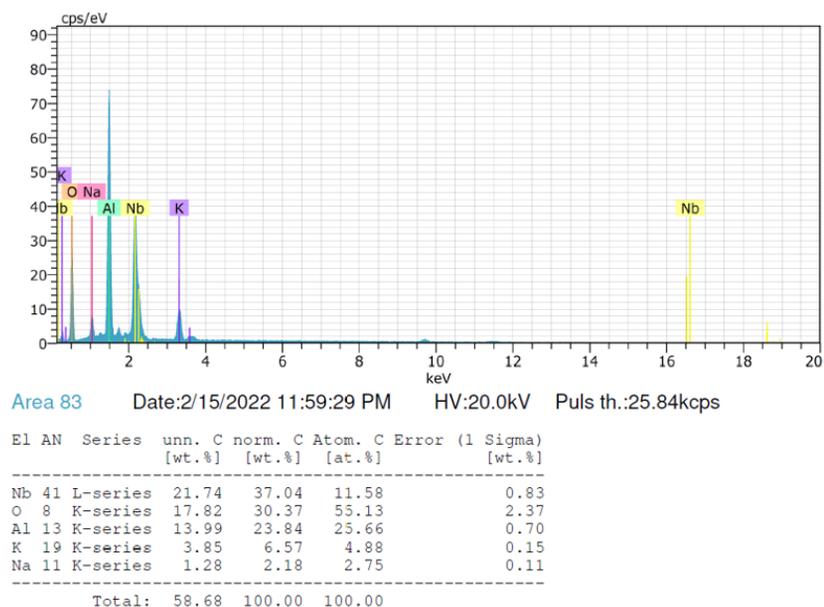
Os resultados das análises por EDS nas amostras de HA com adição de sílica biogênica revelaram a presença dos elementos Ca, P, O e Si, como mostrado nas Figuras 17 e 18. Esse resultado corrobora os resultados obtidos nas análises por difratometria de raios X das amostras de HA que receberam adição de sílica biogênica, uma vez que todas as amostras apresentaram a fase SiO<sub>2</sub>.

Os resultados das análises por EDS nas amostras de KNN revelaram a presença dos elementos K, Na, Nb, O e Al, como mostrado na Figura 18. Esse resultado corrobora o resultado obtido na análise por difratometria de raios X, que revelou a presença da fase Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. De fato, observaram-se a presença dos elementos Al e O nos espectros de EDS das amostras de KNN.

**Fig. 18** - Espectro de EDS da amostra HA10.



**Fig. 19** - Espectro de EDS da amostra KNN650.



## 4. conclusões

Ao comparar os grânulos de HA entre si, observou-se um aumento na porosidade, bem como da quantidade da sílica. Essa característica é uma vantagem para a aplicação como enxerto, uma vez que o aumento de área específica decorrente do aumento de porosidade contribui para a bioatividade do composto, além de permitir a permeação de fluidos corpóreos. As análises feitas para os grânulos de KNN indicaram que não houve transformações de fases nas temperaturas de calcinação. Após sinterização a 1100°C, as três amostras apresentaram as três fases:  $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$ ,  $K_6Nb_{10.8}O_{30}$

(KNN) e  $Al_2O_3$ , sendo a alumina proveniente do processo de moagem. A presença de poros (baixa densidade) e a contaminação com alumina podem comprometer a sua piezoelectricidade, indicando que a rota de processamento deve ser ajustada.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## Referências

- [1] GORIAINOV, V.; COOK, R.; LATHAM, J. M.; DUNLOP, D. G.; OREFFO, R. O. C. Bone and metal: An orthopaedic perspective on osseointegration of metals. *Acta Biomaterialia*, v. 10, n. 10, p. 4043-4057, 2014.
- [2] MAY, A.; SELMAIER, M.; HOCHBERGER, J.; GOSSNER, L.; MÜHLDORFER, S. HAHN, E. G., ELL, C. Memory metal stents for palliation of malignant obstruction of the oesophagus and cardia. *Gut*, v. 37, n. 3, p. 309-313, 1995.
- [3] ALVES, H. L. R., STAINER, D., BERGMANN, C. P. Método alternativo para fabricação de cabeça femoral cerâmica para próteses de quadril. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v. 20, n. 2-3, p. 81-88, 2004.
- [4] RIGO, E. C. D. S.; OLIVEIRA, L. C.; SANTOS, L. A.; BOSCHI, A. O.; CARRODEGUAS, R. G. Implantes metálicos recobertos com hidroxiapatita. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v. 15, n. 1-2, p. 21-29, 1999.
- [5] HENCH, L. L. Biomaterials: a forecast for the future. *Biomaterials*, v. 19, n. 16, p. 1419-1423, 1998.
- [6] FARZADI, A.; SOLATI-HASHJIN, M.; BAKHSHI, F. Synthesis and characterization of hydroxyapatite/ $\beta$ -tricalcium phosphate nanocomposites using microwave irradiation. *Ceramics International*, v. 37, n. 1, p. 65-71, 2011.
- [7] PUPIO, F. SANTOS, R.B.M., CAMARGO, N.H.A., DELIMA, S.A., GEMELLI, E. Síntese e caracterização de pós nanocompósitos fosfato de cálcio/ $SiO_2$ n para aplicações biomédicas. In: Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, 5., 2008, Ouro Preto: COLAOP', 2008. v. 1, p. 1-6.
- [8] BELLINI, O. J. Síntese e caracterização de uma matriz óssea de fosfato de cálcio e nanocompósitos de fosfato de cálcio/ $SiO_2$ n para substituição e regeneração óssea. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [9] GERMAN, R. M.; RABIN, B. H. Enhanced Sintering Through Second Phase Additions. *Powder Metallurgy*, v. 28, n. 1, p. 7-12, 1985.
- [10] ROCHA, D. N.; SILVA, M. H. P.; GOBBO, L. A. Produção de hidroxiapatita parcialmente substituída com nióbio. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, p. 11-17, 2012.
- [11] SZURKOWSKA, K.; KOLMAS, J. Hydroxyapatites enriched in silicon–Bioceramic materials for biomedical and pharmaceutical applications *Progress in Natural Science: Materials International*, v. 27, n. 4, p. 401-409, 2017.
- [12] CHENG, K.; WENG, W.; QU, H.; DU, P.; SHEN, G.; HAN, G. et al. Sol-gel preparation and in vitro test of fluorapatite/hydroxyapatite films. *Journal of Biomedical Materials Research*, v. 69B, n. 1, p. 33-37, 2004.
- [13] DJOUALLAH, S.; BELHOUCHE, H.; KENZOUR, A.; KHERIFI, D. Sintering behavior of fluorapatite-based composites produced from natural phosphate and alumina. *Ceramics International*, v. 47, n. 3, p. 3553-3564, 2021.
- [14] DUCHEYNE, P.; RADIN, S.; KING, L. The effect of calcium phosphate ceramic composition and structure on in vitro behavior. I. Dissolution. *Journal of Biomedical Materials Research*, v. 27, n. 1, p. 25-34, 1993.
- [15] GIRÓN BASTIDAS, J.; BALDIN, E. K. K.; GODOI, T. P. M.; OLIVEIRA, L. S. D.; MACHADO, G. M.; MALFATTI, C. D. F.; PRANKE, P. H. L. Biomaterials for bone regeneration: an orthopedic and dentistry overview. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, v. 54, n. 9, 2021

- [16] BAUER, T. W.; MUSCHLER, G. F. Bone graft materials. An overview of the basic science. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, v. 371, p 10-27.
- [17] OONISHI, H. Orthopaedic applications of hydroxyapatite. *Biomaterials*, v. 12, n. 2, p. 171-178, 1991.
- [18] POON, K. K.; WURM, M. C.; EVANS, D. M.; EINARSRUD, M. A.; LUTZ, R.; GLAUM, J. Biocompatibility of (Ba,Ca)(Zr,Ti)O<sub>3</sub> piezoelectric ceramics for bone replacement materials. *Journal of Biomedical Materials Research*, v. 108B, p. 1295-1303.
- [19] PRADO DA SILVA, M. H., NAVARRO DA ROCHA, D. BR n PI 020110137091, 2011.
- [20] JIGONG, H.; ZHIJUN, X. U.; RUIQING, C.; YANJIE, Z.; QIAN, C.; PENG, F. et al. Characterization of (K<sub>0.5</sub>Na<sub>0.5</sub>) NbO<sub>3</sub> powders and ceramics prepared by a novel hybrid method of sol-gel and ultrasonic atomization. *Materials and Design*, v. 31, n. 6, p. 3146–3150, 2010.
- [21] GIBSON, I. R.; BEST, S. M.; BONFIELD, W. Chemical characterization of silicon-substituted hydroxyapatite. *Journal of Biomedical Materials Research*, v. 44, p. 422-428, 1999.

# Comando e controle como inovação organizacional na prestação de serviços públicos de saúde

Sylvio Jorge Souza Junior\*<sup>1</sup>, Fabio Oliveira Paula<sup>1</sup>, Paulo Cesar Pellanda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IAG - Escola de Negócios da PUC-Rio R. Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

<sup>2</sup>Seção de Engenharia Elétrica - Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

\*sylvio.souza@phd.iag.puc-rio.br

**RESUMO:** A área de Comando e Controle vem sofrendo uma série de evoluções nas últimas décadas, em decorrência da adoção de conceitos de Doutrina de Operações Centradas em Redes. Essa evolução credencia a aplicação de Comando e Controle no gerenciamento de empreendimentos distintos do usual, que seria o campo militar. Paralelamente, o mundo se depara com o problema da eficiência e da eficácia na prestação dos serviços públicos, notadamente na área da saúde, caracterizado pelas divergências entre o que os cidadãos esperam, como usuários dos serviços, e o que os governos entregam. Pesquisas têm sido desenvolvidas buscando elucidar a questão do fraco desempenho da administração pública em atender às demandas sociais. A inovação organizacional se apresenta como uma área promissora para apresentar caminhos que maximizem a prestação dos serviços públicos. Neste contexto, o artigo apresenta uma proposta de Inovação Organizacional que aplica Comando e Controle no gerenciamento das Operações de Prestação de Serviços Públicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Prestação de serviço público. Inovação organizacional. Comando e controle. Doutrina centrada em redes.

**ABSTRACT:** Command and Control field has gone through a series of evolutions in recent decades as a result of the adoption of the concepts of the Network-Centered Operations Doctrine. This evolution entitles Command and Control to manage projects other than the usual one, which would be the military field. At the same time, the world faces the problem of efficiency and effectiveness in the delivery of public services, particularly in the area of health, characterized by divergences between what citizens want as users of services and what governments provide. Research has been developed seeking to elucidate the issue of the poor performance of public administration in meeting social demands. Organizational innovation presents itself as a promising area for the development of ways to maximize the provision of public services. In this context, the article presents a proposal for Organizational Innovation that applies Command and Control in the Management of Public Service Provision Operations.

**KEYWORDS:** Provision of public service. Organizational innovation. Command and control. Doctrine centered on networks.

## 1. Introdução

O objetivo deste artigo é apresentar uma proposta de solução inovadora, na forma de uma Inovação Organizacional (IO), para o tratamento imediato das falhas que ocorrem durante a Prestação de Serviços Públicos (PSP) de saúde e que concorrem para que os resultados não sejam satisfatórios, baseada nos conceitos de Comando e Controle (C2) e de Doutrina de Operações de Operações Centrada em Redes (DOCR), área de aplicação tipicamente militar. Este artigo se baseia em uma Tese de Doutorado [1], desenvolvida no Instituto Militar de Engenharia (IME-RJ).

C2 tem a reputação de ser um assunto misterioso, mesmo para quem possivelmente seja ou tenha sido profissional da área. As palavras comando e controle, individualmente ou juntas, têm diferentes significados quando usadas por diferentes comunidades [2].

As técnicas de C2 vêm sofrendo uma série de evoluções nas últimas décadas, em decorrência da adoção de conceitos de DOCR [3]. Em paralelo, a percepção corrente denota que a PSP no Brasil não apresenta a qualidade necessária para atender às necessidades da população, tanto na abrangência quanto na qualidade, pois nem o alcance e nem o padrão são satisfatórios.

Tal percepção é suportada por pesquisas produzidas no meio acadêmico, abrangendo várias áreas de PSP, tais como transporte [4], saúde [5] [6][7] e educação [8][9], e também por evidências constantemente noticiadas nos meios de comunicação, indo desde falta de merendas quentes em escolas estaduais do Rio de Janeiro [10] até paciente atendida no chão do maior hospital de Fortaleza [11]. Inúmeras outras notícias veiculadas pela imprensa relataram problemas similares [12] [13][14][15][16].

Com base nessas evidências, dentre muitas outras reportadas diariamente, é inegável que a qualidade do serviço público no Brasil é insuficiente, sendo necessárias diversas ações para melhorá-la. Ações para atingir as melhorias necessárias podem consistir em mudanças na forma de gestão e execução das Operações de Prestação dos Serviços Públicos (OPSP), o que pode ser feito a partir da implementação de IO.

Nos últimos anos, a implementação de IO no setor público passou a receber cada vez mais atenção, tanto por proporcionar melhores níveis de qualidade de serviços públicos, quanto por influenciar na capacidade do setor privado de inovar [17]. Enquanto, por um lado, reportagens ou trabalhos científicos enfatizam a questão dos problemas com a PSP, por outro, a literatura especializada contém inúmeras publicações sobre IO que podem atenuar ou mitigar esse problema [18][19][20].

Seguindo essa tendência, os autores propõem uma IO na área de PSP de saúde que, baseada na aplicação de conceitos e processos de C2 e DOCR, proporcione diminuição da ocorrência de falhas ou a redução das suas consequências. Um projeto piloto desenvolvido entre o Instituto Militar de Engenharia (IME) e a Secretaria de Estado de Saúde do Estado do Rio de Janeiro (SES-RJ) foi implementado como parte do processo de pesquisa.

A finalidade do projeto piloto foi analisar e validar o modelo desenvolvido no primeiro ciclo de pesquisa-ação do processo de pesquisa, e seus resultados foram utilizados no aprimoramento do modelo, ocorrido no segundo ciclo da pesquisa-ação. Um resumo da sua implementação e dos resultados obtidos é apresentando ao final do artigo

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a fundamentação teórica é apresentada na Seção 2; a Seção 3 é dedicada à descrição do método utilizado; a seção 4 discorre sobre os resultados obtidos, apresentando os modelos propostos; e a seção 5 contem o resumo e os principais resultados da implantação do projeto piloto.

## 2. Fundamentação teórica

### 2.1 C2 e DOCR – C2

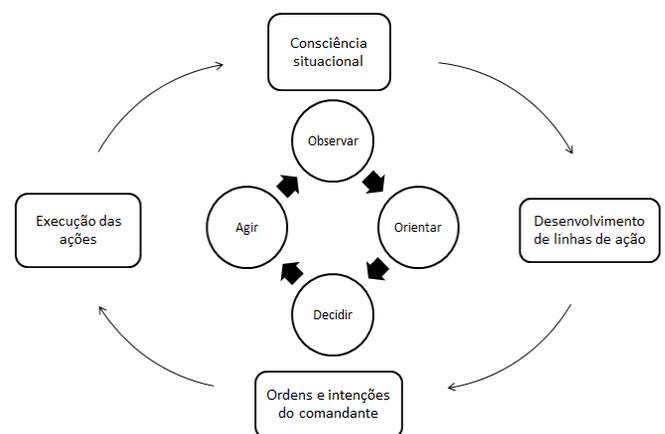
C2 não é um fim em si mesmo, mas uma direção para a criação de valor, como, por exemplo, o cumpri-

mento de uma missão. De maneira específica, C2 centraliza esforços de diversas entidades, individuais ou organizacionais, e recursos, inclusive informação, objetivando a realização de alguma tarefa ou objetivo [2].

Para que os processos de C2 sejam efetivos, é necessário que o seu ciclo, que é a sequência na qual as ações de C2 se realizam, desenrole-se repetidas vezes e tão rápido quanto possível em cada uma delas, durante todo o tempo no qual as operações forem necessárias [21][22]. Essas ações são conhecidas pela sigla OODA – Observação, Orientação, Decisão, Ação. O conceito desse ciclo foi introduzido por John Boyd, um estrategista militar norte americano atuante no século XX [23].

A *observação* representa o contínuo de monitoramento do ambiente operacional, com o objetivo de detectar qualquer mudança no curso dos acontecimentos que possa requerer uma intervenção. A *orientação* significa a projeção da nova realidade a ser alcançada no ambiente operacional, a nova situação desejada. A *decisão* corresponde à conduta a ser desenvolvida para que a nova realidade desejada seja efetivamente alcançada. Por fim, as *ações* decorrentes da decisão tomada são implementadas. Um novo ciclo então recomeça, com a retomada da observação – FIG. 1.

Fig. 1 - Ciclo OODA.



Fonte: adaptado de [22].

As funções de C2 compreendem o conjunto de atividades para a realização do PDCC – Planejamento, Direção, Controle e Coordenação – das ações de C2,

as quais integram o ciclo OODA supracitado [21][22]. Conforme [2], as funções de C2 são aplicáveis não apenas em empreendimentos militares, mas também em empreendimentos civis. Vista no seu conjunto, a expressão C2 abrange as seguintes funções:

- Estabelecer intenção (a meta ou objetivo);
- Determinar papéis, responsabilidades e relacionamentos;
- Estabelecer regras e restrições;
- Acompanhar e avaliar a situação e o progresso.

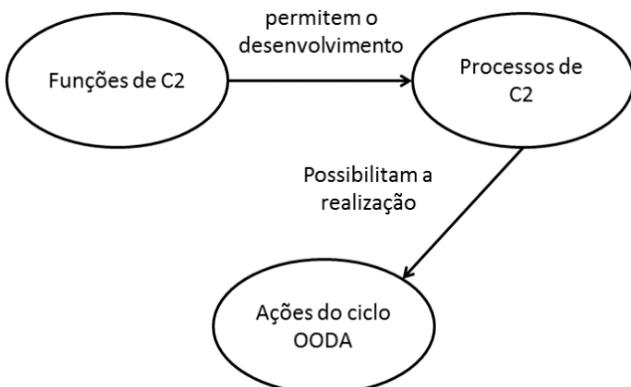
Embora ‘comando’ e ‘liderança’ possam remeter à mesma pessoa, na prática, é preciso permitir a possibilidade de que essas funções possam ser realizadas por diferentes indivíduos ou setores. Contudo, tendo em vista o fato de que ‘comando’ normalmente remete à figura do líder, as funções seguintes permitem considerar esse aspecto:

- Inspirar, motivar e gerar confiança;
- Treinar e educar.

Por fim, a questão dos recursos utilizados na realização da missão não pode ser deixada de lado. Sem os recursos necessários, a missão não pode ser concluída. Sendo assim, a última função considerada por [2] é ‘aprovisionar’.

As *funções* de C2 permitem o desenvolvimento dos *processos* de C2. São eles que possibilitam a realização do C2, tal como definido acima, com a realização das ações do ciclo OODA [21][22]. A FIG.2 ilustra esse relacionamento.

**Fig. 2** - O relacionamento entre funções, processos e ações de C2.



Para que os processos de C2 atinjam os objetivos precípuos, é fundamental que a percepção da realidade e a realidade em si estejam em perfeita sintonia. A essa sintonia, dá-se o nome de *consciência situacional* [21][22]. O arcabouço estrutural que dá o suporte para que todas essas atividades e objetivos sejam realizados e alcançados chama-se estrutura de C2, a qual abrange um ou mais – conforme o escopo – centros de C2. Tais centros são os centros de operações concebidos para proporcionar as ligações entre a estrutura de comando com os escalões superior e subordinado [21][22].

Sistema de C2 é o conjunto de instalações, equipamentos, sistemas de informação, comunicações, doutrina, procedimentos e pessoal essenciais para o comandante planejar, dirigir e controlar as ações de sua organização para que se atinja uma determinada finalidade [21][22]. As condições iniciais para que uma determinada missão ocorra, podem variar ao longo do tempo. São fatores que precisam ser observados para que a missão se realize dentro dos parâmetros desejados, produzindo os objetivos esperados.

Uma vez iniciada a missão, objetivos, regras, responsabilidades, alocação de recursos e todo o resto pode ser alterado. Cabe ao componente ‘controle’ realizar essa verificação: se algo mudou sem a autorização devida, impedindo a realização da missão, ou se algo precisa mudar. A única exceção diz respeito à definição dos objetivos (intenção), a qual cabe ao componente ‘comando’. O ‘comando’ tem por objetivo reconduzir a missão para o caminho do sucesso, a partir das verificações do componente ‘controle’ [2].

## 2.2 C2 e DOCR – DOCR

As organizações militares são, por sua própria natureza, resistentes a mudanças, e lidam com as informações, tradicionalmente, de três maneiras: *comandos*, que servem para definir a tarefa específica em questão – diretivas e orientações; *inteligência*, que fornece informações sobre o ambiente em que a tarefa deve ser realizada; e *doutrina*, que fornece as regras do jogo ou procedimentos operacionais padrões [24]

As mudanças, particularmente mudanças que podem afetar as relações entre organizações e entre

comandantes e seus subordinados, apresentam riscos significativos e, portanto, geram considerável preocupação. A explosão das tecnologias relacionadas à informação desencadeou uma maré virtual de mudanças que afetam profundamente organizações e indivíduos em múltiplas dimensões. Os militares não são exceção [24].

Consequentemente, o C2 militar tradicional vem sendo desafiado por uma série de problemas modernos, como complexidade ambiental, dinamismo, novas tecnologias e concorrência capazes de explorar as fraquezas de um paradigma organizacional que tem sido dominante desde a revolução industrial. A resposta conceitual a esses desafios é um novo tipo de organização de C2 chamada *Network Enabled Capability* (NEC) [3], a qual incorpora a DOCR.

Arquiteturas militares tradicionais têm sido organizadas de forma muito hierarquizadas, mas as modernas inovações em comunicações e na tecnologia da computação proporcionam uma extensa faixa de outras possíveis estruturas. Em paralelo, a emergente ênfase em operações não necessariamente voltadas para a guerra vem requerendo estruturas organizacionais mais flexíveis. Esse novo cenário requer o uso de técnicas formais para a avaliação de um conjunto de possíveis estruturas organizacionais, e as técnicas de Análise de Redes Sociais se apresentam como uma escolha óbvia para tais análises [25].

Na era industrial, período iniciado com a Revolução Industrial e que vai até o Século XX, os modelos de interações eram desenhados para assegurar controle a partir do centro. Assim, o fluxo de informações sempre seguia a “cadeia de comando” ou a estrutura de gerenciamento do empreendimento. Esse padrão de interação pode ser reconhecido nos modelos militares, nos quais as correspondências oficiais são endereçadas aos comandantes das unidades. Esta prática reforça a tradição de que o fluxo de informação deve seguir ao longo da linha de comando e de que toda informação dentro de uma unidade é do interesse e pertence ao comandante da unidade. Dessa forma, na era industrial os mecanismos de comunicação imitavam a estrutura organizacional da organização [2].

A era da informação, também conhecida como era do computador ou era digital, é um período histórico iniciado no século XX e caracterizado pela rápida mudança da indústria tradicional, que a Revolução Industrial proporcionou, para uma economia fortemente baseada na Tecnologia da Informação (TI).

Os padrões de interação tradicionais desenvolvidos na era da indústria sofreram alterações para se adaptarem aos novos paradigmas, transformando-se de modelos centralizados para modelos em rede. No caso da Guerra Centrada em Redes (*Network Centric Warfare* – NCW) e das *Edge Organization* (forma organizacional relativamente nova que distribui conhecimento e poder aos seus limites e permite que os membros e unidades organizacionais se auto-organizem e autossincronizem suas atividades) [26], são as redes sociais que serão ativadas por quaisquer mecanismos disponíveis: correio, telefone, videoconferência, redes de área local, redes de área ampla, rede mundial de computadores etc. As redes sociais também dependem da cooperação: a vontade de trabalhar em conjunto e colaborar quando apropriado [2].

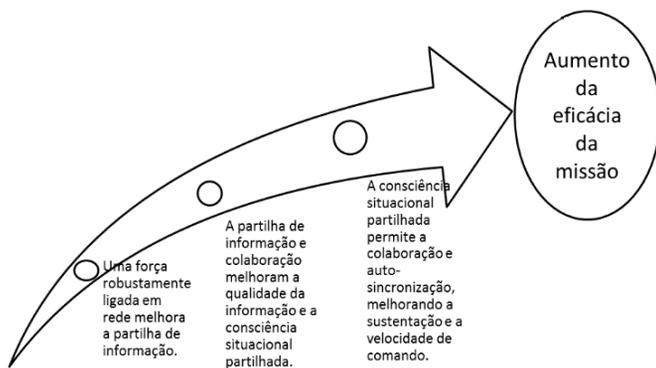
A DOCR é adotada pelo Departamento de Defesa dos EUA para a implementação de seus sistemas de C2. Esta doutrina transformou e continua transformando os processos de C2. Ela propõe o compartilhamento maciço de informações através de redes de comunicações, levando a uma natural auto sincronização das ações entre as forças atuadoras e, desta forma, otimizando o ciclo OODA e o subsequente aumento da efetividade da missão a ser realizada [27].

De acordo com [28], a cadeia de valor das Operações Centradas em Rede (OCR) se reflete em um conjunto de hipóteses que advogam, resumidamente, que uma força robustamente ligada em rede colabora para o aumento da eficácia da missão, conforme as conexões causais apresentadas na Fig. 3. O compartilhamento maciço de informações via redes de comunicações, leva a uma natural autossincronização das ações, otimizando o ciclo OODA e aumentando a efetividade da missão a ser realizada [29].

Este trabalho considera que a observação sistemática e estruturada do complexo ambiente de PSP, a partir da aplicação adaptada dos elementos de C2 e

DOCR, pode atender à necessidade que, segundo [30], os governos têm de compartilhar poder e serem mais flexíveis em seus mecanismos de controle, reduzindo os procedimentos burocráticos que podem prejudicar o serviço eficiente de entrega ao público.

**FIG.3** - Operações Centradas em Rede



**Fonte:** Confeccionado a partir de [27] e [28].

### 2.3 PSP

A administração pública do século XXI está passando por mudanças dramáticas, especialmente nas economias avançadas, mas também em muitas partes do mundo em desenvolvimento. A globalização e a pluralização da prestação de serviços são as forças motrizes por trás dessas mudanças. Os problemas políticos enfrentados pelos governos são cada vez mais complexos, perversos e globais, em vez de simples, lineares e com focos nacionais. No entanto, os paradigmas predominantes através dos quais a reforma do setor público é projetada e implementada são relativamente estáticos e não abrangem totalmente o significado ou as implicações dessas mudanças mais amplas. Embora as reformas do setor público no mundo em desenvolvimento sejam influenciadas por experimentos de políticas e práticas organizacionais originárias dos países da *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD), elas tendem a operar dentro do paradigma tradicional da administração pública. Em consequência, geralmente há uma discrepância entre o impulso dos esforços de reforma do setor público nos contextos dos países em desenvolvimento e

mudanças mais amplas na natureza da governança e abordagens contemporâneas à gestão pública baseadas na experiência da OCDE [31].

Contemporaneamente, Governança Pública (GP) tem sido proclamada como um novo paradigma, distinto da Nova Gestão Pública (NGP) e da administração pública burocrática ortodoxa. Aplica-se em novos tempos e contextos, marcados pelo pluralismo, complexidade, ambiguidade e fragmentação, diferentemente dos contextos da velha administração pública (o nascimento e apogeu do estado do bem estar social desenvolvimentista) e da NGP (a onda neoliberal dos anos 80 e 90). GP é capacidade de governo; é governar em rede de forma colaborativa; é governar orientado para resultados [32][33][34].

Um importante aspecto a ser considerado no cenário da PSP diz respeito à questão da eficiência e da eficácia. Uma referência a uma citação de Peter Drucker é feita em [35]: o julgamento do desempenho de um administrador deve ser através dos critérios gêmeos de eficácia – capacidade de fazer as coisas ‘certas’ – e eficiência – a capacidade de fazer ‘certo’ as coisas.

Em [36] é apresentado um framework que discute duas questões gerais: se o administrador público está ‘fazendo as coisas certas’, isto é, entregando serviços consistentes com as necessidades do cidadão; e se está fazendo ‘certo as coisas’, ou seja, proporcionando serviços de qualidade com o menor custo. Para responder a essas questões, em [36] dois testes empíricos são realizados, um de eficácia e outro de eficiência. O teste da eficácia pergunta em que extensão os programas públicos cumprem as metas estabelecidas, enquanto o teste da eficiência questiona se os serviços são prestados ao menor custo possível.

Em paralelo ao processo de evolução da PSP, do lado do cidadão também ocorreram mudanças. Cresce a pressão da sociedade por serviços públicos de qualidade, e a pressão é mais percebida em relação àqueles serviços relacionados com a prestação direta ao cidadão. Tal conjuntura se tornou possível principalmente a partir de 1995, quando o cenário nacional brasileiro se viu às voltas com a entrada em pauta da reforma do aparelho do Estado, e, dentro desse contexto, da reforma administrativa. Com a aprovação

da Emenda Constitucional no. 19, de 04 de junho de 1998 [37], estabeleceu-se a adoção do Princípio da Eficiência na administração pública brasileira.

A PSP é uma função essencial dos governos [30], caracterizando-se pela entrega do produto, feita diretamente pelo governo ou por um representante, aos cidadãos. Pode abranger muitos interessados, por envolver não apenas agências governamentais, mas também agências inter e intragovernamentais. Como consequência, corre-se o risco de falta de coordenação e conflito de interesses. Havendo muitas partes interessadas, é necessário fazer um ajuste nas expectativas de interações [30].

Por ser muito heterogêneo, o setor público tem desafios particulares para garantir sua eficácia e sua eficiência. Três dimensões principais podem ser usadas para classificar as organizações públicas: área (saúde, educação etc.), nível ou esfera de governo (federal, estadual, municipal) e tipo de instituição (formulação de políticas / administração central, agência regional, unidade prestadora de serviço) [17].

Para [38], os governos, especialmente nos países em desenvolvimento, ainda não possuem organizações maduras para implantar políticas públicas eficientes relacionadas à prestação direta de serviços ao cidadão. O referido autor relata que, além da política, as questões de implementação podem ser um importante foco da pesquisa. Dentre as questões apontadas por [38], uma é de especial interesse para a pesquisa objeto deste trabalho: o que pode ser feito para evitar falhas ou corrigi-las mais prontamente?

A preocupação com as operações de entrega de serviço também estão presentes no trabalho de [39]. Para o autor, o gerenciamento de operações é essencial para maximizar a produção de bens e serviços no serviço público, enquanto a gestão da qualidade assegura a satisfação dos beneficiários além das suas expectativas.

A proposta de que trata o artigo busca justamente atuar sobre a eficácia e a eficiência das OPSP, atuando sobre uma de suas variáveis, conforme visto adiante, através da melhoria do gerenciamento da entrega do serviço, na forma de uma IO, posicionando-se conforme diversas publicações que buscam mitigar o problema da qualidade da PSP através de inovações (e.g. [19][20][40]).

Resumidamente, os modelos propostos para aplicação de C2 e DOCR no ambiente da PSP buscam: atenuar a discrepância entre os impulsos de esforços por reformas e mudanças mais amplas [31]; integrar-se aos preceitos da GP [32][33][34]; maximizar a eficiência e a eficácia da PSP [35][36][37]; potencializar as interações e reduzir os conflitos entre os interessados na PSP [30]; atuar a gestão da PSP das agências regionais e das unidades prestadoras dos três níveis de governo [17]; evitar falhas e corrigi-las mais prontamente [38]; e gerenciar as OPSP visando maximizar a produção de bens e serviços no SP [39].

## 2.4 IO Aberta no Setor Público

A inovação é mais do que uma nova ideia ou invenção. Uma inovação requer implementação; que seja colocada em uso ativo ou disponibilizada para uso por outras empresas, indivíduos ou organizações. Os impactos econômicos e sociais das invenções e ideias dependem da difusão e aceitação de inovações relacionadas [41].

Conforme [42], um novo bem, serviço, ou processo seria uma inovação somente se estiver conectado ao mercado. Para o autor, esta conexão significa que não há sentido em inovar se não houver reflexo no mercado, ou, em outras palavras, se a empresa não obtiver incremento nas vendas de seus produtos ou serviços. Especificamente no caso dos serviços públicos, o aumento das vendas não faz sentido, contudo, o aumento de qualidade da prestação do serviço não deixa de ser uma conexão com o “mercado”.

Com o tempo, o entendimento do processo de geração da inovação se aprofundou, mostrando que, por um lado, o significado dos gatilhos da inovação mudou, e por outro, as diferentes fases do processo de inovação também foram substancialmente redefinidas. Outra novidade é a mudança do entendimento do processo de inovação como uma sequência linear de diferentes fases para uma visão integrada do processo, ocorrendo a substituição de tipos simples, lineares e sequenciais, por padrões cada vez mais complexos. Isso significa que as fases individuais se sobrepõem e que passa a existir retroalimentação

entre elas. Em termos de conhecimento e transferência de tecnologia, os modelos interativos enriquecem tanto a pesquisa básica quanto a pesquisa e desenvolvimento aplicados [43].

Fontes externas de conhecimento e P&D têm um papel central no desenvolvimento da inovação, sendo complementares em empresas de áreas industriais mais intensas tecnologicamente, as quais normalmente apresentam maior capacidade de absorção. Em empresas de setores industriais de baixa intensidade tecnológica, ambas as estratégias são efetivas para a melhoria do desempenho da inovação, mas a combinação não apresenta efeitos significantes [44].

A IO, conforme citado em [45], refere-se à criação ou adoção de uma ideia ou comportamento novo para a organização, acompanhado de novos processos e de uma nova estrutura de informações, podendo ser causada de forma endógena ou exógena. Tal definição é consistente com a definição do Manual de Oslo [41], o qual define como requisito mínimo para que uma inovação possa ser identificada a existência de uma ou mais características que se diferenciem consideravelmente das que caracterizavam o produto ou os processos de negócio previamente oferecidos ou utilizados pela empresa.

A IO é vista como a implementação de um novo método organizacional nas práticas comerciais da empresa, na organização do local de trabalho ou nas relações externas. Sendo assim, pode-se concluir que uma IO tem escopo abrangente, contemplando o desenvolvimento de novos processos e de modelos de negócios e a obtenção de novos resultados sob a ótica da criação de inovação. Além disso, contempla o desenvolvimento de competências, bem como processos de criação e transferência de conhecimento [46].

Particularmente, uma IO é a introdução de novos métodos organizacionais para o gerenciamento do negócio tanto a nível interno quanto de relacionamento com agentes externos [41][47], e representa uma das fontes mais importantes e sustentáveis de vantagem competitiva para as empresas.

Uma Inovação Aberta (IA) é um conceito baseado na convicção de que as empresas podem e devem buscar por ideais e maneiras de criar inovações não

somente nos limites das suas estruturas, mas também no seu ambiente, formado por seus parceiros externos – clientes, outras empresas etc. [48].

A crescente complexidade de produtos e serviços, aliada às rápidas mudanças de demandas do mercado ou à crescente pressão de vários grupos sociais são tendências que obrigam as empresas a adotarem novas práticas para permanecerem competitivas. As fontes externas de informação e integração no contexto da IA é uma prática que pode alavancar o sucesso [49].

O caminho para o desenvolvimento de novas tecnologias e novos conhecimentos torna as empresas cada vez mais dependentes de conhecimento e tecnologia externos, os quais podem ser de domínio público ou pertencerem a outras empresas, indivíduos ou instituições de pesquisa [50].

Neste trabalho, busca-se, em resumo, resolver a questão da baixa eficiência e eficácia da PSP no Brasil, através da proposição de uma IO aberta, que se baseia na introdução de conceitos e processos de C2 e DOCR no ambiente das OPSP.

Dessa forma, a proposta caracteriza-se, do ponto de vista da IO: como uma tentativa de aumento de qualidade da prestação do serviço representando uma conexão com o “mercado” [42]; pela aplicação de fontes externas de conhecimento e P&D [44]; por simbolizar a adoção exógena de um comportamento novo acompanhado de novos processos e de uma nova estrutura de informações [45]; pela introdução de novos métodos organizacionais para o gerenciamento do negócio [41][47]; como uma busca para o atendimento da crescente pressão exercida pelos grupos sociais clientes da PSP [49]; e por retratar, na forma de uma inovação aberta [48], a aplicação de conhecimento de instituição de pesquisa no desenvolvimento de competências e práticas no âmbito da empresa pública [50].

### 3. Método

Duas abordagens foram utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa. A primeira abordagem (geral) diz respeito ao método científico relativo às etapas

do desenvolvimento e validação da pesquisa propriamente dita, que consiste na identificação e estudo do referencial teórico; na análise dos dados; na proposição de uma primeira versão de solução; na implantação, avaliação e evolução de um projeto piloto; em uma nova rodada de estudo teórico, devido à incorporação de novo referencial teórico; e na formulação de uma proposta final. Quanto à segunda abordagem (específica), diz respeito à técnica e às ferramentas de modelagem utilizadas sobre o ambiente de PSP, para o entendimento do problema e a desenvolvimento e apresentação da solução.

Em relação à primeira abordagem metodológica (geral), a pesquisa foi desenvolvida segundo o método de Pesquisa-Ação [51][52], envolvendo a Secretaria de Estado de Saúde do RJ (SES-RJ), em parceria com o Instituto Militar de Engenharia (IME). À SES-RJ coube o papel da instituição onde o problema é detectado e ao IME o papel da detentora da expertise sobre a área do conhecimento aplicado na proposta – C2 e DCR. Durante o desenvolvimento do modelo proposto foi implementado um projeto piloto na SES-RJ. Essa combinação de papéis das duas instituições envolvidas orientou para a escolha do método de pesquisa-ação.

O desenvolvimento da pesquisa contou com dois ciclos de pesquisa-ação. O primeiro ciclo foi composto por três etapas: exploratória, experimental e validação. Na etapa exploratória realizaram-se as pesquisas relacionadas ao referencial teórico, desenvolveu-se o diagnóstico do problema e o modelo para a solução. A etapa experimental consistiu na implantação do modelo proposto (projeto piloto) e sua operação assistida. A etapa de validação consolidou os dados do projeto piloto e embasou a realização do segundo ciclo da pesquisa-ação.

No segundo ciclo, apenas a etapa exploratória foi realizada e constou do aprofundamento da revisão bibliográfica e da evolução do modelo proposto. Pretende-se concluir o segundo ciclo no futuro, através da realização de uma segunda etapa experimental seguida da etapa de validação.

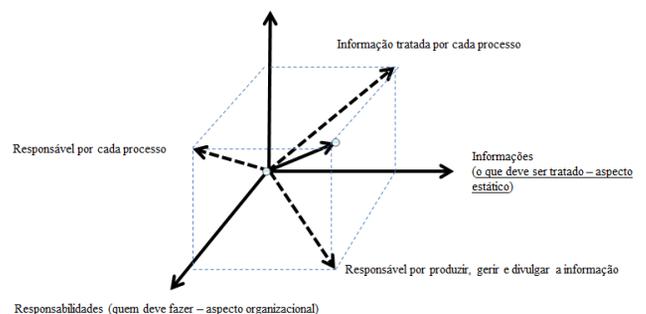
No que se refere à segunda abordagem metodológica (específica), a modelagem do problema e da solução proposta seguiu uma metodologia específica

baseada na utilização de técnicas e ferramentas de engenharia de sistemas/software [53][54]. Essa metodologia se baseia na utilização de diagramas representativos de diversas visões do objeto estudado e também se organiza em ciclos (concepção, elaboração, construção e transição) e foi utilizada para desenvolver o modelo e definir a implantação dos processos e conceitos de C2 e DOCR no ambiente da PSP. Ao longo das etapas dos dois ciclos da pesquisa-ação vários ciclos de modelagem ocorreram.

## 4. Resultados

A IO proposta sugere a adoção de processos, estrutura organizacional (atores institucionais com responsabilidades bem estabelecidas) e estrutura de informações para a incorporação de C2 e DOCR no tratamento das falhas que ocorram durante a PSP. As três dimensões abordadas se integram, e a resultante da integração define ‘quem’ (ator) faz ‘o que’ (processo), ‘o que é tratado’ (informação) e quem responde pela informação, sempre relacionado ao tratamento das falhas (FIG. 4 – Modelo Tridimensional proposto) e ao emprego de processos e conceitos de C2 e DOCR.

Figura 4 - Modelo Tridimensional proposto.



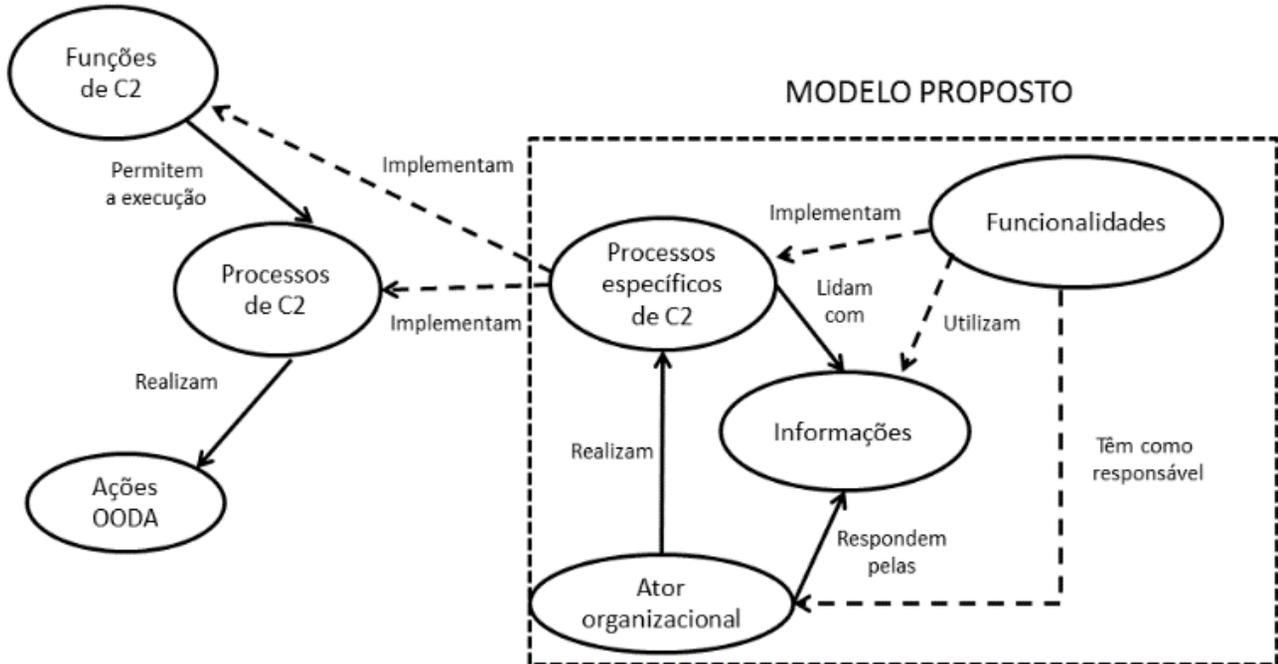
Para a realização do ciclo OODA, processos de C2 devem ser realizados ciclicamente (FIG. 5). As Funções de C2 [2][21][22] promovem o arcabouço para que os processos de C2 possam ser realizados, conforme a FIG. 5.

Dessa forma, o modelo proposto deve prover processos específicos de C2 que implementem as Funções de C2 e os Processos de C2, e que deem sustentação à realização das Ações do ciclo OODA. A realização

dos processos específicos do modelo proposto é feita pelas funcionalidades do sistema e só é possível com o tratamento adequado de informações e a correta

identificação do ator organizacional responsável pela execução dos processos específicos e pela gestão das informações, conforme apresentado na FIG. 5.

Fig. 5 - O modelo proposto e a implementação de C2 e DOCR.



O modelo proposto atende ao problema da pesquisa atuando sobre o tempo de resposta decorrido entre a ocorrência de uma falha e a sua total solução.

- Ao ocorrer uma falha, ações corretivas devem ser disparadas para solucionar o problema. Uma variável pode ser identificada: o tempo de resposta. Essa variável pode ser dividida em três partes:
- Tempo de percepção ( $tp$ ) – tempo decorrido entre a ocorrência da falha e sua percepção.
- Tempo de disparo ( $td$ ) – tempo decorrido entre a percepção da falha e o disparo da ação corretiva;
- Tempo de execução ( $te$ ) - tempo decorrido entre o início da ação corretiva e a completa solução.

Portanto, o tempo de resposta ( $tr$ ) é igual a  $tp + td + te$ .

Sendo a eficiência a medida normativa da utilização dos recursos em determinado processo [35], e sendo o tempo um recurso utilizado pelos processos, é aceitável supor que o  $tr$  utilizado na correção de

uma falha seja um fator que influencie de forma inversamente proporcional o valor da eficiência: quanto maior o  $tr$ , menor a eficiência.

Sendo a eficácia a medida normativa do alcance dos resultados de determinado processo [35], e sendo o  $tr$  o intervalo de tempo decorrido entre o momento da expectativa do resultado (quando a falha é percebida) e o momento em que o resultado efetivo é alcançado, é plausível considerar que o  $tr$  também influencie de maneira inversamente proporcional o valor da eficácia: quanto maior o tempo decorrido para o alcance dos resultados, menor o valor desse resultado.

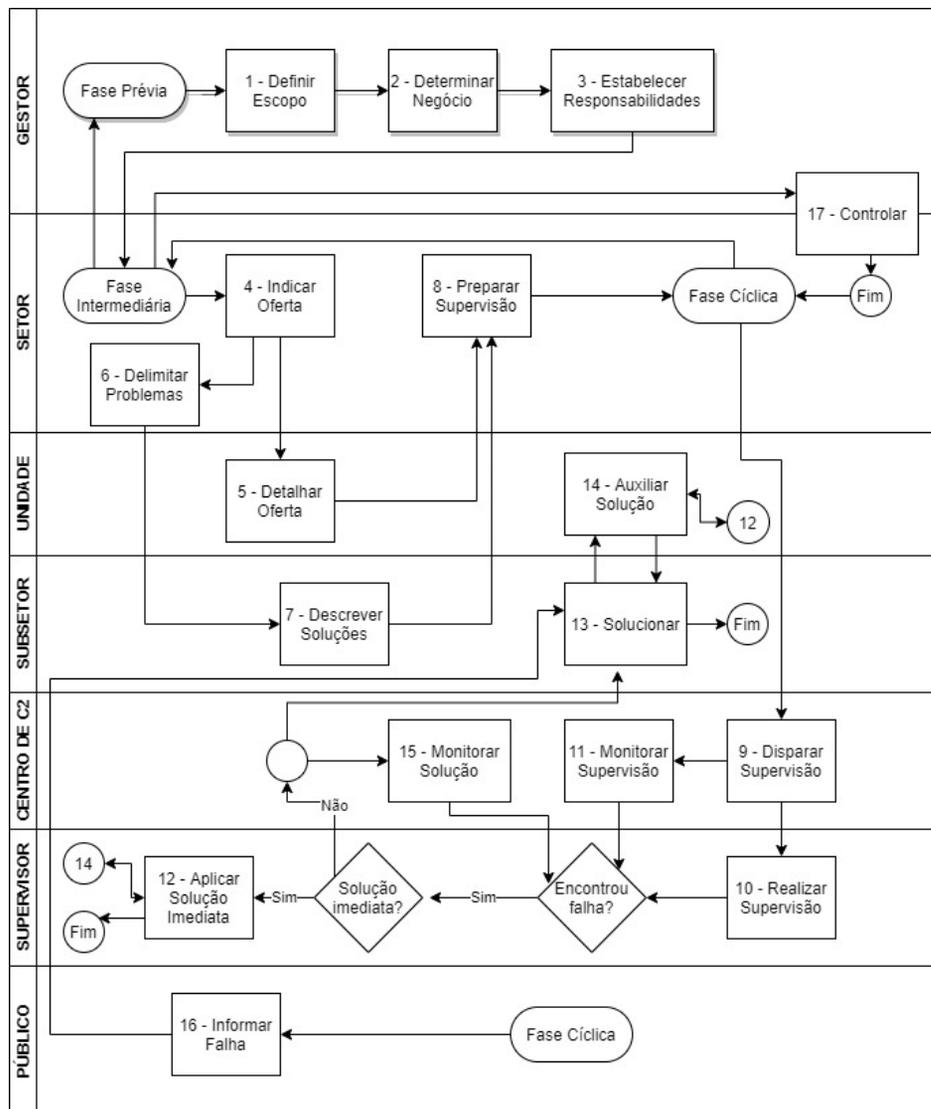
Do exposto acima, é plausível aceitar que, atuando na diminuição do  $tr$  necessário para o tratamento de uma falha, estar-se-á concorrendo para a melhoria do desempenho da PSP. É exatamente neste aspecto da PSP que a proposta atua: diminuindo o  $tr$  para a solução das falhas, atuando sobre as suas componentes  $tp$ ,  $td$  e  $te$ .

### 4.1 Modelo Processual

O Diagrama de Fluxo de Processos de Negócio da Figura 6 representa o modelo processual proposto. Os processos agem sobre as variáveis relacionadas ao tratamento das falhas, conforme apresentado acima.

Os processos nove, dez, onze e dezesseis promovem a diminuição do *tempo de percepção*; os processos dez, onze, doze diminuem o *tempo de disparo*; e os processos treze, quatorze, quinze reduzem o *tempo de execução*. O processo dezessete pode reduzir qualquer uma das variáveis.

**Fig. 6 - Modelo de Processos de C2 e DOCR para o tratamento de falha na PSP.**



### 4.2 Modelo de Informações e o Modelo Organizacional

O modelo informacional contém a estrutura da informação necessária para que os processos sejam realizados e para que não haja qualquer tipo de ambiguidade. Esse modelo contém os elementos de informação

(Setor, Falha, Solução, etc.), suas características principais (data da Falha, nome do Setor, descrição da Solução etc.) e os relacionamentos entre os elementos (um Subsetor atua sobre uma Falha através de uma Solução, por exemplo), e é apresentado na FIG. 7.



os elementos de cada uma das dimensões abordadas e como os elementos de cada dimensão relacionam-se entre si, o metamodelo do modelo proposto retrata as características gerais de cada dimensão e como as dimensões se relacionam umas com as outras.

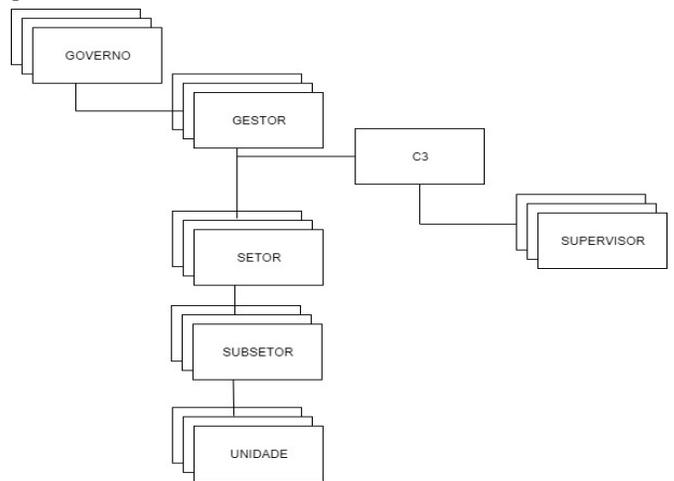
O diagrama de classes da Fig. 8 contém o meta-modelo do modelo proposto, cujo núcleo é formado por classes que representam as dimensões abordadas: elemento informacional, elemento processual e elemento organizacional.

Cada uma dessas classes se especializa nas classes específicas de cada dimensão. O elemento processual se especializa em dezessete classes representativas dos processos identificados do modelo processual; o elemento organizacional, nas oito classes da estrutura do modelo organizacional; e o elemento informacional, nas vinte e seis classes de informação do modelo informacional.

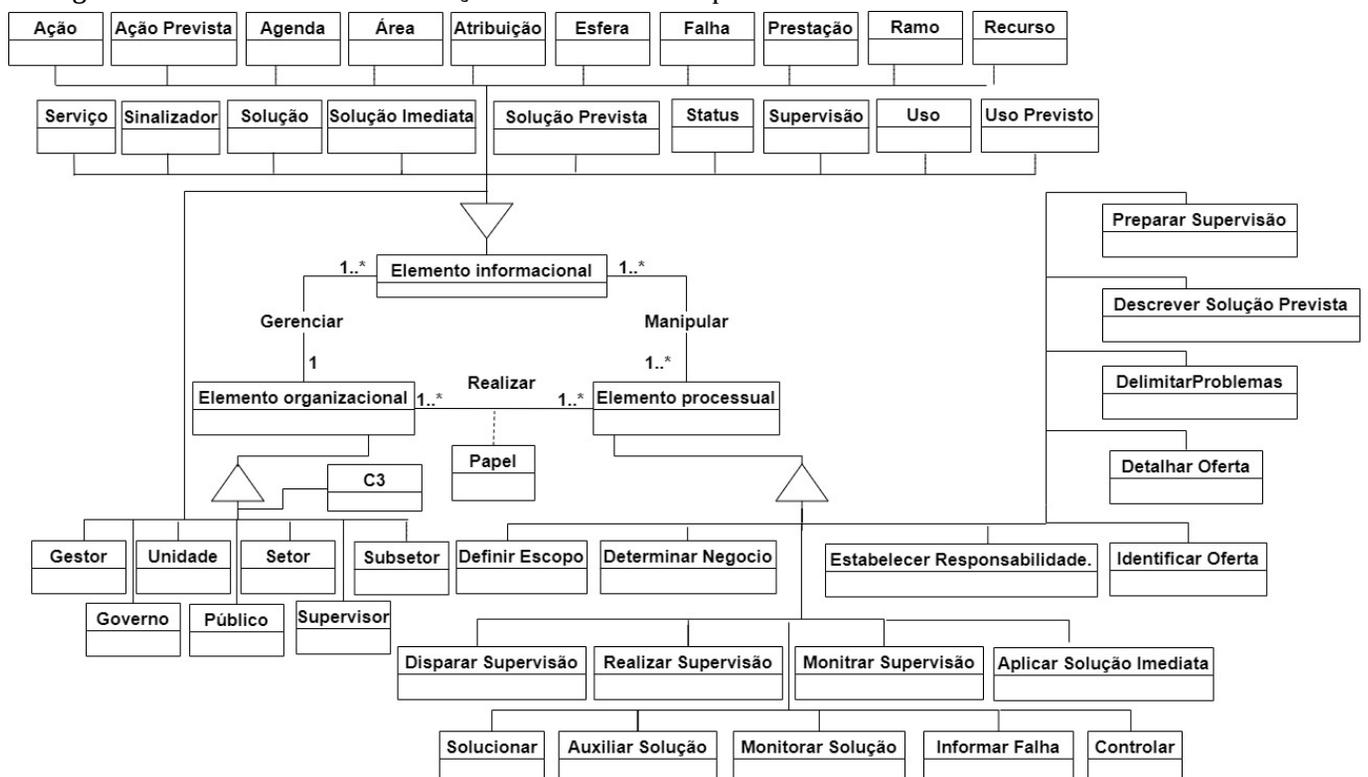
As associações entre as meta classes que representam as três dimensões fornecem os fundamentos para

a integração. Tendo em vista as limitações de espaço, a integração não é apresentada neste artigo, mas o leitor pode se reportar à tese de referência [1] para maiores detalhes.

**Fig. 8 - Modelo Organizacional de C2 e DOCR para o tratamento de falha na PSP.**



**Fig. 8 - Meta-modelo de Informações de C2 e DOCR para o tratamento de falha na PSP.**



## 5 - Projeto Piloto

O projeto piloto foi implantado no período compreendido entre 28/10/2013 e 13/03/2014, durante as etapas experimental e de validação do primeiro ciclo da pesquisa-ação. Foi composto pelo Centro de C2, pela equipe de supervisão, por uma equipe do IME, pela equipe dos atores institucionais da SES envolvidos no tratamento de falhas, pelas unidades monitoradas (dois hospitais e 28 UPAs) e pelo sistema informatizado de C2 (SC2). O funcionamento diário composto pelos processos da fase cíclica do modelo processual (FIG. 6) é apresentado esquematicamente na FIG. 9.

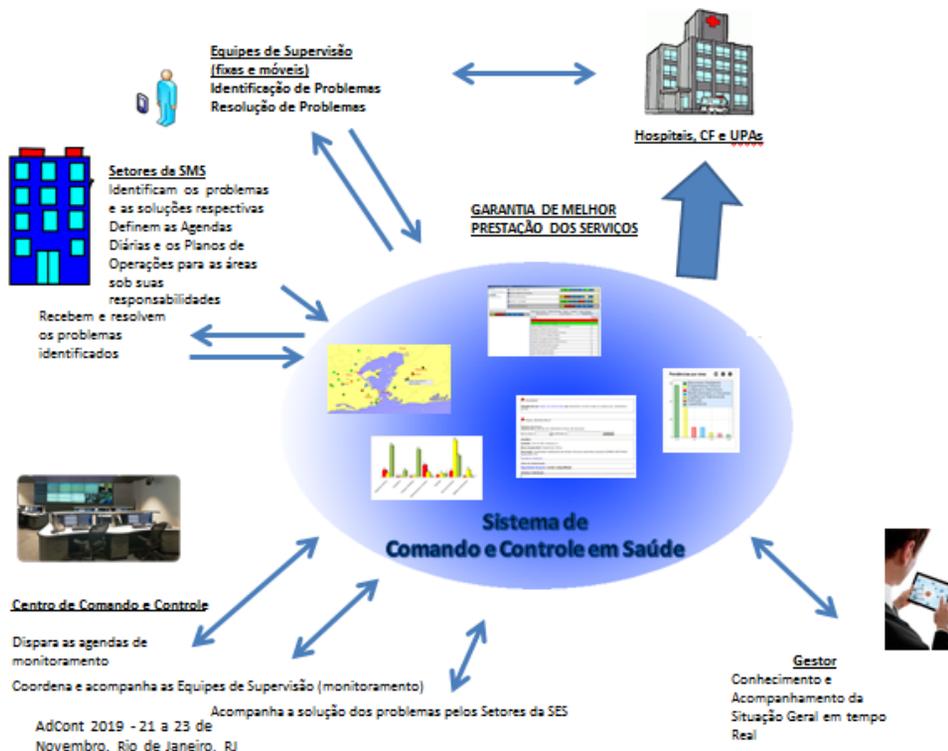
Foram realizadas 784 supervisões, com 37.000 sinalizadores analisados. Identificaram-se 736 problemas, sendo 632 resolvidos antes da próxima supervisão, em decorrência da implantação da proposta (índice de resolução de aproximadamente 86,4%).

Além de diminuir o tempo de resposta no tratamento das falhas, outros fatores foram percebidos. Por exemplo, quase metade das falhas identificadas ao longo da experiência (30,77%+17,48%=48,25%)

apresentou gravidade razoável ou alta, sendo mais de 17% graves. Como exemplo de falha grave pode ser citado a guarda de medicamentos vencidos nos consultórios médicos, que eram normalmente distribuídos ao público.

Outra descoberta diz respeito à percepção anterior dos gestores de que o ‘maior problema’ da SES-RJ estaria relacionada ao Ramo ‘recursos humanos’ (faltas, atrasos e carência de profissionais). Verificou-se que os problemas relacionados a esse Ramo eram, em sua maioria, de média gravidade. O Ramo ‘medicamentos e insumos’, que não era foco de maior preocupação dos gestores, recepcionava a maioria dos problemas graves (quase 40% de todos os problemas graves), conforme FIG. 10. Essa constatação significa que um Ramo com sérios problemas de gestão na entrega do serviço não era percebido como um ponto frágil, não recebendo, dessa forma, a atenção devida dos gestores. Particularmente na área da saúde pública, a correta identificação de pontos frágeis na PSP pode representar a preservação de muitas vidas.

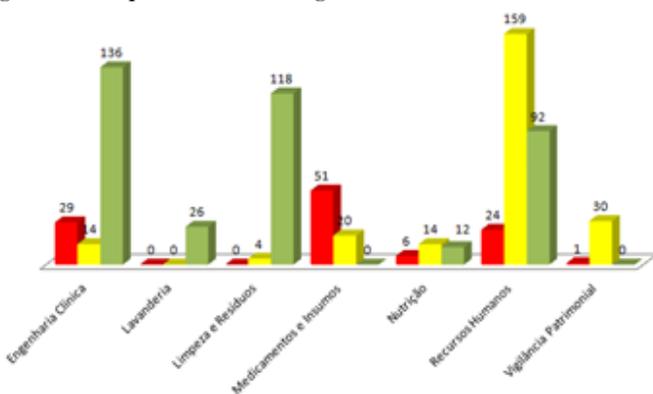
Figura 9 - Fase cíclica do projeto piloto.



Também foi possível identificar os atores institucionais que se deparavam com mais problemas, mostrando a necessidade de uma auditoria interna para buscar os motivos desse comportamento.

Após o segundo ciclo da pesquisa ação, a partir das análises dos resultados do projeto piloto e de nova rodada de pesquisas e desenvolvimentos, evoluiu-se o modelo inicial para o modelo final proposto, o qual é apresentado na seção 4 (Resultados). Como explicado na seção 3 (Método), somente o primeiro ciclo da pesquisa ação ocorreu integralmente, e somente um projeto piloto foi implementado.

**Figura 10** - Distribuição das falhas segundo gravidade e área. Em cada grupo de três barras, mais grave à esquerda, menos grave à direita.



Um segundo e terceiro projetos pilotos estão sendo planejados no momento em que este artigo é escrito, como parte da finalização do segundo ciclo e da realização de um terceiro ciclo de pesquisa ação, os quais darão continuidade às pesquisas produzidas durante a realização da tese de doutorado original.

## Conclusão

Este artigo apresenta uma proposta de IO aberta para a implantação de C2 e DOCR no tratamento

das falhas na PSP. O objetivo é diminuir intensamente as consequências de ocorrência de falhas durante a prestação do serviço ao cidadão, através da diminuição dos tempos relacionados à solução das falhas.

Tendo em vista a evolução ocorrida na etapa exploratória do segundo ciclo da pesquisa-ação, a proposta final apresenta melhorias em relação ao modelo implementado no projeto piloto. Por exemplo, é possível identificar a rapidez com que os setores resolvem os problemas encontrados e o público pode participar do tratamento das falhas, através do processo 16 (FIG. 2).

Como limitações podem ser citadas a realização de apenas um ciclo completo de pesquisa-ação; a falta de um mecanismo para medição de desempenho; a impossibilidade de comparações entre os resultados do projeto piloto e a situação anterior, tendo em vista a inexistência prévia de um mecanismo de tratamento de falhas; e a realização de somente um projeto piloto. A futura execução das etapas exploratórias e de validação do segundo ciclo da pesquisa-ação tendem a tratar dessas limitações.

Por fim, cabe salientar que o modelo proposto é genérico, o que significa que pode ser aplicado a qualquer área do serviço público (saúde, educação etc.), em que pese ter sido desenvolvido baseado no domínio da saúde pública.

## Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio da FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Brasil) [Processos E-26/210.277/2019(248665), E-26/201.409/2021(260810) e E-26/290.027/2021(260003)].

## Referências

- [1] Souza, Sylvio Jorge Junior. Comando e Controle como Inovação Organizacional na Prestação de Serviços Públicos. 2020. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Defesa) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2020.
- [2] Alberts, D. S.; Hayes, R. E. (2006). Understanding Command and Control. DoD Command and Control Research Program. CCRP Publications Series. Recuperado de: [http://www.dodccrp.org/files/Alberts\\_UC2.pdf](http://www.dodccrp.org/files/Alberts_UC2.pdf).

- [3] Walker, Guy H.; Stanton, Neville A.; Salmon, Paul M. & Jenkins, Daniel P. (2008) A review of sociotechnical systems theory: a classic concept for new command and control paradigms, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, (Vol. 9:6, pp. 479-499, DOI: 10.1080/14639220701635470).
- [4] QUIPUNGO, Policarpo F.; Rodrigues, E. C. Cavalcante; Peña, C. Rosano; Braga, B. Alexandre. PERCEPÇÃO DA QUALIDADE NO SERVIÇO DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO E DE SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS NO DISTRITO FEDERAL - DF - BRASIL. *Revista do CEPE*. Santa Cruz do Sul, n. 44, p. 100-112, jul. dez. 2016. Ahmad, Zalinah. (2017). *Public Service Delivery: Do We Need any Reforms? Religion, State and Society: Exploration of Southeast Asia*. (Cap.. 6, pp. 86-91). Political Science Program. Department of Politics and Civics Education. Universitas Negeri Semarang.
- [5] PROTASIO, Ane Polline Lacerda et al . Avaliação do sistema de referência e contrarreferência do estado da Paraíba segundo os profissionais da Atenção Básica no contexto do 1º ciclo de Avaliação Externa do PMAQ-AB. *Saúde debate*, Rio de Janeiro , v. 38, n. spe, p. 209-220, Oct. 2014 . Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-11042014000600209&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-11042014000600209&lng=en&nrm=iso)>. Access on 01 Oct. 2019. <http://dx.doi.org/10.5935/0103-1104.2014S016>.
- [6] Serra, Carlos Gonçalves; Rodrigues, Paulo Henrique de Almeida. Avaliação da referência e contrarreferência no Programa Saúde da Família na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Ciênc. saúde coletiva*, Rio de Janeiro. (Vol.. 15, supl. 3, pp. 3579-3586). Recuperado de: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-81232010000900033&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232010000900033&lng=en&nrm=iso).
- [7] Campos, Rosana Teresa Onocko et al. (2014). Avaliação da qualidade do acesso na atenção primária de uma grande cidade brasileira na perspectiva dos usuários. *Saúde em Debate* [online] (vol. 38, pp. 252-264). Recuperado de: <https://doi.org/10.5935/0103-1104.2014S019>.
- [8] ANGELINI, Rossana Aparecida Vieira Maia. A qualidade da educação no Brasil: um problema de metodologia?. *Rev. psicopedag.*, São Paulo , v. 23, n. 72, p. 213-220, 2006 . Disponível em <[http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84862006000300004&lng=pt&nrm=iso](http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84862006000300004&lng=pt&nrm=iso)>. acessos em 01 out. 2019.
- [9] SCHWARTZMAN, S. Os desafios na educação no Brasil. In: BROCK, C.; SCHWARTZMAN, S. (Org.). *Os desafios da educação no Brasil*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2005.
- [10] BAND. “MP apura falta de merenda quente em escolas no RJ”. 2016. Obtida em “<http://noticias.band.uol.com.br/cidades/rio/noticias/100000827894/mp-apura-falta-de-merenda-quente-em-escolas-no-rj.html>”. Acesso em: 12/12/2017.
- [11] G1. “Paciente é atendida no chão do IJF, maior hospital de Fortaleza”. Disponível em <http://g1.globo.com/ceara/noticia/2014/11/paciente-e-atendida-no-chao-do-ijf-maior-hospital-de-fortaleza.html>. 2014. Acesso em: 10/08/2016.
- [12] G1. Crianças estão sem merenda em escolas públicas de Bela Vista. (2017). Recuperado de: <http://g1.globo.com/ma/paranahao/noticia/2017/03/criancas-estao-sem-merenda-em-escolas-publicas-de-bela-vista.html>.
- [13] G1. Alunos da rede municipal de SP dizem estar proibidos de repetir merenda. (2017). Recuperado de: <https://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/alunos-da-rede-municipal-de-sp-dizem-estar-proibidos-de-repetir-merenda.ghtml>.
- [14] G1. Paciente precisa se enrolar em lençol por falta de roupa cirúrgica em hospital. (2017c). Recuperado de: <https://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/paciente-precisa-se-enrolar-em-lencol-por-falta-de-roupa-cirurgica-em-hospital.ghtml>.
- [15] PORTAL DA INDÚSTRIA. “90% dos brasileiros dizem que qualidade dos serviços públicos deveria ser melhor considerando o valor dos impostos”. 2016. Disponível em <http://www.portaldaindustria.com.br/agenciacni/noticias/2016/07/90-dos-brasileiros-dizem-que-qualidade-dos-servicos-publicos-deveria-ser-melhor-considerando-o-valor-dos-impostos-2/>. Acesso em: 22/09/2017.
- [16] R7. “Absurdo: paciente é atendido no chão em hospital no Amapá”. Disponível em <http://tv.r7.com/record-play/balanco-geral/videos/absurdo-paciente-e-atendido-no-chao-em-hospital-no-amapa-17102015>. 2013. Acesso em: 15/05/2017
- [17] Bloch, Carter. (2011). *Measuring Public Innovation in the Nordic Countries - Final Report*. Danish Agency for Science, Technology and Innovation. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/260793904\\_Measuring\\_Public\\_Innovation\\_in\\_the\\_Nordic\\_Countries\\_-\\_Final\\_Report](https://www.researchgate.net/publication/260793904_Measuring_Public_Innovation_in_the_Nordic_Countries_-_Final_Report).
- [18] MERGEL, I.; DESOUZA, K. C. Implementing open innovation in the public sector: The case of Challenge. gov. *Public Administration Review*, v. 73, n. 6, p. 882-890, 2013.
- [19] BOLÍVAR, M. P. R. (2017). Governance Models for the Delivery of Public Services Through the Web 2.0 Technologies: A Political View in Large Spanish Municipalities. *Social Science Computer Review*, 35(2), 203–225. <https://doi.org/10.1177/0894439315609919>

- [20] Classe, Tadeu Moreira; Araujo, Renata Mendes; Xexéo, Geraldo Bonorino. (2018). Jogos Digitais Baseados em Processos de Prestação de Serviços Públicos: Um Estudo Exploratório. *Acta Ludica International Journal of Game Studies*. (Vol. 2, nº 1). Recuperado de: <https://www.actaludica.com/ojs/index.php/actaludica/article/view/3/1>.
- [21] EB20-MC-10.205. (2015). Manual de Campanha - Comando e Controle. Ministério da Defesa, Exército Brasileiro, Estado-Maior do Exército. (1a Ed.). Brasil.
- [22] MD31-M-03. (2015). Doutrina para o Sistema Militar de Comando e Controle. Ministério da Defesa. Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas. (3ª Ed.). Brasil.
- [23] Osinga, Frans P. B. (2006). *Science, Strategy and War: The Strategic Theory of John Boyd*. Routledge Ed. First Edition.
- [24] ALBERTS, David S. *Information Age Transformation*. Command and Control Research Program (CCRP). Department of Defense US. 2002. Obtido em: [http://www.dodccrp.org/files/Alberts\\_IAT.pdf](http://www.dodccrp.org/files/Alberts_IAT.pdf).
- [25] DEKKER, A.H. (2001). Applying Social Network Analysis Concepts to Military C4ISR Architectures. *Connections*, the official journal of the International Network for Social Network Analysis, 24(3), 93–103.
- [26] ALSTON, Anthony; Beautement, Patrick; Dodd, Lorraine. *Implementing Edge Organizations Exploiting Complexity*. 2005 10th International Command and Control Research & Technology Symposium McLean, Virginia. June 2005. Disponível em: [http://www.dodccrp.org/events/10th\\_ICCRTS/CD/papers/107.pdf](http://www.dodccrp.org/events/10th_ICCRTS/CD/papers/107.pdf).
- [27] GRANT, T. J.; R. H. P. Janssen and H. Monsuur . *Network Topology in Command and Control: Organization, Operation, and Evolution*. IGI Global. 2014.
- [28] Nunes, João Paulo. (2007). Operações em Rede - Contributos para o seu estudo. *Air and Space Power Journal – ASJP (2º Trim)*. Air University. Força Aérea Portuguesa. Recuperado de: <http://www.airpower.au.af.mil/apj-international/apj-p/2007/2tri07/vicente.html>.
- [29] Monsuur, Herman & Janssen, Rene & Grant, Tim. (2014). *Network Topology in Command and Control. Organization, Operation, and Evolution*. IGI Global. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/269678422\\_Network\\_Topology\\_in\\_Command\\_and\\_Control\\_Organization\\_Operation\\_and\\_Evolution/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/269678422_Network_Topology_in_Command_and_Control_Organization_Operation_and_Evolution/citation/download).
- [30] AHMAD, Zalinah. *Public Service Delivery: Do We Need any Reforms? Religion, State and Society: Exploration of Southeast Asia*. Political Science Program. Department of Politics and Civics Education. Universitas Negeri Semarang. Chapter 6. p.86-91. 2017.
- [31] Robinson, Mark. *From Old Public Administration to the New Public Service - Implications for Public Sector Reform in Developing Countries*. UNDP Global Centre for Public Service Excellence. Singapore. 2015. Obtido em: [https://www.undp.org/content/dam/undp/library/capacity-development/English/Singapore%20Centre/PS-Reform\\_Paper.pdf](https://www.undp.org/content/dam/undp/library/capacity-development/English/Singapore%20Centre/PS-Reform_Paper.pdf).
- [32] MARTINS, H., “Organização Governamental: Demarcação Conceitual do Campo e Análise de Movimentos Recentes em Governos Estaduais”, *Revista ADM MADE*, ano 6 nº 3, 2008;
- [33] MARTINS, H. & Marini, C., Governança pública contemporânea – uma tentativa de dissecação conceitual”, *Revista do TCU*, edição nº 130, mai-ago 2014.
- [34] MARTINS, H. & Alcoforado, F., “Organização governamental - análise de movimentos recentes em governos estaduais” in: “Avanços e Perspectivas da Gestão Pública nos Estados II”. Consad, 2010.
- [35] STONER, James A. F. e FREEMAN, R. Edward. (1995). *Administração*. Rio de Janeiro: Prentice-Hall.
- [36] Shah, Anwar. (2005) *Public Service Delivery*. Public Sector Governance and Accountability Series. Anwar Shah, Series Editor. World Bank.
- [37] [37] BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil, 1988. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm/](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm/). Acesso em: 10 nov. 2016.
- [38] Woolcock, Michael. (2019). World Bank Research and Policy Briefs. No. 117146. World Bank - Development Research Group (DECRG); Harvard University - Kennedy School of Government.
- [39] Mbecke, Paulin. (2014). Operations and quality management for public service delivery improvement. *Journal of Governance and Regulation* (online). (Vol.3, pp. 36-45). Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/280226604\\_Operations\\_and\\_quality\\_management\\_for\\_public\\_service\\_delivery\\_improvement](https://www.researchgate.net/publication/280226604_Operations_and_quality_management_for_public_service_delivery_improvement).
- [40] Mergel, Ines. (2018). Open innovation in the public sector: drivers and barriers for the adoption of Challenge. *gov. Public Management Review*. (Vol. 20:5, pp. 726-745). Recuperado de: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/14719037.2017.1320044?needAccess=true>.
- [41] OECD. *Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities*. Oslo manual. 4th Edition. OECD. Publishing Luxembourg. / Eurostat. 2018), Disponível em: <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>.

- [42] Gault, F. (2012), "User innovation and the market", *Science and Public Policy*, Vol. 39/1, pp. 118-128.
- [43] BARBIERI, José Carlos; ÁLVARES, Antônio Carlos Teixeira Sixth Generation Innovation Model Description of a Success Model. *Revista de Administração e Inovação*, São Paulo, v. 13, n.2, p.88-112, abr./jun. 2016.
- [44] PAULA, F. D. O., SILVA, J. F. D. Balancing Internal and External R&D Strategies to Improve Innovation and Financial Performance. *Brazilian Administration Review*, 2018.
- [45] Lam, Alice. (2004). *Organizational Innovation*. The Oxford Handbook of Innovation. ed. Royal Holloway College, University of London.
- [46] Sousa, Maria. *Inovação Organizacional*. (2015). Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/270956623>.
- [47] OECD. *The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities, Proposed Guidelines for collecting and interpreting technological innovation data. OSLO manual*. Third edition. OECD. Publishing, Paris/Eurostat, 2005.
- [48] SZYMANSKA, Elzbieta. (2017) User-Driven Innovation – the Concept and Research Results. 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management *Procedia Engineering*. Volume 182, 2017, Pages 694-700. Volume 182, 2017, Pages 694-700. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313188>.
- [49] RAUTER, ROMANA; GLOBOCNIK, DIETFRIED, ELKE PERL-VORBACH, RUPERT J. BAUMGARTNER. Open innovation and its effects on economic and sustainability innovation performance. *Journal of Innovation & Knowledge*, Volume 4, Issue 4, 2019, pp. 226-233.
- [50] KOTSEMIR, M. N.; & MEISSNER, D. Conceptualizing the innovation process—trends and outlook. Working papers by NRU Higher School of Economics. Series WP BRP "Science, Technology and Innovation". No. 10/STI/2013. 2013.
- [51] Tripp, David. (2005). Action research: a methodological introduction. *Educ. Pesqui.*, São Paulo. (Vol. 31, n. 3, pp. 443-466). Recuperado de: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-97022005000300009&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-97022005000300009&lng=en&nrm=iso).
- [52] Mello, C. H. P., Turrioni, J. B., Xavier, A. F., & Campos, D. F. (2012). Pesquisa-ação na engenharia de produção: proposta de estruturação para sua condução. *Produção (online)*, (vol. 22, n. 1, pp. 1-13).
- [53] RUP. "Rational Unified Process". (1998). IBM Company. Recuperado de: [https://www.ibm.com/developerworks/rational/library/content/03July/1000/1251/1251\\_bestpractices\\_TP026B.pdf](https://www.ibm.com/developerworks/rational/library/content/03July/1000/1251/1251_bestpractices_TP026B.pdf).
- [54] Booch, G.; Rumbaugh, J.; Jacobson, I. "UML – Guia do Usuário, Rio de Janeiro. Ed. Campus. 2000.

# Engenharia Dirigida a Modelos Aplicada à Cognição de Rádios em Operações Militares

Marcus Albert Alves da Silva<sup>1\*</sup>, Gabriel Bozza<sup>1</sup>, Milena Mayara Ruy<sup>1</sup>, Cláudia Reis Cavalcanti<sup>1</sup>, David Fernandes Cruz Moura<sup>1</sup>, David Fernandes Cruz Moura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME)

<sup>2</sup>Universidade de Twente

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

\* m\_albert@ime.eb.br

**RESUMO:** O dinamismo do ambiente de comunicações militares faz dos rádios cognitivos uma alternativa promissora, em virtude de sua versatilidade para sensoriar o ambiente e mudar seu modo de operação de forma autônoma. Essas mudanças são baseadas em regras fundamentadas na doutrina militar e nas normas de telecomunicações, que podem mudar em função de alterações no cenário militar. A capacidade de reagir e se adaptar, com rapidez, às novas regras e condições é um diferencial que, em situações de guerra, pode evitar ou prevenir o fratricídio. Buscando atingir essa rapidez, esta pesquisa usou técnicas de engenharia dirigida a modelos, como Linguagens Específicas de Domínio (DSL) e transformações de modelos em código fonte aplicadas a rádios cognitivos, em operações militares. Estes conceitos foram aplicados em um estudo de caso, agilizando a atualização das regras e empregando uma estratégia de janelas deslizantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rádio Cognitivo. Operações militares. Engenharia Dirigida a Modelos. Linguagem Específica de Domínio.

**ABSTRACT:** The dynamic nature of the military communications environment makes cognitive radio a promising alternative due to its versatility in sensing the environment and changing its operation mode autonomously. These changes must be grounded in military doctrine and telecommunications standards, which may vary from different military scenarios. In war situations, quick reaction and adaptation to new rules and conditions are desirable to avoid or prevent fratricide. This research applies Model-Driven Engineering (MDE) techniques to achieve fast adaptation, by using Domain-Specific Languages (DSL) and source code model transformations applied to cognitive radios in military operations. In a study case, these concepts were applied, speeding up the update of rules and employing a sliding windows strategy.

**KEYWORDS:** Cognitive Radio. Military Operations. Model-Driven Engineering. Domain-Specific Language.

## 1. Introdução

Entre os diversos meios de comunicação usados nos sistemas de comunicações militares, o espectro eletromagnético é compartilhado por rádios, radares, sistemas de armas e outros tipos de dispositivos. Durante as operações militares, esses sistemas garantem a comunicabilidade entre o comando e a tropa, dando suporte aos sistemas de Comando e Controle (C2). A diversidade de tipos de operações pode exigir mudanças no comportamento dos meios de comunicação, considerando requisitos técnicos (qualidade do sinal, alcance, susceptibilidade a ruídos etc.) e táticos de uma operação (quando o rádio deve operar em baixa potência para evitar detecção inimiga). A combinação das capacidades do rádio definido por software (RDS) e do rádio cognitivo (RC) [1, 2] despontam como uma alternativa para atender às variações desses requisitos, com a agilidade requerida por um ambiente de guerra.

Até onde foi possível investigar, há estudos focados em agilizar a configuração do RDS em operações militares, porém, ainda sem contemplar a definição de regras para decisões autônomas do rádio cognitivo [3]. Por outro lado, outros trabalhos em áreas de gerenciamento de desastres [4], de urgências médicas envolvendo sensores de Internet das coisas [5] ou mesmo na área empresarial de negócios [6] indicam que o uso de Engenharia Dirigida a Modelos (MDE, do inglês *Model Driven Engineering*) poderia ser apropriado em ambientes que necessitam de agilidade na atualização de regras que definem ações a serem executadas.

Este trabalho propõe o uso de uma abordagem baseada em MDE como alternativa para agilizar a construção de regras que definirão o comportamento de rádios cognitivos em um sistema de comunicações militares. Neste contexto, foi desenvolvida uma linguagem específica de domínio (DSL, do inglês *Domain Specific Language*), que

facilita a descrição de regras, favorece a transformação de modelos e a geração automática de códigos. Neste ambiente experimental, as informações técnicas e táticas sensorizadas pelo equipamento foram submetidas às regras que definiram o modo de operação do rádio.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma revisão de literatura acerca de sistemas de comando e controle, comunicações nas operações militares, RDS, RC e MDE; a Seção 3 apresenta alguns trabalhos relacionados, indicando o potencial do emprego de MDE em sistemas de comunicações militares; a Seção 4 descreve um estudo de caso; em seguida, há as considerações finais e indicações de trabalhos futuros nas Seções 5 e 6, respectivamente.

## 2. Revisão de literatura

nesta seção, são tratados conceitos envolvendo as comunicações militares nas operações.

### 2.1 Operações militares

Operação militar é o nome dado ao conjunto de ações empregando forças e meios militares, coordenadas em tempo, espaço e finalidade, seguindo uma diretriz, plano ou ordem. Pode ocorrer em momentos de paz, guerra ou em situações de crise, sob a responsabilidade de uma autoridade militar [7]. Nas operações de guerra, há conflito armado e o poder militar se manifesta com uso de violência. Nas operações em momentos de paz, este poder é empregado em tarefas não relacionadas ao combate, exceto em circunstâncias especiais [8].

As operações militares podem ser classificadas quanto às forças empregadas e quanto à sua finalidade. Quanto ao emprego das forças, podem ser singulares (desenvolvidas por apenas uma força armada), conjuntas (empregam meios ponderáveis de mais de uma força singular) ou combinadas (composta de elementos ponderáveis de forças armadas multinacionais, sob um único comando).

Sob o viés finalístico, podem ser classificadas como básicas ou complementares [7]. As operações básicas, em situações de guerra, podem ser ofensivas, defensivas ou de cooperação e coordenação com

agências, estas últimas mais comuns em situações de paz. Já as complementares, possuem dezessete tipos diferentes de operações destinadas a ampliar, aperfeiçoar e/ou complementar as operações básicas. Não faz parte do escopo desse trabalho detalhar as diversas operações, porém cabe destacar que, para cada operação, há um conjunto de regras e restrições a serem adotadas pelos recursos de pessoal e de comunicações envolvidos, em consonância com o contexto e a doutrina militar em vigor. Em outras palavras, durante uma operação específica, um rádio pode ter que operar em determinada frequência, com baixa potência de sinal, por força contextual e da doutrina.

### 2.2 Sistemas de Comando e Controle (C2) e Sistemas de Comunicações

Os Sistemas de Comando e Controle (C2) formam um ambiente onde comandantes manifestam intenções de comando e executam ações para atingir objetivos, de forma controlada. Além disso, podem determinar funções e responsabilidades, bem como estabelecer regras e restrições ao contexto e aos elementos subordinados [9]. Essas ações caracterizam comportamentos definidos com base no entendimento ganho pelo monitoramento e pela avaliação do contexto do ambiente. A agilidade nesse entendimento é um fator relevante para o sucesso na tomada de decisões em tempo útil, podendo representar vantagem sobre o inimigo.

No Exército Brasileiro (EB), por meio do sistema C2 apoiado em sistemas de comunicações e informações, alinhados com a doutrina de emprego das comunicações [10], o comandante planeja, dirige e controla forças e operações [11].

Um Sistema de Comunicações é uma malha de dispositivos desdobrada em uma zona de ação para atender aos elementos de um escalão. Tal estrutura possibilita o fluxo de dados, voz e imagens por uma rede de centros nodais interconectados por diversos meios de comunicação. Considerando o rádio como meio de comunicação, diferentes formas de enlace podem ser empregadas, como por satélite, micro-ondas em visada direta ou tropodifusão, utilizando diferentes formas de onda.

A doutrina militar [10] define os meios, as formas de operação e o emprego dos recursos de comunicações. Tais condições e circunstâncias podem envolver questões táticas, doutrinárias e fisiográficas, além de limitações técnicas e o papel de cada equipamento nas operações.

Em sistemas de comunicações militares, o alcance, a capacidade e a mobilidade são fatores relevantes [12], que compõem o chamado Triângulo de Compensação, que é uma forma simples de avaliar a pertinência do emprego de um meio de comunicação.

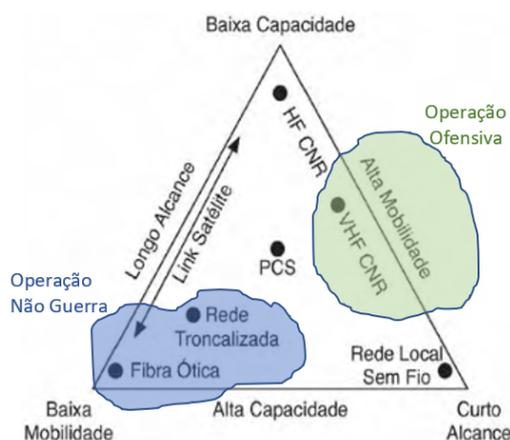
Na Tabela 1, em cada operação de exemplo (ofensiva e não guerra), a tecnologia a ser empregada varia em função dos requisitos definidos, doutrinariamente, para cada um dos fatores associados aos equipamentos de comunicações utilizados.

**Tabela 1** - Fatores do Triângulo da Compensação aplicados a Subsistemas.

Subsistema	Rádio 1	Rádio 2
<b>Operação</b>	Ofensiva	Não Guerra
<b>Alcance</b>	Médio	Alto
<b>Mobilidade</b>	Alta	Baixa
<b>Capacidade</b>	Média	Alta
<b>Tecnologia</b>	VHF	Rede Troncalizada

Considerando os requisitos de cada operação, descritos na Tabela 1, elas são representadas no triângulo de compensação, conforme mostra a Figura 1.

**Figura 1** - Triângulo de Compensação, Adaptado de [12]



Tecnologias como a dos rádios definidos por softwares e dos rádios cognitivos são apropriadas a essas variações de requisitos.

### 2.3 Rádio Definido por Software (RDS)

Um RDS é um tipo de rádio cuja maior parte dos componentes físicos são construídos por meio de software [1, 2], podendo usar máquinas virtuais e agentes inteligentes [13]. Ele é considerado uma evolução dos rádios tradicionais, em que funções como modulação, demodulação e filtragens podem ser implementadas por software e não por hardware. Reconfigurabilidade, flexibilidade e modularidade são características marcantes do RDS, que pode ser reconfigurado sem alterações no hardware [14].

Essas possibilidades tornam os sistemas de comunicação capazes de operar em mais de um modo, com diferentes formas de onda, com o mesmo hardware [15]. Uma forma de onda carrega desde informações que descrevem mecanismos de segurança na transmissão de dados, codificação de fonte (voz, imagem e compressão de vídeo), até mecanismos de retransmissão e técnicas de modulação e demodulação, entre outras funcionalidades [16].

### 2.4 Rádio Cognitivo (RC)

Um rádio cognitivo (RC) é um RDS capaz de sensoriar o ambiente, mudar suas características e seu funcionamento, podendo adaptar sua operação para atingir objetivos como melhoria de desempenho, economia de energia e adequação às condições operacionais no local em que está inserido [2, 15]. O RC também é capaz de aprender com o comportamento passado, empregando técnicas de aprendizado de máquina, buscando melhorar seu funcionamento ao longo do tempo de operação, análogo ao que um humano faria [17].

Segundo Doyle [18], o RC é um dispositivo que percebe entradas ou visões do mundo real e, a partir do entendimento delas, toma decisões autônomas, podendo autoconfigurar-se para tarefas de comunicações. Este tipo de entendimento é dividido em quatro

áreas principais: ambiente; requisitos de comunicações; políticas, regras e doutrinas; e as próprias capacidades do rádio.

O entendimento do ambiente se caracteriza pela correta detecção e decodificação dos sinais que são captados pela antena, bem como pelo conhecimento da operação em que se está inserido e o seu papel nela.

Os requisitos de comunicações estão ligados a quais capacidades o equipamento deve ter para atender às demandas dos sistemas de comunicações (qualidade de serviço, nível de ruído tolerado etc.)

As políticas e as regras envolvem tanto normas para exploração e uso do espectro eletromagnético, como manuais de doutrina militar de comunicações [12].

Conhecer as próprias capacidades significa saber os limites de percepção e de operação do equipamento, tais como potência máxima ou formas de onda sensoriadas ou transmitidas.

Diferentes tipos de métodos cognitivos podem ser aplicados aos rádios cognitivos, alguns baseados em modelos matemáticos ou em algoritmos de aprendizado de máquina apresentados por Xu et al [19] poderiam ser adequados a definições de comportamentos do rádio ligadas a questões técnicas, como economia de energia, redução de níveis de ruído, entre outras. Por outro lado, quando a decisão se baseia em regras doutrinárias rígidas, seriam apropriados modelos baseados em regras [19], cujas estruturas de conhecimento, tais como tabelas e árvores de decisão, são desejáveis.

## 2.5 Engenharia Dirigida a Modelos

No contexto da engenharia de software, um modelo é uma forma de representação gráfica ou textual de um sistema, em que as abstrações e os relacionamentos empregados são descritos por um metamodelo [20].

Modelos são úteis em um projeto de software, por possibilitarem a todos os envolvidos, sejam eles da área técnica ou não, uma visão concreta, clara e comum do sistema a ser projetado [21].

A engenharia dirigida a modelos (MDE) emprega metodologias que os concebem como artefatos elementares no processo de desenvolvimento de software e

não apenas como documentação de um projeto [21]. Em outras palavras, o modelo é parte constituinte do sistema e, mesmo passando por transformações, estará sempre alinhado com a implementação física dele.

Comparando MDE com abordagens como a programação estruturada e a programação orientada a objetos, observa-se maior simplicidade na propagação de mudanças. Essa característica se justifica pela geração automática de código executável a partir dos modelos do sistema, por meio do uso combinado de técnicas de meta-modelagem e transformações entre modelos (M2M) e de modelo para texto (M2T) [21].

As transformações *Modelo-para-Modelo* permitem a transformação de um modelo em outro, normalmente para um nível de abstração menor do que o original, ou simplesmente para que o novo modelo seja mais conveniente aos envolvidos no projeto. Já as transformações *Modelo-para-Texto* geram, a partir dos modelos, artefatos de software, por meio de uma técnica chamada geração de código. A definição de uma linguagem específica de domínio (DSL) possibilita o uso de transformações M2T.

Uma DSL é criada especificamente para um determinado domínio de aplicação, como linguagens usadas para fazer procuras em bancos de dados (CSQC) ou linguagens que marcam textos para apresentação na Web (HTML). Este tipo de linguagem é próximo ao universo de entendimento dos usuários do domínio, contribuindo com a agilidade no processo de construção deste nível de abstração.

## 3. TRABALHOS RELACIONADOS

Aproveitando as características dos rádios definidos por software, em [3] os autores propõem uma ferramenta que facilita a configuração dos equipamentos de rádio que irão participar de uma operação militar. Nesse caso, diferentes configurações elaboradas por software podem ser distribuídas a cada equipamento, usando um arquivo padrão de configuração, entretanto, sem explorar o uso de um método de cognição no rádio, possibilitando mudanças no funcionamento, a partir do entendimento do ambiente e definições prévias de planejamento.

Por outro lado, trabalhos com foco em contextos de apoio à decisão aplicaram MDE em ambientes de complexidade similar ao cenário de comunicações nas operações militares, como na detecção de fraudes bancárias, segurança e saúde pública, gestão de catástrofes, entre outras. Nestes ambientes, o tempo de entendimento das informações observadas também é um fator importante. Além disso, o modelo cognitivo é baseado em regras que podem classificar e identificar as situações percebidas, podendo gerar entendimento sobre o ambiente e apoiar a tomada de decisões.

O trabalho de Costa et al. [22] apresenta um cenário onde o sistema é capaz de identificar situações e reagir ao ambiente que está inserido. Neste contexto, uma DSL aplicada à descrição de situações do mundo real (SML, do inglês *Situation Modeling Language*) serve de base para a construção de um conjunto de regras que são executadas em uma plataforma de software centralizada, baseada em regras (DROOLS). Esta plataforma permite a análise dos dados coletados no ambiente em uma janela temporal de observação. A fim de validar a proposta, foi realizado um estudo de caso com foco na detecção de possíveis fraudes bancárias em um sistema de banco móvel. A pesquisa de Moreira et al. [4], direcionada à gestão de desastres e de emergências, usa MDE na conversão de textos expressos em SML (mesma utilizada por Costa et al. [22]), em regras processáveis em código executável. Além disso, também aborda a questão da interoperabilidade de dados, justificada pela interação entre os agentes envolvidos. O uso de ontologias é apontado como uma alternativa favorável na modelagem conceitual, em aplicações baseadas em consciência situacional.

No livro de Brambilla [23], é apresentada uma DSL usada especificamente para favorecer a interação com usuários no desenvolvimento de aplicações de software.

Soleymanzadeh et al.[24] criaram um ambiente gráfico para facilitar o entendimento dos usuários do domínio na construção de regras de negócio a serem atendidas por uma aplicação. O trabalho aplica técnicas de MDE na tradução das regras criadas para a estrutura mais próxima ao domínio de aplicação. Além disso, foi realizado um estudo de caso na área de cobranças de honorários advocatícios.

Neste contexto, a abordagem MDE tem demonstrado boas possibilidades de utilização na conversão de modelos e no uso e desenvolvimento de linguagens específicas de domínio que podem auxiliar o entendimento do usuário que irá inserir as regras de negócio. Essas iniciativas demonstram que o uso de uma DSL pode favorecer a agilidade na elaboração de regras. Contudo, ainda não foram observados trabalhos aplicados a rádios cognitivos, em proveito da agilidade na construção e configuração de regras aplicáveis aos dados sensorizados. Além disso, as abordagens até então avaliadas também não tratam regras concorrentes ou estabelecem prioridades para elas.

## 4. Modelando regras em sistemas de rádios cognitivos

este trabalho apresenta uma abordagem baseada em MDE para agilizar a construção de regras de comportamento de rádios cognitivos em um sistema de comunicações militares. Estas regras serão transformadas em código inteligível pelo equipamento e, a partir delas, o rádio poderá mudar o seu próprio comportamento (modo de operação) caso haja variações significativas do ambiente que possam ser percebidas e entendidas por ele.

Inicialmente, será descrito um pequeno cenário hipotético, demonstrando rádios cognitivos atuando em operações militares, empregando modos de operação variados.

No cenário descrito pelo diagrama de sequência da Figura 2, temos três rádios envolvidos em duas operações (A e B). Na operação A temos os rádios do comandante da operação e de um operador, enquanto na operação B temos apenas o rádio do comandante da operação.

Neste ambiente, três modos de operação são usados: 1- o modo Silêncio (*SilentMode*), em que o equipamento está ligado, porém não emite nenhum sinal; 2 - o modo VHF de baixa potência (modo normal); e 3 - o modo VHF de baixa potência FD. Neste último, a sigla FD significa que o equipamento pode operar no modo In-band Full Duplex, no qual o rádio transmite e recebe na mesma frequência de forma simultânea, produzindo uma interferência sobre seu próprio sinal e aumentando a segurança na camada física [8].

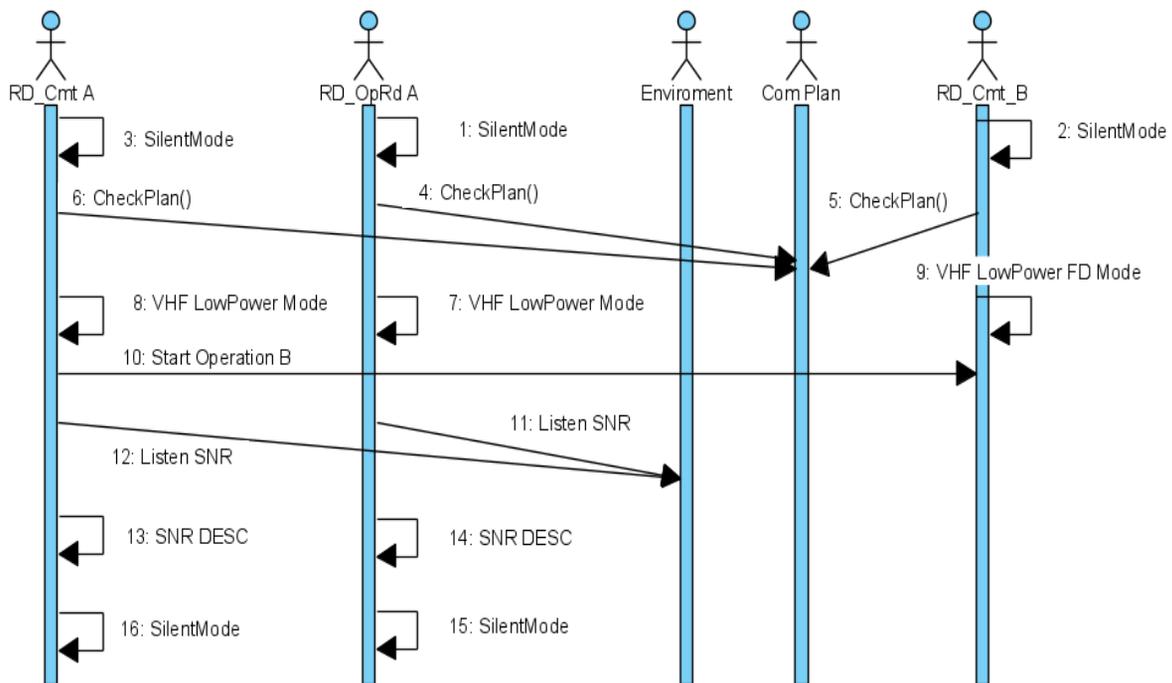
O plano de comunicações (*Com Plan*), acessado pelos rádios, contém detalhes sobre as operações nas quais os equipamentos participam. Ele descreve o tipo da operação, o papel do rádio e suas possibilidades.

A partir das leituras do nível de sinal e do nível de ruído presentes no ambiente, pode ser estabelecida a relação sinal ruído (SNR, do inglês “*Signal-to-Noise Ratio*”), ou seja, a relação entre o nível de sinal recebido e o nível de ruído percebido no ambiente eletromagnético. Uma queda em SNR pode ser ocasionada

por uma baixa no nível de sinal recebido ou pelo aumento do nível de ruído percebido.

O ambiente eletromagnético (*Environment*) ilustra a ação de sensoriamento do ambiente executada pelos rádios. Inicialmente, todos funcionam em modo silêncio. Em seguida, uma aplicação de checagem de plano de comunicações é executada e informações como nível de segurança (*Security Level*), que depende da criticidade da operação [25], papel do equipamento na operação (*Operational Role*), frequência do canal utilizado (*Carrier Frequency*), entre outras podem ser coletadas.

**Figura 2** - As comunicações nas operações



A partir destas informações, o rádio poderá definir seu modo de operação, em conjunto com regras pré-definidas. Nesse exemplo, o modo definido foi o VHF baixa potência. Na sequência, mensagens são trocadas entre os equipamentos rádio dos Cmt das operações (RD\_Cmt\_A e RD\_Cmt\_B). Além disso, os equipamentos da operação A verificam o ambiente e percebem que a relação SNR apresenta um decréscimo (SNR DESC), ou seja, houve uma perda

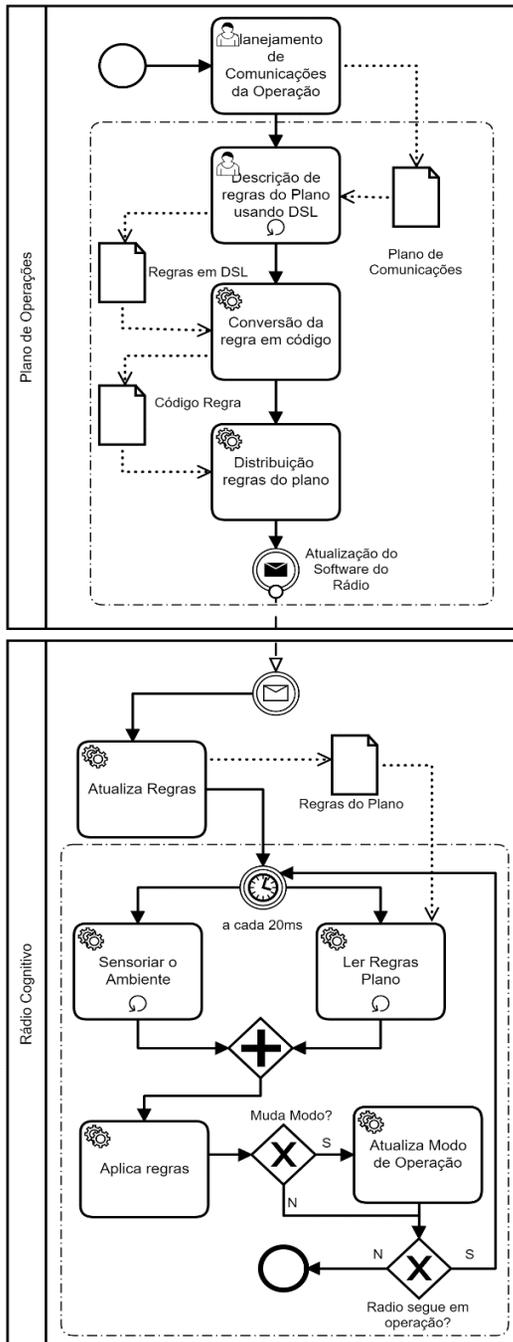
na qualidade do sinal recebido. Nesse caso, a regra define que há mudança no modo de operação, e passa-se a operar no modo VHF baixa potência FD.

Podemos classificar esse tipo de mudança como técnica, pois tiveram o objetivo de melhorar a qualidade das comunicações. Por outro lado, poderiam ter sido motivadas por questões táticas, como a preparação para um ataque, em que poderia ser estabelecido o modo silêncio, caracterizando uma mudança tática.

## 4.1 Visão Geral e Escopo da Pesquisa

Por meio da notação BPMN<sup>1</sup>, a Figura 3 apresenta uma visão geral da abordagem que estamos propondo neste trabalho, destacando tarefas e alguns resultados produzidos em cada uma das etapas.

**Figura 3 - Visão Geral da Abordagem**



1 BPMN- do ingles Business Process Model and Notation [26]

Duas swimlanes da notação BPMN estão representadas, de forma que uma delas represente um sistema dedicado ao planejamento de comunicações, no qual o oficial de comunicações elabora o plano de comunicações que irá determinar o comportamento do rádio cognitivo.

Uma vez definidas as configurações e regras no Plano de Comunicações, as regras serão descritas por meio de uma linguagem DSL especialmente concebida para esse contexto. As regras expressas são convertidas em código de uma linguagem de programação compatível com o software e a plataforma de hardware do rádio cognitivo. Nesse momento, os rádios precisam ser “atualizados” com o novo código, para que as regras passem a valer e determinar o seu comportamento durante a operação. Ao entrar em operação, o rádio cognitivo, de maneira cíclica, sensoria o ambiente e lê o plano de comunicações, além de aplicar as regras e, conforme o caso, mudar o seu modo de operação.

As partes tracejadas da Figura 3 indicam o escopo do que foi implementado neste trabalho. No sistema de planejamento foram aplicadas técnicas baseadas em MDE, e no rádio cognitivo foi feita uma simulação do sensoriamento do ambiente, da leitura do plano e da aplicação das regras e da definição do modo de operação, de forma autônoma.

Vale notar que o conjunto de regras pode ser alterado, e o esquema proposto pode facilitar a realização de alterações de modo ágil.

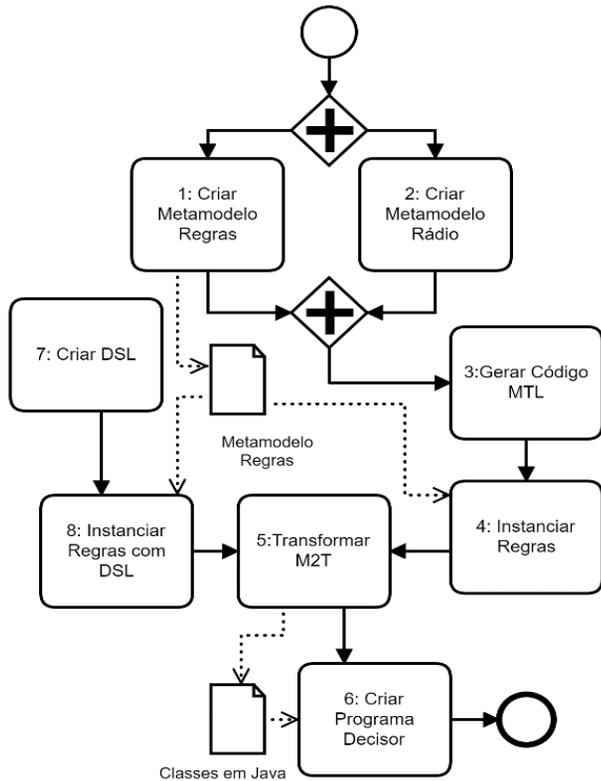
Neste trabalho, como alternativa de validação, um estudo de caso simulou o sensoriamento do ambiente e a aplicação das regras, definindo o modo de operação do rádio.

## 4.2 Metodologia aplicada

A Figura 4 descreve os procedimentos metodológicos deste trabalho, em que foram desenvolvidos um metamodelo descrevendo um rádio cognitivo em um ambiente operacional (passo 1) e um metamodelo descrevendo a estrutura de formação e construção de regras que determinam o modo de operação do rádio (passo 2).

Em seguida, foi desenvolvido um modelo (*template*) de código em linguagem de transformação MTL, baseado no metamodelo de formação das regras (passo 3).

Figura 4 - Metodologia aplicada



Após esta etapa, foram instanciadas regras, com base no metamodelo do *template* (passo 4).

A partir do modelo de código e das instâncias de regras criadas, foi usada a ferramenta de transformação M2T para a geração automática de uma classe em linguagem Java para cada uma das regras (passo 5), com base no *template* desenvolvido. Na última etapa, as classes de todas as regras geradas são inseridas em um programa decisor em linguagem Java. Nesse momento, está pronto o artefato final do trabalho, ou seja, o programa decisor executável (passo 6).

A fim de tornar o processo de elaboração das regras mais simples e ágil para o usuário, diferente do uso do *template* gerado no passo 3, foi desenvolvida uma DSL, ou seja, foi criada uma linguagem específica de domínio (passo 7), que pode ser utilizada para uma representação mais compacta das regras (passo 8).

### 4.3 Metamodelagens

O metamodelo da Figura 5 representa, de forma simples, alguns conceitos de um rádio cognitivo e de

um plano de comunicações. Além disso, representa os elementos envolvidos na operação do rádio cognitivo. A classe *Transceiver* corresponde ao equipamento rádio. Já a classe *Environment* exprime o ambiente que o rádio consegue sensoriar, isto é, sinais e ruídos, além de derivar a relação sinal/ruído (SNR). A classe *Communication Plan* representa o plano de comunicações de uma dada operação em que o rádio está inserido. O plano informa a frequência da portadora do sinal (*Carrier Frequency*), o papel do operador do rádio (*Operational role*), que pode ser “comandante” ou “soldado”, e o nível de segurança da operação em andamento (*Security Level*).

Além disso, o plano inclui um conjunto de regras que determinam a operação do rádio. Por exemplo, pode conter uma regra que diz que se a SNR é decrescente, então o modo de operação deve ser alterado. Por simplificação, as regras não foram representadas nesse metamodelo, mas em um outro, apresentado na Figura 6.

A classe *LogEntry* representa a coleta das informações do ambiente e do plano de comunicações a cada instante no tempo. Cada instância da *LogEntry* contém a SNR, o *Security Level*, a *CarrierFrequency* e o *OperationalRole*. Por fim, a classe *Log* funciona como uma janela deslizante, que coleciona as leituras mais recentes (por exemplo, as três últimas) de *LogEntry*. Com base nessas leituras, o rádio cognitivo (*Transceiver*) deve consultar as regras do Plano de comunicações para verificar se deve mudar o seu modo de operação.

Nesta regra composta, operadores e operandos se conectam, definindo um modo de operação para o rádio.

O valor de SNR e os últimos valores observados dos demais conceitos presentes no *Log*. (os dados mais recentes percebidos) são a base para a descrição das regras e decisão do rádio.

Motivado pelos modelos baseados em regras de Xu et al [19] e inspirado na iniciativa de Costa et. al. [22] e pelo trabalho de Horrocks et.al.[27], um conjunto de regras (*ruleSet*) foi elaborado, e pode ser composto por uma única ou muitas regras. Cada uma delas (*rule*) possui um identificador (*IDENTIFIER*) e uma prioridade. Além disso é composta por um único antecedente (*LeftSide*) e um único consequente

(*RightSide*). O lado esquerdo da regra é composto por expressões, que podem ser simples (*SimpleExp*) ou compostas (*CompoundExp*). Cada tipo de expressão possui seu(s) operando(s) (*operand*) e operadores, que podem ser matemáticos, lógicos ou de comparação. Os operandos podem ser atributos ou valores.

Figura 5 - Metamodelo do rádio cognitivo

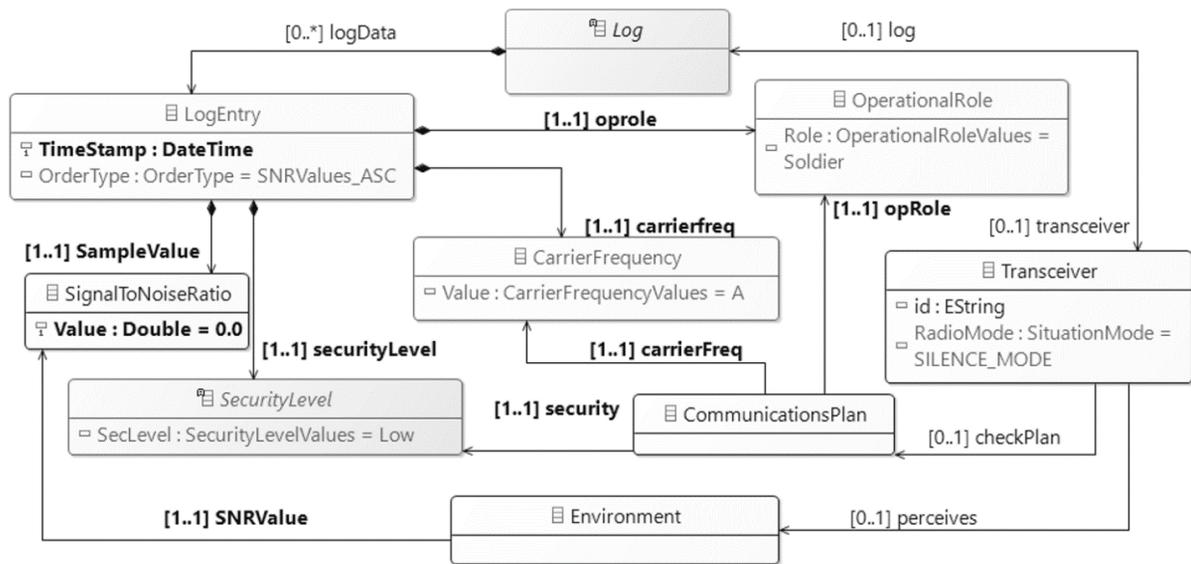
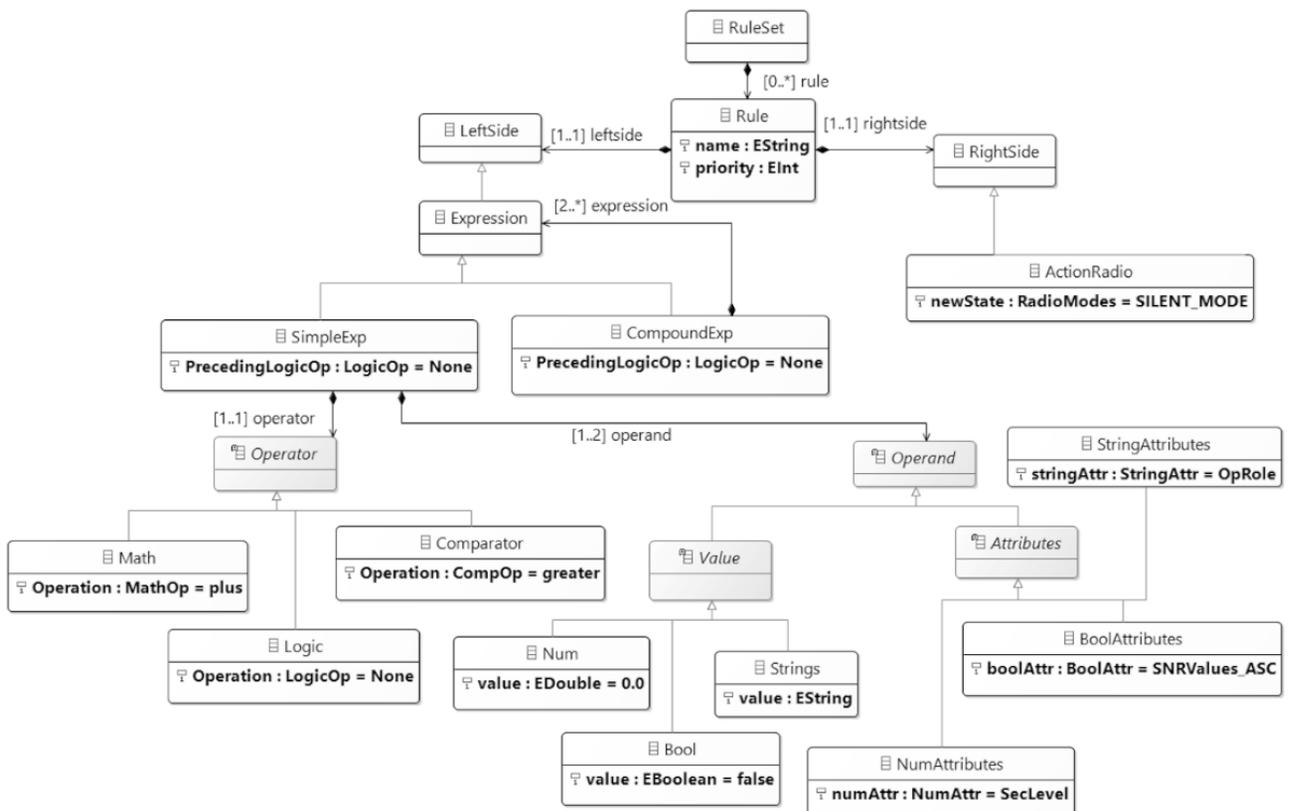


Figura 6 - Metamodelo de construção de regras



O metamodelo descrito na Figura 6 representa a maneira como as regras são estruturadas. Com base nesse modelo, foi desenvolvida uma pequena gramática, representada na Figura 7, empregando o formalismo da representação Backus-Naur Form (BNF).

**Figura 7** - Recorte de gramática em BNF

```

<rule> ::= "{ " priority, <leftSide> "→"
<rightSide> "}"
priority ::= ([0.0-1.0]+)
<rightSide> ::= "normal" | "padrão FD" |
"silêncio" | "alerta"
<leftSide> ::= <expression>
<expression> ::= <simpleExp> | <compoundExp>
<compoundExp> ::= ( <expression> , <expression>
>+ \, )
<simpleExp> ::= <Boolean> <expr>
<boolean> ::= True | False | |ε|
<expr> ::= <operand> | "(" <operand> <operator>
<operand> ")"
<operand> ::= <value> | <attribute>
<operator> ::= <math> | <logic> | <comparator> |
<Math> ::= "+" | "-" | "*" | "/"
<logic> ::= "AND" | "OR" | "NOT" | "NAND" |
"NOR" | "NXOR" | "XOR"
<comparator> ::= "=" | "<" | ">" | "!="
<value> ::= <number> | <string> | <boolean>
<number> ::= (^ \d*[0-9](\.\d*[0-9])? \$)
<string> ::= ([A-Za-z][A-Za-z0-9]*)
<attribute> ::= <numAttribute>
| <stringAttribute> | <boolAttribute>
<numAttribute> ::= "securityLevel" |
"carrierFrequency"
<stringAttribute> ::= "sampleValue" | "operationalRole"
    
```

Em nosso exemplo, representamos o universo de atributos que pertencem ao modelo do rádio cognitivo apresentado na Figura 5, que participam de nosso caso de uso.

A regra (1) demonstra um possível emprego dessa gramática na construção de regras no domínio de rádios cognitivos.

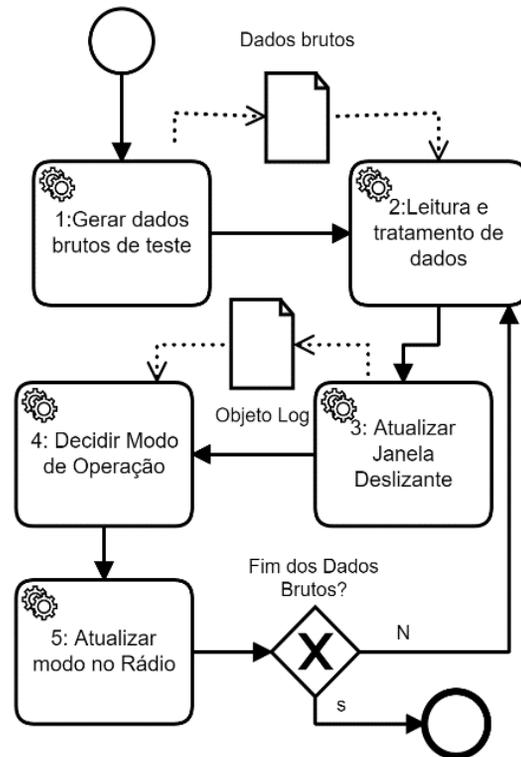
$$\{0,2 \text{ True (True(sampleValue = "DESC") AND True (securityLevel < 0.5) AND False(carrierFrequency = 100.0) AND (operationalRole = "soldier"))} \rightarrow \text{normal}\} \quad (1)$$

Quando uma regra é criada, ela recebe um valor único de prioridade entre 0 e 1, sendo 1 (um) a prioridade mais alta. Neste caso, a prioridade é apenas uma estratégia simplificada de lidar com possíveis regras concorrentes, em que duas ou mais regras poderiam estar sendo atendidas simultaneamente.

## 5. Estudo de Caso

Este estudo de caso verifica a viabilidade da abordagem descrita na Seção 4. Conforme a Figura 8, um arquivo de dados bruto é gerado a partir de um programa gerador de arquivos de teste, que simula leituras de informações do ambiente eletromagnético e do plano de comunicações, com intervalos de 20 milissegundos, simulando um ciclo de sensoriamento do ambiente em um rádio real (passo 1) [28].

**Figura 8** - Etapas do Processo de simulação/testes



A partir desses dados, um outro programa lê, valida (passo 2) e instancia-os numa classe chamada Log, que representa um conjunto de amostragens do ambiente sensoriado ou percebido pelo dispositivo em cada leitura simulada (passo 3). Na etapa seguinte

(passo 4), o programa decisor aplica as regras que foram construídas por meio uma DSL, resultando numa decisão que pode determinar um novo modo de operação para o rádio (passo 5).

A Tabela 2 é uma tabela de decisão, que representa a estrutura de conhecimento que descreve as regras que foram simuladas no experimento, representando àquelas ligadas à doutrina de comunicações militares.

**Tabela 2** - Simulando Regras da doutrina militar.

Tipo	Objeto	Atributo	Domínio	ST_1	ST_2	ST_3	ST_4	ST_5	ST_6	ST_7
Entrada	Sample Signal	Sample Value	ASC	true		true		true		false
			DESC		true		true		true	false
		Security level	>=0,5	true			true			
		< 0,5		true	true					
	transceiver	Carrier Frequency	50MHz		true			true		
			100MHz			true	true			
Operational Role		Cmt		true		true				
		Soldado			true		true			
Saída	Modo Tx	normal								
		padrão FD								
		Silêncio								
		Alerta								
		Sit_Ant								

Tomando como exemplo a regra determinada pelo contexto ST\_1 da Tabela 2 (coluna ST\_1), caso a tendência dos últimos três valores do SNR recebido seja ascendente (ou seja, o valor SNR dos últimos três instantes percebidos esteja aumentando), o nível de segurança do canal seja maior ou igual a um limiar (0,5 nesse caso), a frequência de transmissão seja de 50 MHz e o “papal operacional” do rádio em questão seja o de comandante (“Cmt”), o modo de operação a ser utilizado no equipamento será o modo silêncio.

Durante o experimento, foi utilizada a IDE Eclipse, empregando o Eclipse Modeling Framework (EMF). No desenvolvimento das metamodelagens, foi utilizada a extensão Sirius do Eclipse. Na etapa de transformação M2T de modelo para um programa em Java, foi usada a ferramenta Aceleo.

A interface de construção de regras não é trivial para um usuário sem experiência em programação. Para simplificar o processo de instanciação do metamodelo das regras, a ferramenta Xtext [29] foi utilizada para a geração e edição de uma DSL. Esta DSL possibilita que usuário instancie as regras dos rádios sem precisar conhecer nenhuma linguagem de

programação, escrevendo as regras de uma maneira simples. A Figura 9 mostra um fragmento de código, demonstrando a descrição de duas regras na DSL. A *Rule\_ST1* tem prioridade 1 e descreve as condicionantes para o modo silêncio (*Silent Mode*).

**Figura 9** - Fragmento de uso da DSL

```
RuleSet{
  Rule 'Rule_ST1' {
    priority = 1
    rule = [_ (SNRValues_ASC=true) and [_ (SecurityLevel>=0.5)
      and(CarrierFrequency=50.0)and(OperationalRole="Cmt")]]
    --> SILENT_MODE
  },
  Rule 'Rule_ST2' {
    priority = 2
    rule = [_ (SNRValues_DESC=true) and [_ (SecurityLevel<0.5) and
      (CarrierFrequency=100.0)and(OperationalRole="Soldier")]]
    --> NORMAL_MODE
  },
}
```

### 5.1 Resultados obtidos

A Figura 10 mostra um pequeno fragmento do log de entrada, onde são simulados os dados que seriam sensorizados. Cada linha representa valores do ambiente num instante no tempo.

**Figura 10** - Log de entrada

Data hora	SampleValue	CarrierFrequency	SecurityLevel	OperationalRole
2021-03-29T10:42:44.458	5	50	0.1	cmt
2021-03-29T10:42:44.542	7	50	0.2	soldier
2021-03-29T10:42:44.563	5	100	0.7	cmt
2021-03-29T10:42:44.585	2	100	0.3	soldier
2021-03-29T10:42:44.606	2	50	0.4	soldier
2021-03-29T10:42:44.629	4	50	0.5	cmt

Após a execução das regras, um arquivo de log de saída é gerado, registrando todos os dados sensorizados e cada decisão tomada com base na aplicação das regras sobre os dados contidos na janela deslizante das três últimas observações do ambiente. Conforme mostra a Figura 11, no início da execução, enquanto a janela ainda não estiver preenchida, o modo de operação do equipamento será sempre o modo silêncio.

**Figura 11** - Log de saída

Janela Completa	Janela Incompleta
2021-03-29T10:42:44.458 5 50 0.1 cmt	Initial Mode: SILENT Mode
2021-03-29T10:42:44.542 7 50 0.2 soldier	Initial Mode: SILENT Mode
2021-03-29T10:42:44.563 5 100 0.7 cmt	Modo Inicial
5.0 7.0 5.0 → (!Asc ^ ! Desc)	MANTEM_Mode 04:23:21.882
-----04:23:21.788	ST_7
2021-03-29T10:42:44.585 2 100 0.3 soldier	NORMAL Mode 04:23:21.883
7.0 5.0 2.0 → (Desc)	ST_2
-----04:23:21.882	
2021-03-29T10:42:44.606 2 50 0.4 soldier	
5.0 2.0 2.0	

Quando a janela é preenchida, as regras passam a ser aplicadas, ou seja, são verificados os três últimos valores de *sampleValue* para identificar se são ascendentes (ASC) ou descendentes (DESC), juntamente com os demais valores da leitura mais recente. Também é possível observar as mudanças no modo de operação, nos momentos em que são atendidas as regras ST\_7, que mantém o modo atual (Silent Mode), e ST\_2, que muda para o modo *Normal mode*.

## 6. Considerações finais

A diversidade de tipos de operações militares exige dinamismo nas mudanças de comportamento dos meios de comunicação. Os rádios cognitivos são uma

alternativa promissora, podendo adequar seu funcionamento às necessidades técnicas e táticas das operações.

Este trabalho apresentou uma alternativa capaz de apoiar as variações de requisitos de comunicações durante as operações de maneira ágil. Neste experimento, foi simulado apenas um equipamento operando em uma única operação, porém foi possível verificar suas variações de comportamento, com base em regras técnicas e táticas. A partir deste experimento inicial, a modelagem poderá ser estendida a um universo compatível com uma operação real. A descrição de regras empregando DSL, bem como as transformações de modelos e geração automática de códigos podem contribuir com a agilidade nas atualizações, além de manter o alinhamento entre a implementação física e o modelo conceitual.

Como contribuições, pode-se destacar a metodologia proposta que viabiliza a replicação deste experimento. O uso de uma janela de observação deslizante pode reduzir a quantidade de dados a ser processada, consumindo menos recursos computacionais, visto que o rádio apresenta poder computacional limitado. Indiretamente, a economia de recursos na tarefa de decisão disponibilizará mais recursos para tarefas que podem ser executadas por algoritmos de aprendizado de máquina.

Até onde foi possível observar, muitos trabalhos já fizeram uso de DSL e transformações automatizadas de código em ambientes que demandam urgência, contudo, não eram consideradas as particularidades do ambiente de comunicações militares e do domínio de rádios cognitivos.

Os rádios cognitivos podem ser parte de sistemas de comando e controle, que operam de maneira integrada. Neste contexto, a interoperabilidade entre sistemas é uma necessidade e ambiguidades no entendimento dos conceitos devem ser evitadas. Uma falha no entendimento de um conceito pode representar erro na construção de regras que envolvem os sistemas de comunicações, provocando funcionamento indesejado dos equipamentos durante uma operação e ocasionando, em alguns casos, o fratricídio.

Alguns trabalhos [4, 22] indicam que o uso de ontologias pode favorecer a interoperabilidade sintática e semântica entre os diversos sistemas. Neste sentido,

a interoperabilidade baseada em ontologias será explorada nas próximas etapas desta pesquisa, além de uma possível integração com o planejador de missões proposto por Souza et al. [3]

O foco deste trabalho é o benefício do uso da linguagem pelo usuário final, agilizando o processo decisório e reduzindo as necessidades de conhecimentos em linguagens de programação. Recomenda-se como trabalhos futuros o emprego dessa metodologia em

sistemas para avaliação de desempenho e de mecanismos de tratamento de erros.

## Agradecimentos

Agradecimentos à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) pelo apoio ao Projeto S2C2, convênio Nr Ref. 2904/20, contrato no 01.20.0272.00, assinado em 30/12/2020 e publicado no DOU edição no16, seção 3, página7, de 25 de janeiro de 2021.

## Referências

- [1] MITOLA, J. The software radio architecture. *IEEE Communications Magazine*, v. 33, n. 5, p. 26-38, 1995. doi: 10.1109/35.393001.
- [2] MITOLA, J.; MAGUIRE, G. Q. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, v. 6, n. 4, p. 13-18, 1999. doi: 10.1109/98.788210.
- [3] OUZA, V.; NAPOLITANO, F.; DIAS, M. Planejador de Missões do Rádio Definido por Software do Ministério da Defesa. In: *Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, 21., São José dos Campos: Sige, 2019.
- [4] MOREIRA, J. L. R.; PIRES, L. F.; VAN SINDEREN, M.; COSTA, P. D. Towards ontology-driven situation-aware disaster management. *Applied Ontology*, v. 10, n. 3-4, p. 339-353, 2015. doi: 10.3233/AO-150155.
- [5] MOREIRA, J. L. R.; PIRES, L. F.; VAN SINDEREN, M.; DANIELE, L., SAREF4health: IoT Standard-Based Ontology-Driven Healthcare Systems. In: *Formal Ontology in Information Systems – Proceedings of the International Conference*, 10. Cape Town: FOIS, 2018. p. 239-252. doi: 10.3233/978-1-61499-910-2-239.
- [6] TEIXEIRA, S.; AGRIZZI, B. A.; PEREIRA FILHO, J. G.; ROSSETTO, S.; PEREIRA, I. S. A.; COSTA, P. D. *et al.*, LAURA architecture: Towards a simpler way of building situation-aware and business-aware IoT applications, *Journal of Systems and Software*, v. 161, 2020. doi: 10.1016/j.jss.2019.110494.
- [7] BRASIL. Operações: Manual de campanha. 5. Ed. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2017. Disponível em: <http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/1/848>. Acesso: 8 jun. 2017.
- [8] CAMILO, M. J.; MOURA, D. F.; SALLES, R. M. Redes de comunicações militares: desafios tecnológicos e propostas para atendimento dos requisitos operacionais do Exército Brasileiro. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, v. 37, n. 3, p. 5-25, 2020. doi: 10.2307/2215650.
- [9] ALBERTS, D.; HAYES, R. *Understanding Command and Control*. CCRP, 2006.
- [10] BRASIL. Manual de Campanha: As comunicações nas operações. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2020. Disponível em: <http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/7073>. Acesso: 28 out. 2020.
- [11] BRASIL. Manual de Campanha: Comando e Controle. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2015.
- [12] RYAN, M. J.; FRATER, M. R. *Tactical Communications for the Digitized Battlefield*. Boston: Artech House, 2002.
- [13] KRISHNAN, R.; BABU, R. G.; KAVIYA, S.; KUMAR, N. P.; RAHUL, C.; RAMAN, S. S. Software defined radio (SDR) foundations, technology tradeoffs: A survey. In: *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, Chennai, 2017. p. 2677-2682. doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8392204.
- [14] BARROS, L. G. O Rádio Definido por Software. Trabalho de Graduação (Faculdade de Tecnologia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.
- [15] MITOLA, J. An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. Dissertation (Ph.D.) – Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000.
- [16] GALDINO, J.; MOURA, D.; MORAES, R.; SILVA, F.; MARQUES, E., PAIVA JUNIOR, N. Introdução ao desenvolvimento de rádios definidos por software para aplicações de defesa. In: *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 30., Brasília, DF, 2012. doi: 10.14209/sbrc.2012.211.
- [17] SILVA, W.; CORDEIRO, J. R. S.; MACEDO, D. F.; VIEIRA, M. A. M.; VIEIRA, L. F. Introdução a rádios definidos por software com aplicações em GNU Radio. In: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 35., Vitória: UFES, 2015. p. 315.

- [18] DOYLE, L. E. *Essentials of Cognitive Radio*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. doi: 10.1017/CBO9780511576577.
- [19] XU, W.; XU, Y.; LEE, C.; FENG, Z.; ZHANG, P.; LIN, J. Data-Cognition-Empowered Intelligent Wireless Networks: Data, Utilities, Cognition Brain, and Architecture. *IEEE Wireless Communications*, v. 25, n. 1, p. 56-63, 2018. doi: 10.1109/MWC.2018.1700200.
- [20] ALVES VIEIRA, M.; CARVALHO, S. Model-driven Engineering in the Development of Ubiquitous Applications: Technologies, Tools and Languages. In: *Proceedings of the Brazillian Symposium on Multimedia and the Web*, 23., 2017, p. 29–32. doi: 10.1145/3126858.3131633.
- [21] SILVA, A. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model. *Computer Languages, Systems & Structures*, v. 43, p. 139-155, 2015. doi: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
- [22] COSTA, P. D.; MIELKE, I. T.; PEREIRA, I.; ALMEIDA, J. P. A. A Model-Driven Approach to Situations: Situation Modeling and Rule-Based Situation Detection. *IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference*, 16., Beijing, 2012. p. 154-163.
- [23] BRAMBILLA, M.; FRATERALI, P. *Interaction Flow Modeling Language: Model-Driven UI Engineering of Web and Mobile Apps with IFML*. Burlington: Morgan Kaufmann, 2014.
- [24] SOLEYMANZADEH, K.; BUL, Y.; BAĞCI, S.; KARDAS, G. A Tool for Modeling JsonLogic based Business Process Rules. In: *International Informatics and Software Engineering Conference*, 1., Ankara, 2019. p. 1–5. doi: 10.1109/UBMYK48245.2019.8965462.
- [25] CAMILO, M. J.; MOURA, D. F. C.; SALLES, R. M. Combined Interference and Communications Strategy as a Defense Mechanism in Cognitive Radio Military Networks. *IEEE Military Communications Conference*, Norfolk, 2019. p. 113-118. doi: 10.1109/MILCOM47813.2019.9020787.
- [26] CHINOSI, M.; TROMBETTA, A. BPMN: An introduction to the standard. *Computer Standards & Interfaces*, v. 34, n. 1, p. 124-134, 2012. doi: 10.1016/j.csi.2011.06.002.
- [27] HORROCKS, I.; PATEL-SCHNEIDER, P. F.; BOLEY, H.; TABET, S.; GROSOFF, B.; DEAN, M. SWRL: A Semantic Web rule language combining OWL and RuleML, W3C Member Submission, v. 21, 2004.
- [28] FONTÁN, F. P.; ESPÍÑEIRA, P. M. *Modelling the wireless propagation channel: a simulation approach with Matlab*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [29] JONATHAN, B.; AVETYAN, R.; ABELN, S. Create Domain-Specific Language and Syntax Checker Using Xtext. *International Journal of Industrial Research and Applied Engineering*, v. 4, n. 1, 2020. doi: 10.9744/jirae.4.1.26-32.

# Análise de Hidroxiapatita substituída com vidro sob diferentes rotas de sinterização

Andrey Mariano dos Santos<sup>1</sup>, Iana Costa Carvalho<sup>1</sup>, Ygor Pereira de Lima<sup>1</sup>, Amal Elzubair<sup>1\*</sup>, Suzana Noronha Ferreira Ribeiro<sup>1</sup>, André Luís de Vasconcelos Cardoso<sup>1</sup>, Marcelo Henrique Prado da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia.

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

\*amal@ime.eb.br

**RESUMO:** A hidroxiapatita é um fosfato de cálcio classificado como biomaterial utilizado em restaurações ósseas, dado que apresenta características similares à fase mineral do tecido ósseo. Em particular, as apatitas substitucionais vêm sendo pesquisadas a fim de se obter melhores parâmetros de suas sínteses e, conseqüentemente, de seu impacto na aplicação final. Tendo em vista a importância desses compostos como biomateriais, a presente pesquisa teve o objetivo de estudar compostos sinterizados de hidroxiapatita substituída, visando identificar as fases formadas, a morfologia da microestrutura e a retração do material após sinterização. HA e um compósito de HA e 4% de vidro a base de fosfato com cálcio e magnésio, produzidos a partir de precursores em soluções e depois sinterizadas em diferentes patamares de temperatura. Resultados foram obtidos quanto às fases presentes e sua morfologia para as diferentes condições de composição química e rota de sinterização aplicada a partir da análise de DRX, microscopia eletrônica de varredura. A densidade e a retração de diâmetro foram analisadas após a sinterização dos corpos verdes à 1350 °C. As amostras da HA apresentaram uma fase, maior densidade, maior retração e morfologia uniforme com poucos poros, comparada às amostras do compósito HA/vidro. A adição de vidro de magnésio resultou na transformação parcial da HA em fosfato tricálcico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biomaterial, Hidroxiapatita, Vidro, DRX, Microestrutura

**ABSTRACT:** Hydroxyapatite is a calcium phosphate that is classified as a biomaterial. It is used in bone restorations as it has characteristics similar to the mineral phase of bone tissue. Substitutional apatites have been especially researched to obtain better parameters for their syntheses and improve their impact on final applications. In view of the importance of these compounds as a biomaterial, this research aimed to study sintered substituted hydroxyapatite compounds to identify the formed phases, their microstructure, morphology, and shrinkage after sintering. HA and a composite of HA with 4% calcium phosphate and magnesium-based glass were produced from precursors in solutions and then sintered at different temperature. Results were obtained regarding the phases present and their morphology for the different conditions of chemical composition and sintering route by XRD analysis and scanning electron microscopy. Density and diameter shrinkage were analyzed after green body sintering at 1350 °C. The HA samples showed a hexagonal phase, greater density, greater shrinkage, and uniform morphology with fewer pores than the HA/glass composite samples. The addition of magnesium glass partially transformed HA into tricalcium phosphate.

**KEYWORDS:** Biomaterial, Hydroxyapatite, Glass, XRD, Microstructure.

## 1. Introdução

Cada vez mais interesse tem sido dedicado aos materiais de fosfato de cálcio por causa de uma composição química semelhante a do mineral ósseo. Assim, cerâmicas de fosfato de cálcio com propriedades biológicas superiores esperadas começaram a ser investigadas. Elas são chamadas de cerâmicas bioativas, uma família que inclui principalmente fosfato de cálcio, o chamado hidroxiapatita (HA), fosfato tricálcio (TCP) e fosfatos de cálcio bifásicos (BCP, a mistura de HA e TCP). Considera-se que a hidroxiapatita é o biomaterial mais utilizado em restaurações ósseas [1-3]. Dado que existem vários métodos de obtenção desse composto

na literatura, a síntese do pó de hidroxiapatita é de interesse comercial e científico, pois as condições de processamento têm influência direta na estrutura, morfologia e aplicação do composto final desejado [4].

Além disso, a hidroxiapatita pode atuar como revestimento de implantes ortopédicos em meio fisiológico. Nota-se também que é viável sua aplicação em implantes dentários, assim como reserva de cálcio e fósforo, considerando a facilidade de substituições de ânions e cátions, propiciando a liberação ou armazenamento de íons nos líquidos corporais [5]. A porosidade da hidroxiapatita é responsável pela capacidade de adsorção de moléculas, favorecendo a incorporação de fármacos condutores de drogas [3], pois HA tem facilidade de substituições de ânions e

cátions. Por conta disso, o crescimento ósseo ao redor do implante também é promovido [6].

O presente trabalho teve como finalidade processar HA em diferentes rotas, utilizando amostras de hidroxiapatita pura, bem como hidroxiapatita com um vidro à base de fosfato de cálcio e magnésio, com a identificar fases formadas e morfologia da microestrutura.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Síntese do Vidro

Para a produção do vidro foram preparadas soluções individuais dos precursores  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  99,99%,  $CaCO_3$  99,99%,  $H_3PO_4$  85%, para que atendessem a proporção de 0,01 mol Mg: 0,03 mol, Ca: 0,06 mol, P.

Foram pesados 3,033 g de  $CaCO_3$ , 2,033 g de  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  em uma balança analítica Gehaka, modelo BK 300, e medidos 8,08 ml de  $H_3PO_4$  em uma proveta, todos os reagentes medidos. Então foram diluídos em água destilada separadamente, totalizando 50 ml de solução para cada. As soluções foram então misturadas em um Becker de 500 ml com agitador magnético e com aquecedor 5L – HS19T.

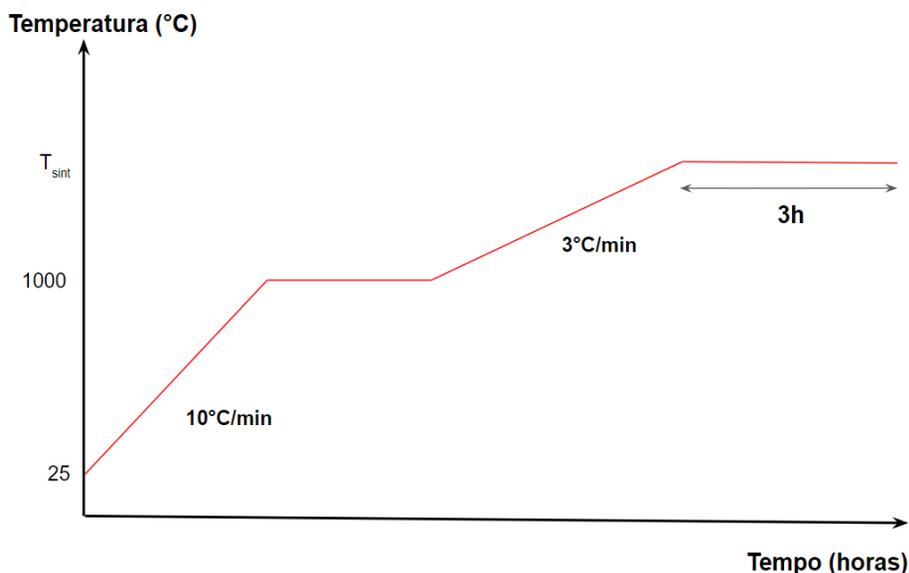
### 2.2 Sinterização das amostras

Foram preparadas quatro amostras, duas com hidroxiapatita pura (HA) e duas de compósito com 96% de hidroxiapatita e 4% de vidro de magnésio (compósito HA/vidro). Para isso, foram pesados 11,95 g de hidroxiapatita para as pastilhas puras, 11,87 g de hidroxiapatita e 0,49 g de vidro de fosfato com magnésio para as pastilhas do compósito. A hidroxiapatita utilizada foi previamente sintetizada no laboratório de cerâmica. Os pós do compósito foram moídos em um moinho de bolas horizontal MARCONI, modelo MA 500.

Produziram-se pastilhas de 2 g em uma matriz de diâmetro de 20 cm, prensadas inicialmente em uma prensa hidráulica manual com carga de 2 toneladas aplicadas durante 30 s, totalizando uma carga de 62,38 MPa. Posteriormente, as pastilhas foram sinterizadas no forno Jung, e as amostras foram sinterizadas em pares constituídos de uma pastilha de HA e uma do compósito HA/vidro, em duas temperaturas distintas: a 1100°C e 1350°C.

Na Figura 1, observa-se a rota da sinterização em que se aqueceu primeiro o forno a 1000°C com taxa de aquecimento de 10°C/min. Ao se estabilizar nessa temperatura, seguiu-se com o aquecimento até a temperatura de sinterização com taxa de aquecimento de 3°C/min, e então permaneceu-se nessa temperatura por 3 horas.

Figura 1 - Esquemática da rota de sinterização.



### 3. Caracterização das amostras

#### 3.1 Propriedades Físicas

A contração linear, a densidade aparente e a porosidade das amostras foram medidas. A medição da contração linear foi realizada com auxílio de um paquímetro manual, dos diâmetros das amostras na condição de corpo verde e após a sinterização. A densidade e a porosidade foram calculadas pelo método de Arquimedes aplicado às amostras sinterizadas:

$$\text{Densidade aparente} = (M_{\text{seca}} \cdot \rho_{\text{água}}) / (M_{\text{úmida}} - M_{\text{imersa}}) \quad (1)$$

$$\text{Porosidade \%} = (M_{\text{úmida}} - M_{\text{seca}}) \times 100 / (M_{\text{úmida}} - M_{\text{imersa}}) \quad (2)$$

Onde: M é a massa da amostra sinterizada, medida seca, imersa e úmida.

$\rho_{\text{água}}$  é a densidade da água  $\sim 1 \text{ g/cm}^3$ .

#### 3.2 Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

As análises das morfologias e microestrutura foram realizadas com o Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo QUANTA FEG 250 (MEV-FEG). Foram utilizados os seguintes parâmetros: 10 a 15 kV de tensão de aceleração, tempo de varredura de 30  $\mu\text{s}$ , aumentos de 1000 a 16.000 X. Além disso, a técnica foi aplicada com elétrons secundários.

#### 3.3 Difração de Raios X

As análises de fases cristalográficas foram feitas por meio da difração de raios X (DRX) com difratômetro da Panalytical, modelo X 'Pert PRO MRD. Utilizou-se

fonte de cobalto ( $\text{Co-K}_{\alpha} = 1,789010 \text{ \AA}$ ), voltagem de 40 kV, corrente de 40 mA, varredura de  $2\theta$  de  $20^{\circ}$  a  $80^{\circ}$  sob o passo de  $0,029^{\circ}$ .

### 4. Resultados e Discussão

#### 4.1 Propriedades Físicas

Na Tabela 1, observa-se o teor da contração das amostras depois da sinterização. Não foi possível obter o valor da contração das amostras sinterizadas a  $1100^{\circ}\text{C}$ , pois elas fraturaram após o processo. Quando iniciada a densificação do HA e HA/vidro acima de  $1000^{\circ}\text{C}$ , os contornos de grãos se formam [7], o volume total dos poros diminui e as amostras contraem para atingir sua densidade aparente máxima. Então, a contração linear ocorre devido à compactação dos grãos que compõem o material cerâmico durante o processo de sinterização, aumentando a densidade do material e consequentemente diminuindo suas dimensões.

Vê-se que a o percentual de contração para as amostras de HA pura foi muito maior do que a de HA/vidro, indicando que a presença do vidro promoveu uma queda para mais da metade de contração da amostra sinterizada.

As medidas de densidade (Tabela-1) revelaram que as amostras da HA pura sinterizadas a  $1350^{\circ}\text{C}$  têm densidade maior do que a do compósito HA/vidro sinterizado na mesma temperatura. Isso acarretou uma porosidade maior no compósito quando comparada com a da HA pura.

As amostras sinterizadas a  $1100^{\circ}\text{C}$  apresentaram densidade menor e porosidade maior do que as sinterizadas a  $1350^{\circ}\text{C}$ .

**Tabela 1** - Contração linear, densidade e porosidade das amostras sinterizadas.

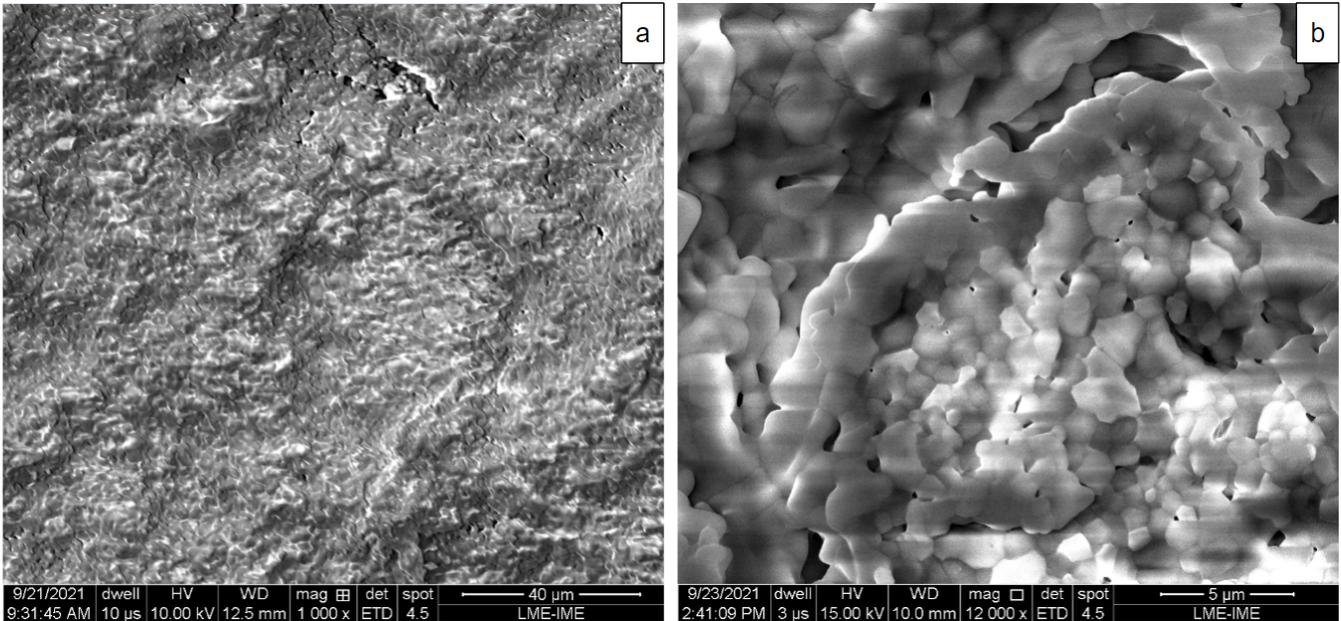
Amostra	Contração $\pm$ DP (%)	Densidade $\pm$ DP ( $\text{g/cm}^3$ )	Porosidade $\pm$ DP (%)
HA ( $1350^{\circ}\text{C}$ )	$19,10 \pm 0,34$	$2,7769 \pm 0,0291$	$2,96 \pm 0,48$
HA/Vidro ( $1350^{\circ}\text{C}$ )	$8,8 \pm 0,94$	$2,5472 \pm 0,0034$	$9,47 \pm 1,42$
HA ( $1100^{\circ}\text{C}$ )	-	2,434	15,56
HA/Vidro ( $1100^{\circ}\text{C}$ )	-	1,7982	37,69

## 4.2 Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

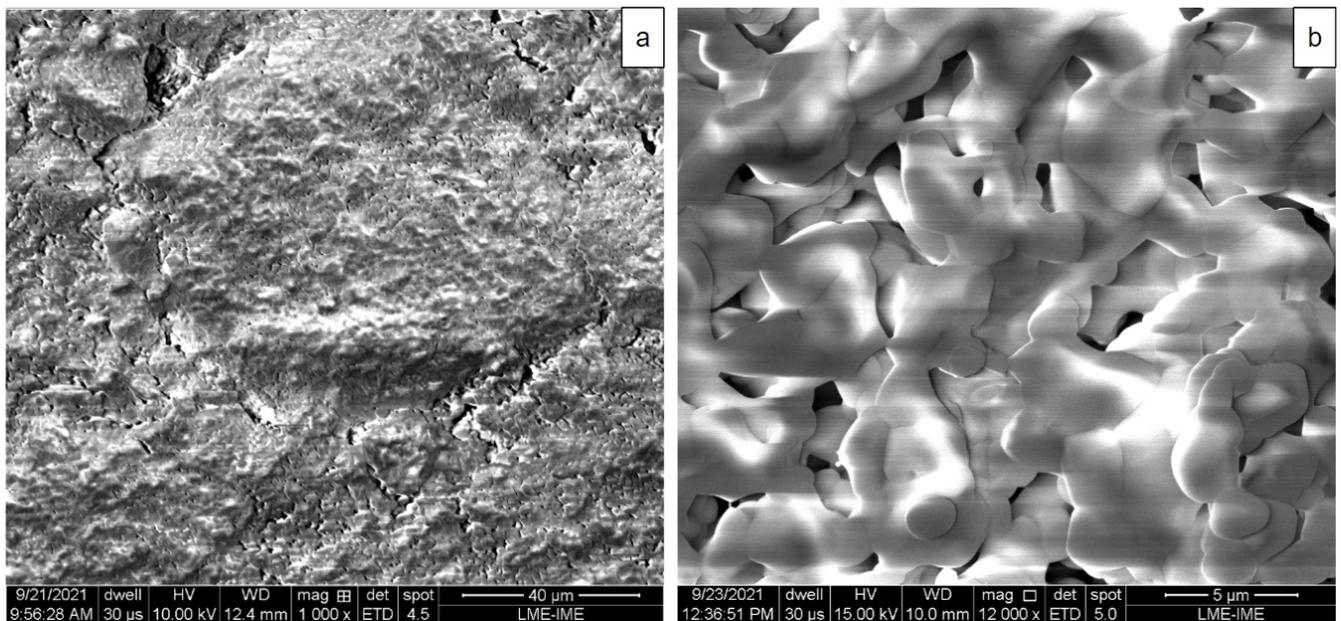
Nas Figuras 2 a 5, estão apresentadas as micrografias obtidas por MEV das amostras sinterizadas. As Figuras 2 e 3 apresentam as amostras HA e HA/vidro sinterizadas a 1100 °C. Nas Figuras 2a e 3a, é possível ver formação de trincas nas amostras, mas com intensidade

maior no composto de HA/vidro. Observa-se nas Figuras 2b e 3b que houve um crescimento e coalizão dos grãos no processo, diminuindo, assim, a energia interfacial total dos contornos dos grãos. Pode-se notar que os grãos do composto HA/vidro têm crescimento maior e conta com a presença significativa de poros.

**Figura 2** - Microestrutura da amostra HA pura sinterizada à 1100°C.



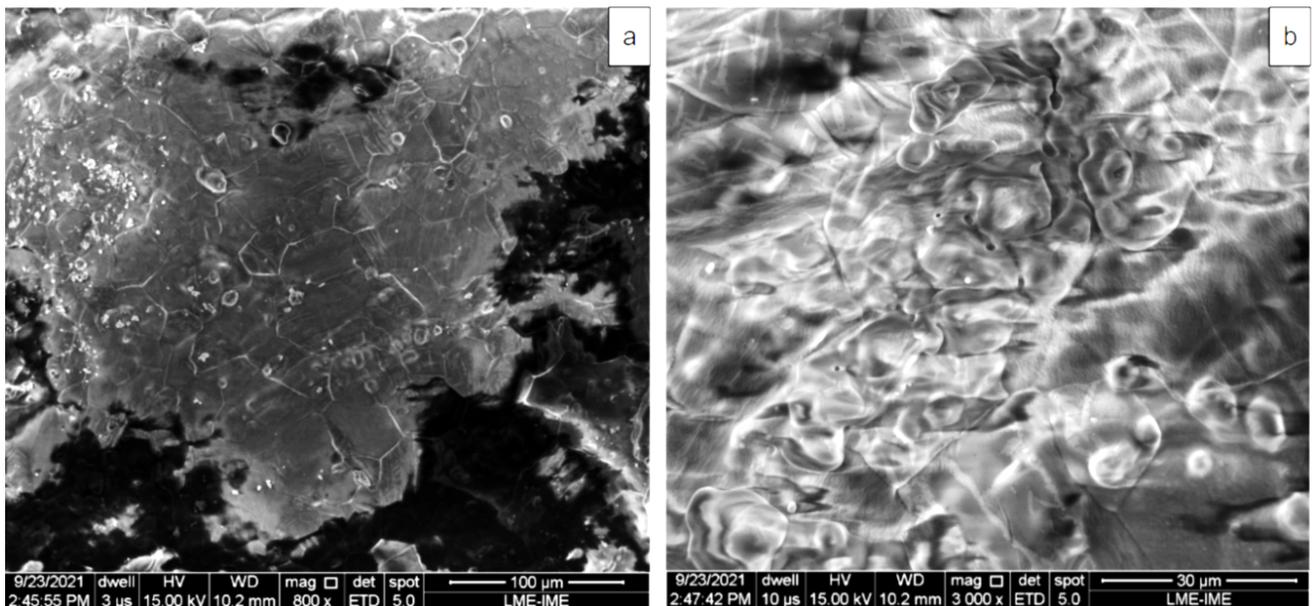
**Figura 3** - Microestrutura da amostra HA/Vidro sinterizada à 1100°C.



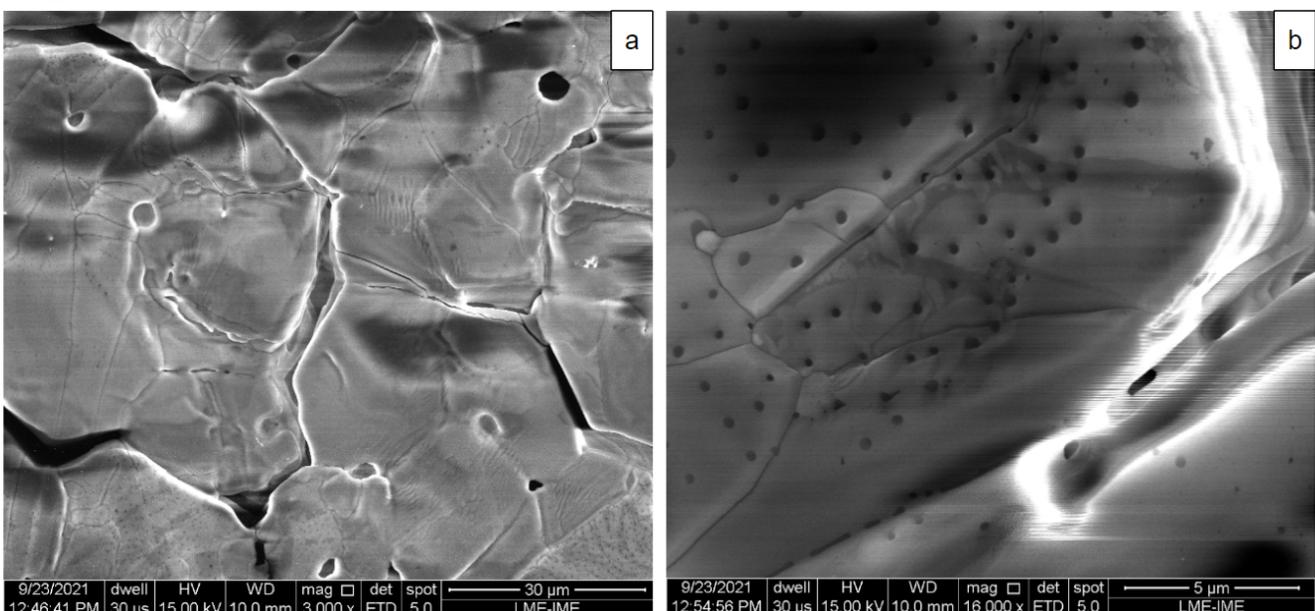
No caso das amostras sinterizadas a 1350°C, observou-se nas Figuras 4a e 5a uma morfologia com aspecto de superfície menos rugosa do que nas amostras sinterizadas a 1100°C. Percebe-se também uma menor ocorrência de trincas e maior densificação. Existem ainda alguns poros e canais intergranulares, mais notáveis nas amostras HA/vidro (Figura 5a). A Figura 4a mostra que a sinterização de HA produziu cerâmica,

quase idealmente densa (densidade aparente ~ 97% como mostra a Tabela-1), sem crescimento significativo dos grãos. A microestrutura final nas Figuras 4a e 5a é constituída por grãos hexagonais. A Figura 4b apresentou regiões com poros fechados residuais. Uma estrutura interessante pode ser vista na Figura 5b, com aumento, há presença de poros ou cavidades circulares pequenas distribuídas na superfície dos grãos.

**Figura 4** - Microestrutura da amostra HA pura sinterizada à 1350°C.



**Figura 5** - Microestrutura da amostra HA/Vidro sinterizada à 1350 °C.

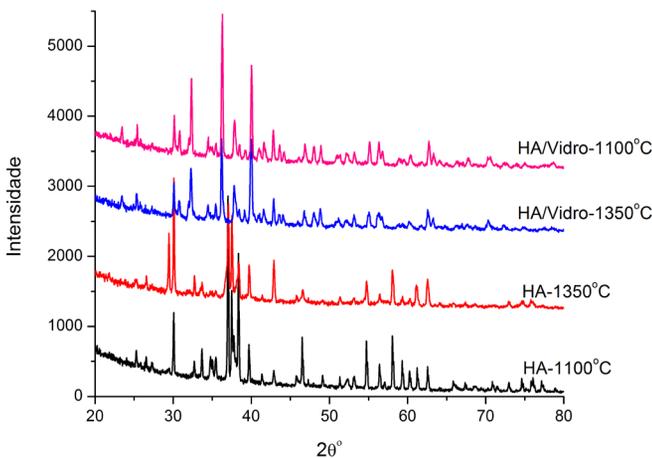


### 3.3 Difração de Raio-X

As medidas de Difração de Raio-X resultaram nas difratogramas da Figura 6. No caso da amostra de HA pura sinterizada a 1100 °C, foi identificada uma fase majoritária de hidroxiapatita e uma outra fase minoritária não identificada. Na amostra de HA pura sinterizada a 1350°C, observou-se a formação de uma fase cristalina única de hidroxiapatita (JCPDS 09-0432).

Nos dois casos, a fase de HA indexada tem simetria hexagonal e parâmetros de rede de  $a = b = 9,4180 \text{ \AA}$  e  $c = 6,8840 \text{ \AA}$ . Esse resultado é compatível com a microestrutura hexagonal da Figura 4a.

**Figura 6** - Difratogramas da DRX das amostras sinterizadas à 1100°C e 1350°C.



Já as amostras de HA/vidro apresentaram mesma estrutura cristalina nas duas temperaturas de sinterização, um padrão diferente de HA pura, sendo mais bem indexados pela fase romboédrica (JCPDS 09-0169) do  $\beta$ -TCP, com parâmetros de rede de  $a = b = 10,4290 \text{ \AA}$  e  $c = 37,3800 \text{ \AA}$ . Isso indica que HA se transformou parcialmente em  $\beta$ -TCP ( $\beta$ -fosfato Tricálcico  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ). Assim, a substituição do  $\text{Ca}^{2+}$  na rede cristalina da HA por  $\text{Mg}^{2+}$  favorece a decomposição térmica do HA em uma mistura bifásica de HA e TCP [8, 9]. O magnésio também estabilizou essa transformação em ambas temperaturas de sinterização.

Nota-se que o parâmetro de rede  $c$  das amostras com adição de vidro é muito maior do que para a fase

de HA pura. Tal diferença condiz com o resultado de contração linear, podendo ser a causa do efeito observado de maior retração das amostras de HA pura em relação a do compósito.

### Conclusões

A partir das análises acima, as seguintes conclusões podem ser citadas:

- A produção da HA e do vidro a base de fosfato de cálcio e magnésio sob a utilização de precursores em meio líquido garantiu a homogeneidade dos compostos;
- A contração da área superficial após a sinterização indica a coalescência dos grãos do corpo verde, eliminação dos poros e conseqüentemente a densificação. As amostras de HA pura tiveram densidade aparente maior e menor porosidade de que o compósito HA/vidro na mesma temperatura, o que significa que a adição de vidro retarda a densificação da HA;
- Houve um crescimento, coalizão dos grãos e formação de contornos de grãos no processo de sinterização nas duas temperaturas. O compósito HA/vidro teve maior crescimento de grãos, presença de poros e canais intergranulares assimila trincas;
- A microestrutura das amostras de HA a 1350°C mostrou os grãos em formato hexagonal, o que foi confirmado pela DRX, com estrutura cristalina hexagonal. Enquanto o compósito HA/vidro teve estrutura cristalina romboédrica que indica que HA se transformou parcialmente em  $\beta$ -TCP devido à substituição parcial do cálcio por magnésio.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado inteiramente nas dependências do IME. Os autores gostariam de agradecer às agências de fomento, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro.

### Autoria e Colaborações

Todos os autores participaram de modo equivalente na elaboração do artigo.

## Referências

- [1] Hench, L. L.; Polak, J. M. Third-generation biomedical materials. *Science*, [s. l.], v. 295, p. 1014– 1017, 2002.
- [2] Jarcho, M. Calcium phosphate ceramics as hard tissue prosthetics. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, [s. l.], v. 157, p. 259–78, 1981.
- [3] Groot, K de. *Bioceramics of calcium phosphate*. Boca Raton: CRC Press, 1983.
- [4] Viana, J. R. *et al.* Análise comparativa da síntese de hidroxiapatita via estado sólido. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0914>
- [5] Sygnatowicz, M.; Keyshar, K.; Tiwari, A. Antimicrobial Properties of Silver-doped Hydroxyapatite nano-powders and Thin Films. *Biological Biomedical Materials*, [s. l.], v. 62, p. 65-70, 2010.
- [6] Santos, M. V. B.; Osajima, J. A.; Silva-Filho, E. C. Hidroxiapatita: suporte para liberação de fármacos e propriedades antimicrobianas. *Cerâmica*, [s. l.], v. 62, p. 256-265, 2016.
- [7] Rootare, H. M.; Craig, R. G. Characterization of hydroxyapatite powders and compacts at room temperature and after sintering at 1200°C. *Journal of Oral Rehabilitation*, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 293–307, 1978.
- [8] Cacciotti, I.; Bianco, A.; Lombardi, M.; Montanaro, L. Mg-substituted hydroxyapatite nanopowders: Synthesis, thermal stability and sintering behaviour. *Journal of the European Ceramic Society*, [s. l.], v. 29, n.14, p. 2969–2978, 2009.
- [9] Gibson, I.R.; Bonfield, W. Preparation and characterization of magnesium/carbonate co-substituted hydroxyapatites. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, [s. l.], v. 13, n. 7, p. 685–93, 2002.

# Recomendações para preenchimento de resumos de dados geoespaciais

Carolina Coutinho Salustiano Silva<sup>1</sup>, Ivanildo Barbosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, Brasil  
carolsalustiano@gmail.com  
ivanildo@ime.br

**RESUMO:** Com o avanço das Infraestruturas de Dados Espaciais, os produtores de dados geoespaciais podem disponibilizá-los para um amplo número de potenciais usuários. A decisão do usuário, humano ou motor de busca na Web, por acessar esses dados se baseia, prioritariamente, na análise dos seus metadados, ponderando as características do dado disponibilizado e as suas expectativas. As recomendações de preenchimento de metadados do Perfil de Metadados Geoespaciais Brasileiro (PMGB) servem como referência aos agentes responsáveis pelo preenchimento de metadados, porém nem sempre atendem aos critérios adotados pelos motores de busca na Web. O objetivo deste trabalho é apresentar propostas de diretrizes de preenchimento do elemento de metadados Resumo, com o intuito de tornar a descrição do dado geoespacial mais atrativa para usuários humanos e máquinas. Neste trabalho, foram criadas versões alternativas de resumos de dados já disponibilizados na Web, aplicando técnicas de otimização para motores de busca e as recomendações de preenchimento indicadas no PMGB. Em seguida, um grupo de usuários avaliaram a sua percepção de ganho de informação dentre as opções apresentadas. Observou-se que 84,6% dos respondentes aprovaram a sistemática de preenchimento proposta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Metadados Geoespaciais; Otimização de Motores de Busca; Texto-Livre; Resumos

**ABSTRACT:** As spatial data infrastructures evolves, geospatial data producers became able to provide them to a wide scope of potential users. This user, either human or a search engine, decides to adopt that dataset based on the analysis of the correspondent metadata by comparing data characteristics and their expectations. The Brazilian Geospatial Metadata Profile (in Portuguese, PMGB) offers guidelines to support agents in charge to fill geospatial metadata. However, they often meet the expectations of web search engines. This study aims to propose guidelines to fill the metadata element Abstract to make data more attractive to both human and machine users. This study created alternative versions of Abstracts of geospatial data available at the web based on search engines optimization techniques and the PMGB guidelines. A group of expert users assessed the alternatives by considering their preferences regarding their perception of gain of information between the proposed alternatives. In total, 84.6% of respondents approved the proposed guidelines for filling the Abstract metadata element.

**KEYWORDS:** Geospatial Metadata; Search Engine Optimization; Free-Text; Abstracts

## 1. Introdução

A implantação de Infraestruturas de Dados Espaciais (IDE), independente do seu nível hierárquico, permitiu otimizar o processo de disponibilização e acesso dos usuários a conjuntos de Dados Geoespaciais (CDG) [1]. Nesse contexto, os serviços de catálogos para Web (*Catalog Services for Web* – CSW) se destacam por facilitar a busca dos CDG com base em elementos de metadados como título, resumo e palavras-chave.

Estendendo o cenário para a busca de dados por meio de motores de busca da Web, torna-se imperioso selecionar os termos que aumentam as chances de o motor de busca apresentar o CDG como resposta a uma consulta relacionada.

Inconsistências lógicas e semânticas podem surgir durante o preenchimento, devido a uma compreensão equivocada do significado dos elementos de metadados, em concomitância ao desconhecimento do conjunto de dados a ser documentado [1].

Um exemplo dessa compreensão equivocada é a descrição dos atributos dos dados em vez das informações referentes aos dados em si. Além de tudo, o autor tem a possibilidade de julgar subjetiva a relevância do conteúdo dos resumos, sendo este um parâmetro importante para indexação e classificação dos motores de busca.

Diversos CDGs suscitam interesse para pesquisas acadêmicas, governos, empresas ou atividades afins, sendo evidente a importância de um preenchimento adequado dos metadados, uma vez que o preenchimento inadequado impede que o buscador localize e indexe corretamente os dados espaciais na Web.

Foi elaborado um ranking, por meio de estudo realizado por Benjelloun *et al.* [2], para listar a notabilidade dos elementos de metadados em textos científicos publicados na internet. De acordo com os autores, o resumo influencia 100% na descoberta de um conjunto de dados, ocupando a primeira posição na lista de elementos mais relevantes.

Consequentemente, torna mais clara a necessidade de um preenchimento adequado do resumo. Com o objetivo de atenuar o problema de preenchimento dos metadados, são aconselháveis os seguintes passos: uma documentação adequada com as características e informações do dado geográfico e disponibilizados na Web feita pelos produtores, associado ao conhecimento das estratégias de indexação de documentos e dados, além da compreensão do funcionamento dos motores de busca.

Este trabalho tem como objetivo propor diretrizes de preenchimento do elemento de metadados Resumo, no contexto de uma IDE, com o intuito de tornar a descrição do CDG mais atrativa para usuários humanos e máquinas.

Após essa contextualização, a Seção 2 apresenta os conceitos que embasam as orientações apresentadas neste trabalho. A seção 3 descreve a metodologia empregada para verificar os ganhos obtidos com as recomendações existentes e a Seção 4 apresenta e discute os resultados obtidos. A quinta seção apresenta as considerações finais do trabalho.

## 2. revisão conceitual

### 2.1 Otimização de Motores de Busca

Normalmente os mecanismos de busca de metadados são implementados em plataformas de serviços de catálogos Web ou outros repositórios locais específicos para dados espaciais. Nesses casos, a busca textual ocorre somente entre os registros do repositório, incluindo campos como palavras-chave, título e resumo, considerando que consultar em motores de busca na Web tornou-se quase instintivo, uma vez que nem todos os dados geoespaciais de interesse fazem parte de alguma IDE e do seu respectivo catálogo de metadados.

O funcionamento de uma ferramenta de busca é dividido em quatro principais aspectos e algoritmos. Primeiro, os rastreadores que procuram novos conteúdos na Web. Segundo, a indexação que cadastra no índice de pesquisa do buscador informações importantes, como as palavras-chave. Terceiro, motor de busca que classifica e organiza as centenas de bilhões de páginas da internet, analisando fatores como palavras da consulta e usabilidade e conhecimento das fontes e configurações. O peso aplicado a cada fator varia de acordo com a tipo de pesquisa. Quarto, exibição dos resultados que apresentam ao usuário as páginas relacionadas à busca. Alguns fatores preponderantes ajudam a determinar o resultado, são eles: compreensão da linguagem natural que envolve interpretar erros de digitação; encontrar correspondência que aparece com frequência nos títulos, cabeçalhos ou corpo do texto; interpretar contextos, por exemplo a localização do usuário, preferência de idioma e histórico de pesquisas. [3] [4].

Os resultados de busca que aparecem para o usuário são elencados de acordo com o que é considerado mais relevante a partir das palavras empregadas na consulta aos títulos e resumos. O preenchimento inadequado dos metadados pode gerar uma indexação não coerente de palavras-chave nos motores de busca, causando uma dificuldade de acesso.

Nesse contexto, foram identificadas técnicas ou artimanhas para otimizar um sistema ou página na Web com o intuito de otimizar sua indexação pelos buscadores. Esse processo é conhecido como “otimização para motores de busca” (*Search Engine Optimization – SEO*) [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Dentre as boas práticas de otimização, conhecidas como *white hats*, pode-se citar o uso de metadescritores, utilizados pelos buscadores para exibição dos resultados de texto das segundas e terceiras linhas dos resultados de busca, logo abaixo do título dos sites (Figura 1). Os metadescritores têm limite de caracteres, por volta de 120 a 153, a depender do buscador utilizado. Eles em si não aumentam a reputação de uma página, mas se os usuários acharem o que estão procurando no texto da meta descrição, a chance de acesso ao site aumenta [11].

### Figura 1 - Exemplificação de uma pesquisa no Google utilizando tags de metadescrição



URL	→	http://www.ime.eb.mil.br
Título	→	Instituto Militar de Engenharia - IME (PT)
Descrição	→	O Instituto Militar de Engenharia (IME) conquistou o grau máximo no Exame Nacional Desempenho de Estudantes (ENADE) com a participação de aproximadamente 100 ...

**Fonte:** elaborado pelos autores e adaptado do Google.

A segunda boa prática a se destacar consiste em evitar descrições idênticas ou semelhantes em todos os metadados quando páginas individuais aparecem nos resultados da Web. Isso vai de encontro à prática de criar longos *templates* para geração de conteúdo dinâmico, reforçando a necessidade de enfatizar as singularidades de cada CDG no resumo.

Recomenda-se, também, gerar um texto fluido em detrimento a longas sequências de palavras-chave. Primeiro, torna o resumo legível por humanos; depois, permite que os algoritmos de processamento de linguagem natural processem o contexto e eliminem eventuais ambiguidades.

Os conjuntos de dados são mais fáceis de serem encontrados quando fornecem informações de suporte, por exemplo nome, descrição, criador e formatos de distribuição como dados estruturados. Utilizando como referência a abordagem que o Google aplica para a descoberta de conjuntos de dados, recomenda-se o uso do 'schema.org' e outros padrões de metadados que podem ser adicionados às páginas que descrevem os conjuntos de dados.

O objetivo dessas informações é melhorar a descoberta de conjuntos de dados de campos como geociências, ciências biológicas, ciências sociais, aprendizado de máquina, dados cívicos e governamentais e muito mais. Sendo assim, os resumos ficam mais atraentes não apenas para usuários humanos, mas também para os algoritmos de busca que refinam os resultados de busca com base na interpretação do texto disponibilizado [12].

Por fim, frequentemente as duas primeiras frases são exibidas nos resultados do mecanismo de pesquisa. Portanto, torná-las atraentes com palavras-chave relevantes incentiva as pessoas a clicarem para acessar a página a fim de ler o conteúdo na íntegra. O ideal

é tentar repetir essas palavras-chave de três a seis vezes no resumo, mantendo a legibilidade do texto [13]. A naturalidade da produção textual deve ser mantida, além de composta por pontos centrais claros e concisos, respeitando o limite entre 50 e 5 mil caracteres [12].

Esse funcionamento é intuitivo para consultas por documentos de texto, legendas de imagens e descrições de vídeos. No caso de CDG, as iniciativas de indexação de serviços CSW e de servidores de mapas visam tornar visíveis tais conteúdos aos indexadores dos motores de busca. Um exemplo é a implementação do módulo *Geosearch* em servidores de mapas *Geo-server* [14]. Outra solução é a geração de páginas Web com conteúdo baseado nos elementos título, resumo e palavras-chave, para publicação e indexação pelos motores de busca.

## 2.2 Metadados geoespaciais

O conceito mais simplista de metadado remete à descrição de um dado [15]. A finalidade dos metadados consiste em documentar e organizar, de forma sistemática e estruturada, os dados das organizações de modo a facilitar o seu compartilhamento e manutenção, disciplinar a produção e o armazenamento dos dados e orientar a utilização dos dados em aplicações diversas.

O conceito se estende à catalogação bibliográfica e de objetos em formato digital. Diferentes esquemas de metadados têm sido propostos para se adequar às características dos objetos descritos, por exemplo o *International Standard Bibliographic Description (ISBD)* [16] e o *Dublin Core Metadata Initiative (DCMI)* [17].

No contexto de dados geoespaciais, foram propostos diferentes perfis de metadados: *Content Standard for Digital Geospatial Metadata (CSDGM)* [18], ISO 19115 [19] e vários perfis nacionais elaborados a partir deste último. O Perfil de Metadados Geoespaciais Brasileiro (Perfil MGB) [20] é o padrão adotado no Brasil, baseado em [19], e recentemente adaptado para se adequar às atualizações feitas pela ISO 19115 em 2014 [21].

Cada perfil apresenta dezenas de elementos de metadados que visam descrever aspectos técnicos, legais e de identificação, de modo que os usuários possam

realizar consultas ao conteúdo do repositório a fim de descobrir os CDGs relacionados às suas expectativas. Alguns desses elementos possuem valores que podem ser preenchidos de forma automática, a extensão espacial e o sistema de coordenadas de referência de um arquivo vetorial, por exemplo. Um segundo conjunto de elementos possuem domínio controlado, ou seja, somente podem ser preenchidos com valores definidos em uma lista pré-estabelecida. Por fim, um outro conjunto de elementos são preenchidos em formato de texto livre, o que pode dar margem à subjetividade por parte do agente que preenche o metadado.

Na seção 2.1, foram mencionados dois elementos de metadado com grande influência na busca por recursos na Web: palavras-chave e resumo.

O elemento palavra-chave é designado para descrever um recurso, seu aspecto ou a fonte. A seleção dos termos pode ser facilitada ao ser utilizada a lista controlada, a MD\_TopicCategoryCode [19, 20], que possui um código de categorias, pois contém temas e taxonomia definidos. Outra forma de favorecer a escolha das palavras-chave é o uso de um léxico ou *thesaurus* [20].

O elemento Resumo é definido como um breve sumário do recurso [19, 20, 21, 22] e “deve sintetizar os aspectos fundamentais do recurso em termos de conteúdo, extensão geográfica, data, escala, nome da série, produtor ou entidade responsável, fontes utilizadas, etc.” [20]. A subjetividade inerente ao termo “breve” pode induzir ao preenchimento demasiadamente simplificado, deixando de registrar conteúdo que ser encontrado em buscas por palavras-chave. Por outro lado, resumos prolixos podem omitir informação relevante em detrimento de aspectos que não agregam valor à busca, além de ocupar maior espaço de armazenamento desnecessariamente. Abaixo seguem, respectivamente, exemplos de resumos demasiadamente simplificados e prolixos:

- “O Modelo Digital de Elevação, que integra o projeto RJ-25, representa o modelo numérico das características altimétricas da superfície, articuladas por folhas segundo o recorte do mapeamento sistemático brasileiro. Abrange um quadrilátero geográfico de 07°30” de latitude por 07°30” de longitude [23];

- “ÍNDICE DE ATENDIMENTO URBANO DE ÁGUA – IN023. Indicador do Sistema Nacional de informações sobre Saneamento SNIS. Fórmula de cálculo.  $IN023 = AG026\_R / G06a * 100$ . Unidade percentual. Ano de referência 2011”. [24].

“Diversos estados monitoram hoje a qualidade das águas superficiais em seu território e repassam os dados para a ANA. No entanto, em perspectiva nacional, nem sempre é possível comparar os dados gerados, já que os estados adotam diferentes critérios, metodologias e parâmetros, não havendo uma padronização em escala de País. A Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade das Águas (RNQA) é o principal componente do Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas (PNQA), e tem como principal objetivo padronizar e ampliar o monitoramento no País, eliminando as lacunas temporais e geográficas existentes. Os pontos da RNQA foram determinados a partir de uma metodologia de alocação de pontos desenvolvida pela ANA e foram posteriormente analisados juntamente com todos os estados e o Distrito Federal para buscar aproveitar os pontos de monitoramento das redes já existentes. Além disso, a ANA é responsável pela operação da Rede Hidrometeorológica Nacional, que contém estações fluviométricas e gera informações de vazão de rios em todo o País. Em parte dessas estações, aproximadamente 1600, há também o monitoramento de quatro parâmetros de qualidade de água medidos com sondas multiparamétricas (Oxigênio Dissolvido, Turbidez, Temperatura e pH)” [25].

## 2.3 Trabalhos relacionados

Estudos foram desenvolvidos descrevendo na linha de SEO.

Cahill e Chalut [5] examinaram técnicas usadas pelo marketing para otimização: eram observadas as diferentes táticas de otimização entre os termos “chapéu branco” e “chapéu preto”, e porque foi importante para os bibliotecários entender essas técnicas e o impacto nas páginas de resultados do mecanismo de pesquisa. Também analisaram as maneiras pelas quais os funcionários da biblioteca poderiam ajudar seus

usuários a desenvolver a consciência dos fatores que influenciavam resultados de pesquisa e melhor avaliarem a qualidade e a relevância na página de resultados.

Shih, Chen e Chen [6] desenvolveram uma otimização para mecanismos de busca que pudesse ser usada por uma empresa. Sites de redes sociais foram incluídos na estratégia de marketing na Internet. A técnica proposta foi aplicada nas operações de uma loja de e-books online. Os rankings dos sites foram acompanhados em dois motores de busca: Google e Yahoo. Os resultados revelaram que um SEO bem projetado, com a incorporação de redes sociais, pode efetivamente aumentar a visibilidade do site e a exposição.

Zilincan [7] analisou os fatores mais importantes que podem ajudar a melhorar o posicionamento nos resultados de busca. Ele ressalta que nenhuma técnica pode garantir alta classificação, porque os motores de busca têm algoritmos sofisticados que medem a qualidade das páginas da Web e derivam sua posição nos resultados de pesquisa. Zilincan também desenvolveu um site com o propósito de implementar e testar as principais técnicas de SEO. Então, os fatores relevantes de otimização que influenciaram o mecanismo de busca aumentaram o ranking de seu site, além de posteriormente verificar maior tráfego.

Katumba e Coetzee [10] identificaram e categorizaram os termos de pesquisa normalmente empregados pelos usuários ao procurar recursos geoespaciais na Web. Guiados por esses termos, foram publicados os metadados sobre fontes geoespaciais “diretamente” na Web e realizados testes empíricos com técnicas de otimização de mecanismos de busca (SEO). Dois conjuntos de páginas HTML foram preparados e registrados no Google e no Bing, respectivamente. Os metadados em um conjunto foram marcados com Dublin Core, o outro com Schema.org.

### 3. metodologia

A metodologia empregada foi dividida em quatro partes: extração dos metadados do repositório da INDE, análise da estrutura de preenchimento, análise da estrutura de preenchimento utilizada na INDE e compilação das recomendações. A validação dos

resultados obtidos consistiu na avaliação realizada por usuários, escolhendo a opção com maior representatividade semântica.

#### 3.1 Extração de metadados

O processo de extração dos metadados do catálogo da INDE foi baseado no script desenvolvido e documentado em [26]. Foram extraídos os identificadores, títulos e resumos de 5.808 metadados armazenados no repositório da INDE em 05/11/2020. Os serviços CSW permitem a elaboração de requisições em HTTP, recebendo respostas em formato XML, que podem ser interpretadas e armazenadas de forma estruturada. Neste trabalho, os dados foram armazenados em formato de valores separados por vírgula.

#### 3.2 Análise da estrutura de preenchimento

O Perfil MGB é a referência normativa brasileira para preenchimento de metadados geoespaciais. Como foi mencionado na Seção 2.3, ele especifica as informações sobre alguns aspectos do dado que devem constar no resumo. Além disso, esse Perfil, assim como dezenas de outras iniciativas ao redor do mundo, baseia-se nas especificações da ISO 19115 [19]. O mesmo ocorre em normas internacionais como INSPIRE [27, 28] e IDE Espanha [29], as quais foram escolhidas pelo presente estudo, devido à maior maturidade e, conseqüentemente, disponibilidade de documentação com maior nível de detalhamento e maior adesão pelos países-membros.

#### 3.3 Análise da estrutura de preenchimento utilizada na INDE

Esta etapa visa entender quais conteúdos os agentes responsáveis pelo preenchimento de metadados geoespaciais empregam na elaboração dos resumos.

Foram selecionados 104 (cento e quatro) metadados dentre a população de 5.808 metadados extraídos do catálogo na Seção 3.1. A seleção ocorreu a partir da diversidade de tipos e a temática dos dados; instituições produtoras variadas e, principalmente, foi tentado evitar a duplicidade dos resumos.

Esse tamanho de amostra implica um nível de confiança de 95% com uma margem de erro de 9,4%. Porém, foi observado que alguns produtores seguiam *templates* de preenchimento para dezenas de produtos, o que poderia influir nas estatísticas da identificação dos modelos.

A padronização de preenchimento nos resumos foi analisada com base nos requisitos sugeridos pelo PMGB. Os resultados dessa etapa foram obtidos a partir da presença dos seguintes fatores nos resumos: área geográfica, data, escala, nome da série, produtor e fontes utilizadas. Cada aspecto dessa estrutura de preenchimento foi analisado e classificado com os seguintes critérios: a) atende totalmente ao requisito, ou, b) atende parcialmente ao requisito, ou, c) não atende ou não encontrado.

### 3.4 Compilação das recomendações

As recomendações foram divididas em dois grupos: quanto à forma e quanto ao conteúdo.

Quanto à forma, a concatenação dos itens para elaboração do texto do resumo seguiu as recomendações de SEO sempre que possível ao utilizar as palavras-chave mais relevantes com uma repetição de 3 a 6 vezes de forma natural no resumo, incluir as principais palavras-chave nas duas primeiras frases do resumo, evitar textos rebuscados e prolixos e evitar repetição de *templates* de resumos para dados geoespaciais diferentes em uma IDE.

Quanto ao conteúdo, a Tabela 1 compara os conteúdos de preenchimento nos resumos. Parte-se da premissa de que os itens apresentados nela são a base das recomendações.

**Tabela 1-** Incidência dos requisitos nas recomendações publicadas

Item	PMGB	INSPIRE	IDE Espanha
Área geográfica	X	X	X
Data	X	X	
Escala	X	X	
Fontes utilizadas	X	X	X

Item	PMGB	INSPIRE	IDE Espanha
Importância do trabalho			X
Principais atributos			X
Produtor	X	X	
Referencias legais			X
Série	X	X	

**Fonte:** elaborado pelos autores.

Algumas adaptações foram necessárias com o intuito de atender às recomendações de forma. Em suma, o conteúdo do resumo elaborado deve reunir nove elementos:

- Tema – assunto ao qual se refere, ou busca desenvolver, ou a proposição a ser abordada. Tema principal do CDG;
- Produto – resultado do levantamento, ou seja, o que foi produzido;
- Recorte espacial – resultado do levantamento, ou seja, o que foi produzido;
- Recorte temporal – principais localidades de acordo com a escala: menor que 1:10.000.000 (país); menor que 1:5.000.000 (estados e capitais); menor que 1.000.000 (cidades com mais de 1.000.000 habitantes);
- Escala – denominador compatível com a dimensão do menor detalhe representável no dado. Utilizar a escala para os CDGs vetoriais. Para os dados matriciais, utilizar a escala compatível com o menor detalhe representável no terreno ou a resolução espacial, expressa em metros;
- Nome da série (aplicável a uma série ou coleção de dados) – nome de uma série cartográfica, documentos folha a folha ou documentos de trabalhos de campo, para a constituição de um determinado recurso. O nome é aplicável a uma série ou coleção de dados;
- Produtor e/ou entidade responsável instituição e/ou responsável pelo dado geoespacial;
- Fontes utilizadas – origem dos dados espaciais, por exemplo levantamento aerofotogramétrico, cartas, mapas, imagens, mosaicos, bases cartográficas etc.;

Contextualização (que ajude a entender o dado produzido) – descrever o objetivo dos dados, apresentar um contexto para a criação do dado.

### 3.5 Validação

A validação tem como objetivo avaliar o ganho obtido com o emprego das diretrizes de preenchimento propostas, isto é, a percepção de completeza das informações contidas no resumo em relação aos textos originais.

Para tal, foi desenvolvido um questionário de acordo com o modelo de autoexplicação, em que o formulário é entregue aos respondentes para que preencham sem intervenção do pesquisador [19, 30].

As perguntas dentro de cada seção foram pensadas seguindo uma ordem de nível de complexidade e reflexão para os respondentes [30]: as perguntas iniciais de cada seção pediram respostas rápidas, enquanto as finais foram de caráter mais reflexivo, complexo e abstrato. O formulário foi divulgado durante evento científico e veiculado por meio de e-mails e publicações em grupos de usuários de geotecnologias no *Facebook* e *Whatsapp*. Foram recebidas respostas durante aproximadamente dois meses (entre novembro de 2020 e janeiro de 2021).

O formulário foi desenvolvido no *Google Forms* e dividido em duas seções fundamentais: caracterização dos respondentes e validação da sistematização de preenchimento dos resumos.

A caracterização dos respondentes tinha como objetivo quantificar a expertise dos respondentes quanto à formação acadêmica e ao tempo de experiência no emprego de dados geoespaciais. A seguir as principais perguntas do formulário para a caracterização:

1. Em qual das categorias abaixo você se identifica?

- Discente de Graduação;
- Discente de Pós-Graduação;
- Discente de Curso Técnico;
- Professor/Pesquisador;
- Profissional/Produtor;
- Profissional/Usuário;
- Outros.

2. Há quanto tempo você tem de contato com dados geoespaciais, seja na sua formação ou experiência profissional (anos)?

- 0 – 1;
- 2- 5;
- 6 – 10;
- Mais de 10.

Na segunda seção, os respondentes compararam resumos de três produtos originalmente disponibilizados no catálogo de metadados da INDE com outros reescritos, com as orientações existentes no PMGB (ver seção 2.2) e com as orientações compiladas neste estudo. O objetivo da análise das respostas obtidas no formulário é verificar se os resumos elaborados com base na estrutura proposta são mais claros e representativos, se comparados com os resumos baseados nas orientações do PMGB ou, ainda, aqueles originalmente preenchidos na INDE.

Caso o resumo original não contivesse todos os itens necessários para a elaboração dos resumos alternativos, seria necessário localizar manualmente o metadado completo no repositório da INDE para consultar o conteúdo de outros elementos.

Os resumos foram reescritos, mantendo os textos originais da INDE e adicionando as informações ausentes a partir das orientações do PMGB em uma versão e na outra acrescentadas de acordo com as recomendações sugeridas neste estudo.

Essa medida foi tomada para minimizar a influência da forma da escrita de um autor para outro, a fim de que o respondente avaliasse exclusivamente a estrutura de preenchimento do conteúdo apresentado no resumo. A seguir as principais perguntas do formulário para a seção de comparação de resumos.

3. Qual opção de Resumo você considera mais representativa e clara?

- O Modelo Digital de Elevação, que integra o projeto RJ-25, representa o modelo numérico das características altimétricas da superfície, articuladas por folhas segundo o recorte do mapeamento sistemático brasileiro. Abrange um quadrilátero geográfico de 07°30' de latitude por 07°30' de longitude;
- O Modelo Digital de Elevação, que integra o projeto RJ-25, representa o modelo numérico das características altimétricas da superfície, articuladas por folhas segundo o recorte do mapeamento sistemático brasileiro. Abrange um quadrilátero geográfico de 07°30' de latitude por 07°30' de longitude na localidade da Fo-

lha de Guaçuí. Este recurso foi criado em 2008/08/08 com a escala de 1:25.000 e o nome da série é Modelo Digital de Elevação 1:25.000, desenvolvido no IBGE pela Coordenação de Cartografia. Fotografias aéreas obtidas a partir de aerolevanteamento executado pela empresa Base Aerofotogrametria e Projetos S.A. foram utilizadas como fonte de dados;

- O Modelo Digital de Elevação, que integra o projeto RJ-25, abrange um quadrilátero geográfico de 07°30' de latitude por 07°30' de longitude, cobrindo a área da Folha Guaçuí. Este recurso foi criado em 08/08/2008 com a escala de 1:25.000, incluído na série Modelo Digital de Elevação 1:25.000, desenvolvido no IBGE pela Coordenação de Cartografia. Fotografias aéreas obtidas a partir de aerolevanteamento executado pela empresa Base Aerofotogrametria e Projetos S.A. foram utilizadas como fonte de dados. Esse levantamento tem o objetivo de representar através de um modelo numérico, as características altimétricas da superfície.

4. Qual opção de Resumo você considera mais representativa e clara?

- Diversos estados monitoram hoje a qualidade das águas superficiais em seu território e repassam os dados para a ANA. No entanto, em perspectiva nacional, nem sempre é possível comparar os dados gerados já que os estados adotam diferentes critérios, metodologias e parâmetros, não havendo uma padronização em escala de País. A Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade das Águas (RNQA) é o principal componente do Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas (PNQA), e tem como principal objetivo padronizar e ampliar o monitoramento no País, eliminando as lacunas temporais e geográficas existentes. Os pontos da RNQA foram determinados a partir de uma metodologia de alocação de pontos desenvolvida pela ANA e foram posteriormente analisados juntamente com todos os estados e o Distrito Federal para buscar aproveitar os pontos de monitoramento das redes já existentes. Além disso, a ANA é responsável pela operação da Rede Hidrometeorológica Nacional, que contém estações fluviométricas e gera informações de vazão de rios em todo o País. Em parte dessas estações, aproximadamente 1600, há também o monitoramento de quatro parâmetros de qualidade de água medidos

com sondas multiparamétricas (Oxigênio Dissolvido, Turbidez, Temperatura e pH);

- Diversos estados monitoram hoje a qualidade das águas superficiais em seu território e repassam os dados para a ANA. No entanto, em perspectiva nacional, nem sempre é possível comparar os dados gerados já que os estados adotam diferentes critérios, metodologias e parâmetros, não havendo uma padronização em escala de País. A Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade das Águas (RNQA) é o principal componente do Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas (PNQA), e tem como principal objetivo padronizar e ampliar o monitoramento no País, eliminando as lacunas temporais e geográficas existentes. Os pontos da RNQA foram determinados a partir de uma metodologia de alocação de pontos desenvolvida pela ANA e foram posteriormente analisados juntamente com todos os estados e o Distrito Federal para buscar aproveitar os pontos de monitoramento das redes já existentes. Além disso, a ANA é responsável pela operação da Rede Hidrometeorológica Nacional, que contém estações fluviométricas e gera informações de vazão de rios em todo o País. Em parte dessas estações, aproximadamente 1600, há também o monitoramento de quatro parâmetros de qualidade de água medidos com sondas multiparamétricas (Oxigênio Dissolvido, Turbidez, Temperatura e pH). Este dado compreende o território brasileiro. A data identifica quando o recurso foi emitido em 2016-03-22, com a escala 1:1000000, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas;

- Os pontos da Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade das Águas (RNQA) foram determinados a partir de uma metodologia de alocação de pontos desenvolvida pela ANA e foram posteriormente analisados juntamente com todos os estados e o Distrito Federal para buscar aproveitar os pontos de monitoramento das redes já existentes. O recurso foi emitido em 2016-03-22, com a escala 1:1000000, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas. Esse levantamento tem o objetivo de disponibilizar informações geoespaciais sobre o panorama dos recursos hídricos no Brasil.

5. Qual opção de Resumo você considera mais representativa e clara?

• **ÍNDICE DE ATENDIMENTO URBANO DE ÁGUA – IN023.** Indicador do Sistema Nacional de informações sobre Saneamento SNIS. Fórmula de cálculo.  $IN023 = AG026\_R / G06a * 100$ . Unidade percentual. Ano de referência 2011. A pesquisa abrangeu 4864 municípios, perfazendo 87% do universo amostral possível. A escala desse dado é 1:2500000, desenvolvido pelo Ministério das Cidades. Este levantamento teve o objetivo de gerar informações necessárias para ações relativas ao uso futuro da terra;

• **ÍNDICE DE ATENDIMENTO URBANO DE ÁGUA – IN023.** Indicador do Sistema Nacional de informações sobre Saneamento SNIS. Fórmula de cálculo.  $IN023 = AG026\_R / G06a * 100$ . Unidade percentual. Ano de referência 2011. A pesquisa abrangeu 4864 municípios, perfazendo 87% do universo amostral possível. A escala desse dado é 1:2500000, desenvolvido pelo Ministério das Cidades;

• **ÍNDICE DE ATENDIMENTO URBANO DE ÁGUA – IN023.** Indicador do Sistema Nacional de informações sobre Saneamento SNIS. Fórmula de cálculo.  $IN023 = AG026\_R / G06a * 100$ . Unidade percentual. Ano de referência 2011.

6. Quais itens você julga importante no resumo? (Não há limite de opções para a resposta)

- Tema;
- Recorte espacial;
- Recorte temporal;
- Data;
- Nome da série;
- Escala;
- Produto;
- Produtor e entidade responsável;
- Fontes utilizadas;
- Contextualização;
- Status;
- Sistema de referência;
- Formato de distribuição;
- Tipo de representação;
- Idioma.

O respondente foi incentivado a contribuir com a construção das recomendações de resumos, sendo aberta a oportunidade de interação a partir de uma pergunta subjetiva, o que permitiu a inclusão ou retirada de informações diferentes das que foram mencionadas em questões anteriores.

7. Você gostaria de acrescentar alguma informação a mais a respeito do preenchimento de Resumo?

Para quantificar a aceitação dos usuários à proposta de sistematização das estruturas de preenchimento, estabeleceu-se uma métrica de pontuação: a cada questão ou alternativa aceita pelo usuário foi atribuído o valor de 1 (um) ponto; nas respostas que geraram dúvidas sobre a opinião do usuário, foi atribuído o valor de 0,5 (meio) ponto; por último, 0 (zero) para aquelas que não foram aceitas pelos respondentes. Foram considerados os resumos validados e aprovada a sistematização do preenchimento de resumo pelos usuários, quando a pontuação era igual ou superior a 70%, esse percentual representa o quanto foram aceitas as propostas feitas neste estudo aos respondentes.

Complementando a validação das recomendações propostas, o respondente também foi consultado sobre as informações relevantes para conter em um resumo. Não foram estabelecidos limites de opções a serem escolhidas. Foram apresentadas como opções os nove itens recomendados, assim como cinco itens alheios à recomendação: status, sistema de referência, formato de distribuição, tipo de representação e idioma. Esses itens foram selecionados entre elementos do perfil MGB sumarizado [13].

O elemento de metadados Data está presente na Tabela 1 e, apesar do caráter temporal, possui um significado mais limitado que o recorte temporal, idealizado para caracterizar períodos representados no dado geográfico em vez de uma única data de referência. A questão foi apresentada de modo que os respondentes não soubessem distinguir os itens recomendados dos itens adicionais.

## 4. RESULTADOS OBTIDOS

A partir das principais recomendações para o resumo (Tabela 1) no PMGB foram extraídos os seguintes requisitos: área geográfica, data, escala, nome da série, produtor e fontes utilizadas. Essas informações foram avaliadas e foi verificado se esses elementos apareciam nos resumos, apresentados na Tabela 2.

Nota-se que área geográfica, escala e fontes utilizadas são as mais encontradas, no entanto com percentuais

inferiores a 50% de incidência. A partir desse resultado, vale ressaltar a importância de uma maior disseminação de boas práticas de preenchimento de metadados com os produtores de dados geoespaciais.

**Tabela 2** - Incidência em percentual dos requisitos para resumo no PMGB nos metadados da INDE analisados

Elemento	Requisito	INDE
Resumo	Área Geográfica	49%
	Data	22%
	Escala	33%
	Nome da série	17%
	Produtor	23%
	Fontes Utilizadas	31%

**Fonte:** elaborado pelos autores.

A análise dos resumos da amostra de metadados analisada aponta que nem todos os itens recomendados foram atendidos (Figura 2), mas também houve a aparição de itens não sugeridos como a periodicidade de atualização dos dados, os cálculos e descrições da metodologia utilizados nos atributos dos dados, os nomes de projetos mencionados em vez do nome da série, além da explicação do funcionamento desses projetos, entre outros.

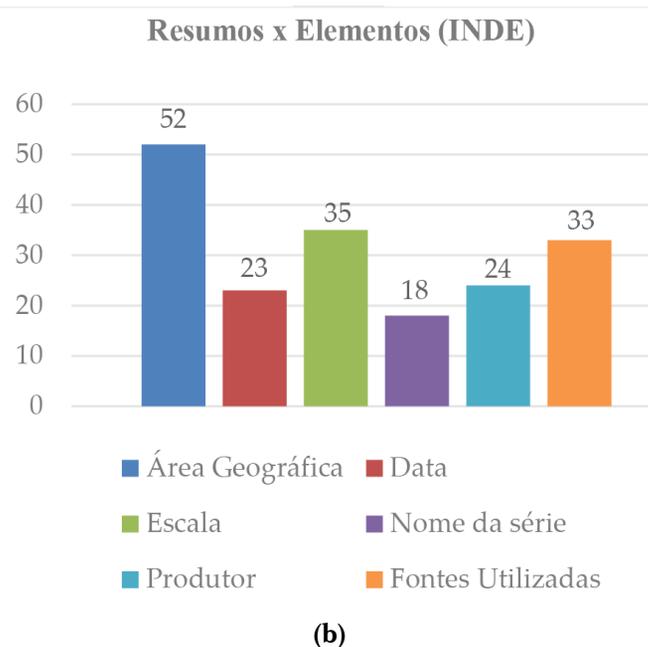
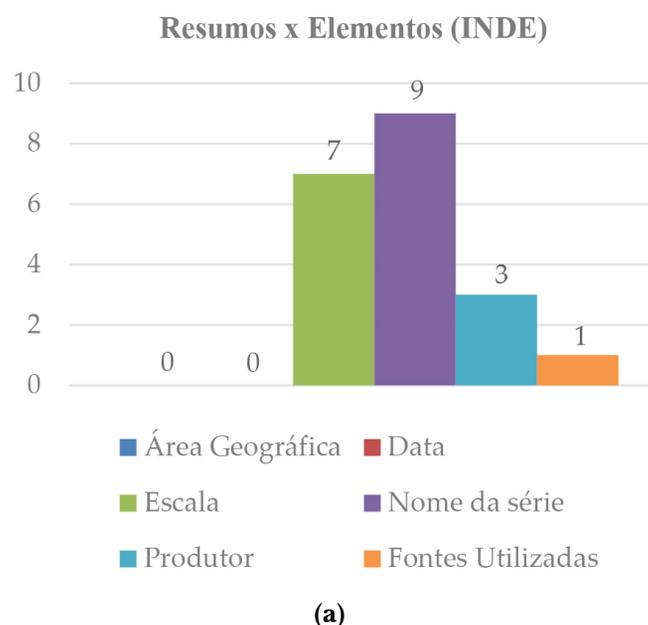
Foram obtidas 75 respostas ao questionário. Apesar de ser uma quantidade que torne a representatividade dos resultados obtidos questionável, o perfil dos respondentes é composto por 66% de professores, pesquisadores e profissionais e por cerca de 60% de pessoas com 10 ou mais anos de experiência com dados geoespaciais.

Os respondentes foram 29 professores/pesquisadores, 16 discentes de pós-graduação, 13 profissionais/produtores, 9 discentes de graduação, 7 profissionais/usuários, 1 professor do ensino médio e nenhum discente de curso técnico. Quanto ao tempo de contato com dados geoespaciais por formação ou por experiência profissional, 44 informaram possuir mais de 10 anos, 18 responderam ter entre 6 e 10 anos, 11 informaram ter entre 2 e 5 anos e 2 relataram possuírem entre 0 e 1 ano.

A caracterização dos respondentes contou com um público de diversos níveis de formação e níveis

de experiência. No entanto, a maioria foram os professores pesquisadores e um nível de experiência com mais de 10 anos. A qualificação dos respondentes e o tempo de convívio com dados geoespaciais demonstram confiabilidade nas respostas recebidas.

**Figura 2** - Comparativo entre os itens sugeridos pelo PMGB nos resumos referentes a dados (a) sistemáticos e (b) temáticos



**Fonte:** elaborado pelos autores.

O resultado da comparação entre os resumos avaliados está disposto no Quadro 1. Cada linha corresponde ao respectivo resumo, e as colunas indicam as quantidades de vezes que cada alternativa foi selecionada. É possível observar que o resumo elaborado seguindo as recomendações foi mais selecionado em todos os casos. Contudo, o resumo elaborado apenas com as recomendações do perfil MGB já apresenta ganho significativo em dois dos três resumos avaliados. O terceiro resumo se destaca dos outros dois por descrever, originalmente, o contexto de forma detalhada, sendo o único a ter alternativas de tamanho reduzido.

**Quadro 1** - Síntese das respostas quanto à preferência dos usuários quanto aos resumos apresentados

Respostas / Resumo	INDE (respostas)	PMGB (respostas)	Alternativo (respostas)
1	15	29	31
2	11	30	34
3	19	17	39

**Fonte:** elaborado pelos autores.

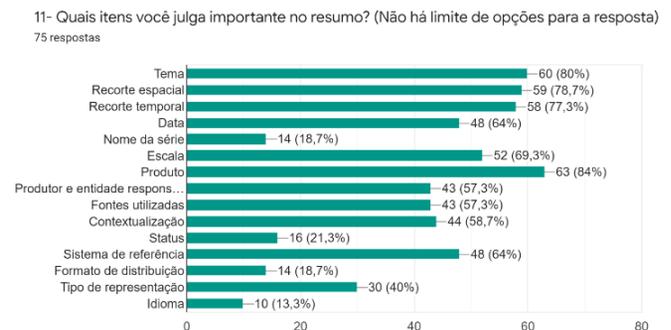
De acordo com a pontuação estabelecida para quantificar a aceitação das propostas, os resumos 1 e 2 receberam 0,5 ponto, pois a diferença entre os valores da segunda e da terceira coluna são quase idênticos. Entretanto, no resumo 3, o resumo alternativo baseado nas recomendações foi selecionado como preferido por mais da metade dos respondentes. Isso significa a atribuição de 1 ponto para esse resumo.

A segunda etapa da validação consistiu em consultar a opinião dos usuários quanto aos itens julgados importantes na elaboração de um resumo claro e abrangente. O gráfico ilustrado na Figura 3 contém a compilação das respostas.

No quarto quartil de respostas, com os itens mais selecionados pelos respondentes, encontram-se os itens produto, tema, recorte espacial e recorte temporal (mais de 77% de seleções), todos incluídos nas recomendações. No terceiro quartil de respostas, encontram-se os itens escala, data e sistema de referência (mais de 59% de seleções). Com exceção do sistema de referência, estes itens constam entre as recomendações

especificadas no Perfil MGB. Cabe destacar que os usuários trataram o item recorte temporal (proposto como o período representado no dado geográfico) diferentemente de data (proposto como elemento de metadado indicado na Tabela 1, remetendo a uma única data, que pode ser a de publicação do dado ou do insumo mais antigo utilizado). No segundo quartil de respostas (mais de 31% de seleções), constam os elementos produtor, fontes e contextualização (recomendados nas especificações do PMGB) e o formato de representação (não citado naquelas recomendações). Itens como nome de série, formato de distribuição, status e idioma foram os menos selecionados.

**Figura 3** - Representação da escolha dos requisitos mais importantes para o resumo



**Fonte:** elaborado pelos autores.

Uma análise desse resultado é que nem todos os elementos recomendados foram os mais votados pelos respondentes, de modo que os itens Data e Sistema de Referência constam dentre os itens mais indicados, em detrimento dos itens Fontes e Contextualização.

A validação dos resumos acumulou 10 pontos de 13 pontos e uma aceitação com o respondente de 84,6%.

## 5. Conclusões

O movimento de dados abertos geoespaciais tem motivado cada vez mais o compartilhamento de dados. Logo, a forma como são descritos os metadados tornou-se primordial, pois tem relação direta com a capacidade do motor de busca de localizar o material disponibilizado na internet.

Atualmente, as instruções de preenchimento de metadados apresentadas no Perfil MGB não são suficientes para descrever de forma eficiente as características interessantes do produto para seus usuários. Além disso, alguns fatores são considerados prejudiciais nesse processo: produtores que empregam as recomendações do PMGB a partir de critérios próprios, ou seja, de forma subjetiva; as recomendações precisam ser revisadas periodicamente para acompanhar as evoluções tecnológicas, que cada vez mais são constantemente atualizadas; o ambiente diverso da INDE, no qual foi observado a multiplicidade de consumidores e produtores de dados, que possuem formações e expertises diferentes; dentre outros fatores.

O objetivo proposto para este trabalho foi sugerir diretrizes de preenchimento do elemento de metadados Resumo, no contexto de uma IDE, com o intuito de tornar a descrição do CDG mais atrativa para usuários humanos e máquinas.

Para tanto, foram levantadas as recomendações de preenchimento dos resumos no PMGB, estabelecidos critérios de análise dos resumos disponibilizados no catálogo INDE e desenvolvidas orientações de preenchimento baseada em técnicas de SEO, no PMGB e nos resumos analisados da INDE. A análise realizada indicou a necessidade de os produtores inserirem no resumo um conteúdo que mencione tema, produto, recorte espacial, recorte temporal, escala, nome de série, produtor, fontes utilizadas e contextualização.

Considerando que os motores de busca estão em constantes alterações, nas quais evocam um contínuo re-

finamento para as técnicas de SEO, o principal foco foi dirigido à qualidade do conteúdo útil ao público que se deseja alcançar. Em termos concretos, compartilhar informações relevantes para quem gerou os dados e quem irá utilizar. Verificou-se, nas respostas obtidas junto aos consumidores e produtores consultados, ganho de representatividade nos resumos alternativos propostos, ou seja, os respondentes validaram as recomendações propostas com a preferência dos requisitos produto e tema.

Com base nesse conhecimento, foram desenvolvidas orientações de preenchimento de metadados para resumos de dados geoespaciais com uma linguagem simples e natural aos usuários e que visavam atender as demandas dos motores de busca. Tais recomendações podem ser empregadas no desenvolvimento de soluções para sugestão de resumos para recursos geoespaciais publicados em uma IDE ou em um catálogo de produtos geoespaciais na Web.

Por fim, é necessário salientar que este tema requer constante atualização, uma vez que o volume de dados disponibilizados aumenta diariamente e que o perfil dos agentes produtores e consumidores se altera continuamente. Alguns aperfeiçoamentos no método apresentado neste trabalho incluem a utilização de técnicas de análise complementares, assim como a experimentação de outras bases de dados, no aprofundamento e acréscimo de elementos de metadados geoespaciais, no desenvolvimento de técnicas de processamento de linguagem natural, legibilidade por máquina em comparação com linguagem natural, na automatização de resumos, entre outros.

## Referencias

- [1] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Acesso e uso de dados geoespaciais, Manuais técnicos em Geociências*. n. 14. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101675.pdf> Acesso em: 20 out. 2021.
- [2] BENJELLOUN, O.; CHEN, S.; NOY, N. Google Dataset Search by the Numbers. *arXiv*, Cornell University, Nova York, 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.06894>
- [3] CENDÓN, B. V. Ferramentas de busca na Web. *Ciência da Informação*, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 39-49, 2001.
- [4] GOOGLE. Home Search Work. *Google*, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://www.google.com/search/howsearchworks/crawling-indexing/> Acesso em: 18 dez. 2019
- [5] CAHILL, K.; CHALUT, R. Optimal results: what libraries need to know about google and search engine optimization. *The Reference Librarian*, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 234–247, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/02763870902961969>
- [6] SHIH, B.-Y.; CHEN, C.-Y.; CHEN, Z.-S. Retracted: An empirical study of an Internet Marketing Strategy for Search Engine Optimization. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 528–540, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/hfm.20348>

- [7] ZILINCAN, J. Search engine optimization. *CBU International Conference Proceedings*, [s. l.], v. 3, p. 506–510, 2015. DOI: <https://doi.org/10.12955/cbup.v3.645>
- [8] TAYLOR & FRANCIS. *Writing your paper*. Milton Park: Taylor & Francis, 2021. Disponível em: <https://author-services.taylorandfrancis.com/resources/writing-paper-ebook/>. Acesso em: 2 mar. 2021.
- [9] GABRIEL, M. *Marketing na era digital: conceitos, plataformas e estratégias*. São Paulo: Novatec, 2010.
- [10] Katumba, S.; Coetzee, S. Empregando técnicas de otimização de mecanismos de busca (SEO) para melhorar a descoberta de recursos geoespaciais na Web. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, [s. l.], v. 6, n. 9, p. 284, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi6090284>
- [11] ROCK CONTENT. SEO 2.0: o guia definitivo e atualizado para conquistar a primeira página do Google. Ebook. Disponível em: <https://rockcontent.com/materiais-educativos/seo-o-guia-definitivo-da-rock-content/>. Acesso em: 10 ago. 2019.
- [12] CENTRAL DA PESQUISA GOOGLE. Conjunto de dados. *Google*, [s. l.], 2021 Disponível em: <https://developers.google.com/search/docs/advanced/structured-data/dataset>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- [13] TAYLOR & FRANCIS. *Writing your paper*. Abingdon: Taylor & Francis, 2021. Disponível em: <https://author-services.taylorandfrancis.com/resources/writing-paper-ebook/>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- [14] OSGeo – OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION. Layer. 2024. Disponível em: <https://docs.geoserver.org/stable/en/user/data/webadmin/layers.html>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [15] PRADO, B. R.; HAYAKAWA, E. H.; BERTANI, T. C.; SILVA, G. B. S.; PEREIRA, G.; SHIMABUKURO, Y. E. Padrões para metadados geográficos digitais: modelo ISO 19115:2003 e modelo FGDC. *Revista Brasileira de Cartografia*, Uberlândia, v. 62, n. 1, p. 33-41, 2010. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv62n1-43665>
- [16] IFLA – International Federation of Library Associations and Institutions. ISBD International Standard Bibliographic Description. *IFLA*, [s. l.], 2011. Disponível em: <https://repository.ifla.org/bitstream/123456789/786/1/ifla-isbd-international-standard-bibliographic-description-2011.pdf>. Acesso em: 14 out. 2019.
- [17] DCMI – Dublin Core Metadata Initiative. 2022. Disponível em: <https://dublincore.org/specifications/dublin-core/>. Acesso em: 16 mar. 2022.
- [18] FGCD – Federal Geographic Data Committee. Content Standard for Digital Geospatial Metadata. *FGCD*, Washington DC, 1998. Disponível em: [https://www.fgdc.gov/standards/projects/metadata/base-metadata/v2\\_0698.pdf](https://www.fgdc.gov/standards/projects/metadata/base-metadata/v2_0698.pdf). Acesso em: 30 jun. 2019.
- [19] ISO 19115. Geographic Information – Metadata. 2003.
- [20] CONCAR – Comissão Nacional de Cartografia. *Perfil de Metadados Geoespaciais do Brasil*. Perfil MGB. Brasília, DF: Ministério do Planejamento, 2009.
- [21] ISO 19115. Geographic Information -Metadata. 2014. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/53798.html>. Acesso em: 23 mai. 2019.
- [22] DCMI – Dublin Core Metadata Initiative. 2022. Disponível em: <https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/dcmi-terms/terms/abstract/>. Acesso em: 12 jul. 2022.
- [23] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA *Modelo Digital de Elevação 1:25.000 - GUAÇUÍ SF-24-V-A-IV-4-NO 2613-4-NO*. 2008. Disponível em: <https://metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/ea5778a6-e4db-495a-9b1c-f7a22976921f>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [24] MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO. *Índice de atendimento urbano de água com rede de abastecimento - Valor realizado*. 2011. Disponível em: <https://metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/e466791c-0a49-4a8f-b8fe-e31f8a16bf15>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [25] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Evolução da Rede de Monitoramento de Qualidade da Água*. 2015. Disponível em: <https://metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/5f5da94d-f61b-4706-857f-63f7152618eb>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [26] GOTTARDO, T. V. *Proposta de metodologia para avaliação de ide através de indicadores sobre a disseminação de dados especiais*. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018.
- [27] SILVA, H.; SERRONHA, A. *Metadados Inspire*. Portugal: Direção-Geral do Território, CCDR-LVT, CCDR Algarve, CCDR Norte, CCDR Centro, CCDR Alentejo, 2015.
- [28] INSPIRE – Infrastructure for Spatial Information in Europe. *Technical Guidance for the implementation of INSPIRE dataset and service metadata based on ISO/TS 19139:2007*. [S. l.]: INSPIRE, 2017.
- [29] GOBIERNO DE ESPAÑA, Catálogo de Datos y Servicios IDEE. Disponível em: <https://www.idee.es/csw-inspire-idee/srv/por/catalog.search;jsessionid=9F3F01DDBFAD57D7FDB569FCD810EA47#/home>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- [30] VIEIRA, S. *Como elaborar questionários*. São Paulo: Atlas, 2009.

# Pralidoxima: revisão sobre sua síntese e propriedades antidotais contra agentes neurotóxicos de guerra

Pedro Augusto Gomes Buitrago<sup>1\*</sup>, Samir Frontino de Almeida Cavalcante<sup>1</sup>, Valdir Florêncio da Veiga Júnior<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Instituto de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear; Centro Tecnológico do Exército; Instituto Militar de Engenharia

Avenida das Américas, 28705, CEP 23020-470, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Praça General Tibúrcio, 80, CEP 222290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

\*pedro@ime.eb.br

**RESUMO:** A acetilcolinesterase (AChE), enzima presente nos sistemas nervosos central (SNC) e periférico, é estudada em pesquisas relacionadas à doença de Alzheimer e à doença de Parkinson. Os inibidores de AChE podem ser naturais ou sintéticos, como os organofosforados desenvolvidos para o uso como armas químicas ou pesticidas, sendo estes menos tóxicos. A inibição por organofosforados ocorre irreversivelmente através da formação de uma ligação entre o átomo de fósforo e a hidroxila do resíduo de serina presente no sítio ativo da AChE. Com isso, a AChE perde sua capacidade de cumprir sua função fisiológica nas transmissões colinérgicas, podendo levar à parada respiratória e morte. Os reativadores de AChE, devido ao seu forte caráter nucleofílico, conseguem romper a ligação entre o resíduo de serina e o aduto, restabelecendo a atividade enzimática. Este trabalho aborda diferentes metodologias sintéticas e propriedades biológicas da pralidoxima, o primeiro reativador de AChE empregado clinicamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acetilcolinesterase. Antídoto. Oxima. Organofosforado. Pralidoxima. Reativador Quaternário.

**ABSTRACT:** Acetylcholinesterase (AChE) is an enzyme in the central and peripheral nervous systems that has been studied in fields of research such as that for Alzheimer's and Parkinson's diseases. AChE inhibitors may be either natural or synthetic, which is the case of the organophosphorus compounds, developed as chemical weapons or pesticides, the latter of which is less toxic. The inhibition of organophosphorus is irreversible and is carried out by binding the phosphorus atom to the hydroxyl group of the serine residue within the active site of the AChE, thus preventing AChE from fulfilling its physiological task in cholinergic transmissions, possibly leading to respiratory failure and death. Due to their strong nucleophilic character, AChE reactivators can cleave the bond between the serine residue and the adduct, reestablishing enzymatic activity. This study describes the biological properties and the diverse synthetic methods for pralidoxime, the first AChE reactivator clinically applied.

**KEYWORDS:** Acetylcholinesterase. Antidote. Oxime. Organophosphorus. Pralidoxime. Quaternary reactivator.

## 1. Introdução

### 1.1 Estrutura e função da acetilcolinesterase e acetilcolina

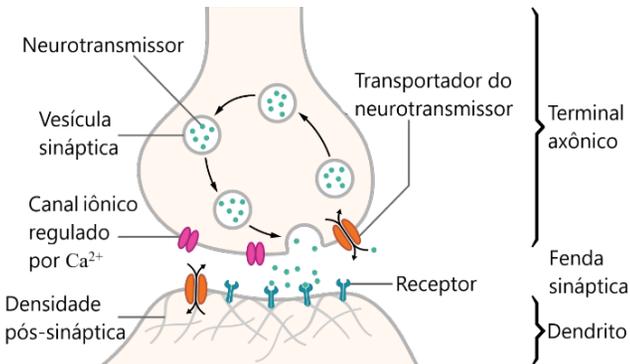
A acetilcolinesterase (AChE; E.C. 3.1.1.7) é uma enzima da classe das hidrolases, responsáveis pela hidrólise de ésteres de ácidos carboxílicos [1], cujo sítio ativo é composto por uma tríade catalítica contendo resíduos de serina, histidina e glutamato, sendo o resíduo de serina o responsável pelo ataque ao éster carboxílico [2]. Sua atuação ocorre nos sistemas nervosos central e periférico, bem como nas junções neuromusculares em que, em conjunto com os receptores de acetilcolina (ACh)

muscarínicos e nicotínicos, a AChE regula a transmissão de impulsos elétricos (potenciais de ação) ao longo das sinapses neuromusculares. A função fisiológica da AChE é a hidrólise do neurotransmissor ACh, pondo fim aos potenciais de ação gerados pelo estímulo aos receptores colinérgicos. A enzima atua quando da liberação da ACh pelo neurônio pré-sináptico em resposta a um potencial de ação, impedindo o acúmulo do neurotransmissor na fenda sináptica (Fig. 1) [3]–[5].

A ACh é transportada ao longo da sinapse e, ao ligar-se aos seus receptores, leva, dentre outras respostas, a um influxo de íons K<sup>+</sup> no processo nervoso pós-sináptico ou em uma célula muscular. Este processo dá início aos potenciais de ação na célula pós-

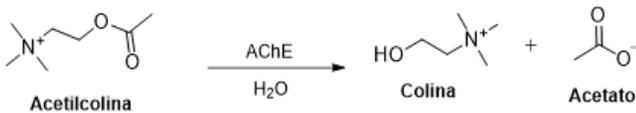
-sináptica, o qual é rapidamente cessado pela atuação da AChE ao hidrolisar a ACh em seus produtos de decomposição, colina e acetato (Fig. 2), os quais são utilizados para regenerar a ACh no nervo periférico [3, 4].

**Fig. 1** - Estrutura de uma sinapse, em que ocorre a liberação e a captação de um neurotransmissor



Fonte: [6]

**Fig. 2** - Hidrólise enzimática da acetilcolina em seus precursores: acetato e colina.



Fonte: elaborado pelos autores

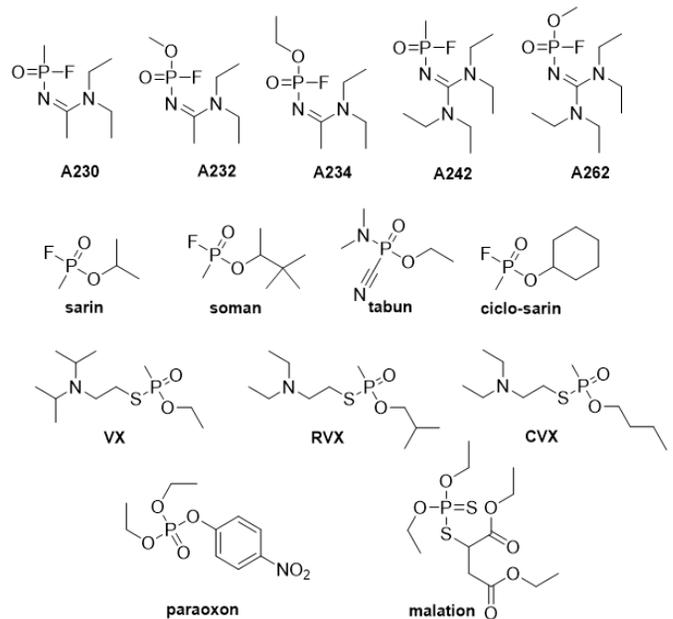
## 1.2 Inibição da acetilcolinesterase

A inibição da AChE provoca um acúmulo do neurotransmissor ACh na fenda pós-sináptica, levando à hiperestimulação dos receptores colinérgicos (muscarínicos e nicotínicos). Tal inibição pode ser reversível, sendo, portanto, temporária, como ocorre no caso das terapias para o tratamento da doença de Alzheimer (DA), em que inibidores reversíveis como donepezila, galantamina e rivastigmina são empregados, abordagem conhecida como “hipótese colinérgica” [7] mainly affecting older people. The unclear root cause and involvement of various enzymes in the pathological conditions confirm the complexity of the disease. Quantitative structure-activity relationship (QSAR).

No entanto, no caso de intoxicação por pesticidas (paraoxon, malation; Fig. 3) ou agentes neurotóxicos, a inibição ocorre de forma irreversível. Embora os pesticidas sejam menos tóxicos do que os agentes neurotóxicos, ambas as intoxicações podem levar ao mau funcionamento do sistema nervoso central (SNC) e de junções neuromusculares, podendo ser letal [8], [9].

Os agentes neurotóxicos são substâncias organofosforadas que podem ser divididas em três séries: a mais antiga, conhecida como série G (sarin, soman, tabun e ciclo-sarin, dentre outros), compostos dotados de volatilidade nas condições normais de temperatura e pressão; a série V (VX, RVX e CVX, por exemplo) (Fig. 3), mais persistente no ambiente [10] e.g. in Alzheimer’s disease, Parkinson’s disease, or in eco-toxicology as a biological marker. Many inhibitors of AChE have been identified in nature as well as prepared in chemical labs as a result of systematic synthetic efforts. The organophosphorus (OP; e a série A, cujas substâncias são conhecidas como Novichoks (Fig. 3) [11], acrescentada em junho de 2020 ao Anexo 1 da Convenção de Proibição de Armas Químicas (CPAQ) [12].

**Fig. 3** - Estruturas dos agentes neurotóxicos das séries G, V e A e de exemplos de pesticidas

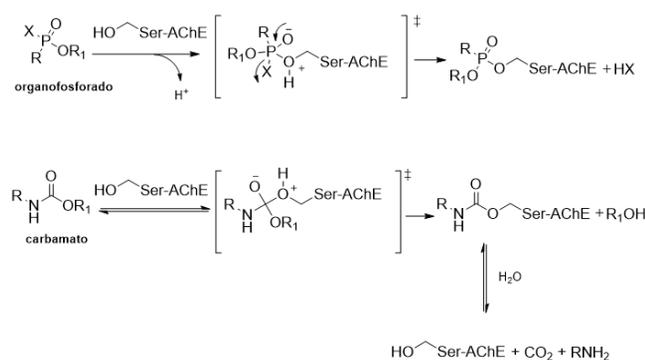


Fonte: elaborado pelos autores.

A inibição da AChE se dá pela formação de uma ligação covalente entre o organofosforado e a hidroxila do resíduo de serina no sítio ativo da enzima, o que impossibilita a interação da enzima com a molécula de ACh (Fig. 4). O acúmulo deste neurotransmissor resulta em hiperestimulação de receptores colinérgicos, falha da transmissão sináptica colinérgica, paralisia muscular e comprometimento do SNC. Tais efeitos perfazem a “síndrome colinérgica”, cujos sintomas representativos são a miose (contração pupilar), salivação excessiva, bradicardia, diarreia, êmese e broncoconstrição, causados pela hiperestimulação dos receptores muscarínicos; também causam convulsões, paralisia e disfunções musculares, provocadas pela hiperestimulação dos receptores nicotínicos. A ação nas junções neuromusculares da musculatura lisa do diafragma pode levar a morte por parada respiratória [13], [14].

A reação de inibição da AChE segue um mecanismo de adição e eliminação (Fig. 4), em que a hidroxila do resíduo de serina da AChE se liga ao sítio eletrofílico do inibidor, seguido da eliminação de um grupo de saída. No caso de inibidores irreversíveis, como organofosforados, o grupo de saída pode ser, por exemplo, um halogênio (fluoreto no caso de sarin e soman, Fig. 3) ou um cianeto (tabun, Fig. 3). No caso de inibidores reversíveis, como carbamatos, o grupo de saída é um alcóxido [8], [15], [16].

**Fig. 4 -** Reações da AChE com inibidores irreversíveis e reversíveis.



**Fonte:** elaborado pelos autores.

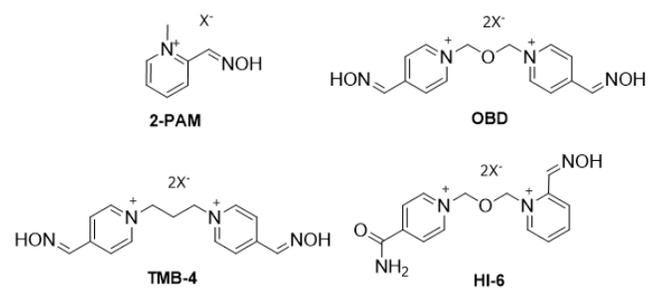
### 1.3 Reativação da acetilcolinesterase

Visando evitar a letalidade da intoxicação por organofosforados, a administração de medidas médi-

cas deve ser realizada o mais breve possível, principalmente nos casos em que a AChE pode sofrer um processo chamado de “envelhecimento”, situação na qual os antídotos disponíveis na clínica perdem sua capacidade de atuação, sendo o soman um dos agentes mais propensos a causar tal fenômeno. A rápida ação medicamentosa permite ainda a redução de riscos relacionados à problemas neurológicos que afligem vítimas de agentes neurotóxicos [17], [18]. Além de um agente antimuscarínico (atropina), o qual age antagonizando os efeitos do excesso de neurotransmissor na fenda sináptica, e de um anticonvulsivante (diazepam), faz-se essencial a administração de um antídoto reativador de AChE de maneira a reverter o quadro de intoxicação [19].

Os reativadores da AChE devem possuir um forte caráter nucleofílico para que sejam capazes de quebrar a forte ligação P-O entre o organofosforado e o resíduo de serina da tríade catalítica da AChE. Tal característica se faz presente nas oximas catiônicas derivadas de aldeídos piridínicos, única classe de substância empregada clinicamente no tratamento de intoxicação por agentes neurotóxicos, dentre as quais encontram-se disponíveis no mercado a pralidoxima (2-PAM), obidoxima (OBD), trimedoxima (TMB-4) e asoxima (HI-6) (Fig. 5) [20]–[23].

**Fig. 5 -** Reativadores clínicos de acetilcolinesterase (X: Cl<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>, MsO<sup>-</sup>).

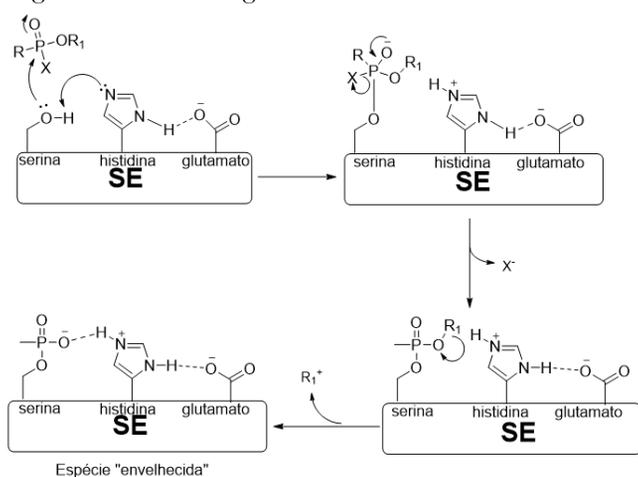


**Fonte:** elaborado pelos autores.

Apesar destas oximas serem empregadas em clínica, elas têm limitações como elevada toxicidade, restringindo sua dosagem ao paciente, e espectro limitado de atuação contra organofosforados estru-

turalmente distintos, não havendo ainda uma oxima de amplo espectro de reativação [13]. Outras limitações incluem a sua baixa penetração da barreira hematoencefálica em virtude de seu caráter catiônico e a impossibilidade de reativar a forma “envelhecida” de AChE, causada pela desproporção do aduto enzimático formado. O processo de “envelhecimento” consiste na desalquilação do aduto fosforado da AChE inibida (Fig. 6). De forma a melhorar o espectro de reativação das oximas clínicas atuais, pode-se combinar uma ou mais delas em caso de AChE inibida por diferentes agentes neurotóxicos [24], [25].

**Fig. 6** - Mecanismo de inibição da AChE por um organofosforado seguido de seu envelhecimento.



**Fonte:** elaborado pelos autores.

## 2. Pralidoxima – propriedades e síntese

### 2.1 Propriedades biológicas

A 2-PAM, sintetizada nos Estados Unidos em 1955 [20], foi a primeira molécula capaz de reativar a AChE inibida por organofosforado a encontrar aplicação clínica. Por se tratar de uma oxima catiônica, ela é encontrada na forma de um sal, podendo estar associada aos ânions cloreto, iodeto, metilsulfato ou mesilato. A 2-PAM é empregada não só pelo Exército Brasileiro, mas também pelos exércitos dos Estados

Unidos, França e Reino Unido, além de estar listada no RENAME (Relação Nacional de Medicamentos Essenciais) do Ministério da Saúde [10], [26], [27] e.g. in Alzheimer's disease, Parkinson's disease, or in ecotoxicology as a biological marker. Many inhibitors of AChE have been identified in nature as well as prepared in chemical labs as a result of systematic synthetic efforts. The organophosphorus (OP).

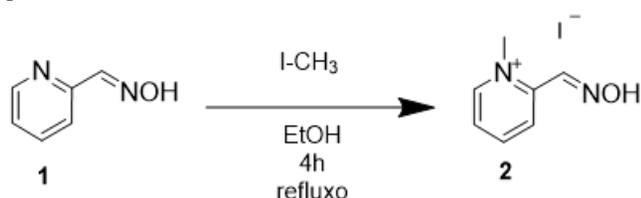
A pralidoxima demonstrou eficácia na reativação da AChE inibida por sarin ou VX, especialmente quando combinada com atropina [28], [29], porém não é adequada na reativação da enzima inibida por tabun ou soman [30], o que reitera a ausência de um “antídoto universal” [13]. Outra limitação deste reativador reside em sua baixa taxa de penetração da barreira hematoencefálica, dada pela presença de um nitrogênio positivamente carregado. Sakurada e colaboradores [31] determinaram que tal taxa seja de aproximadamente 10%, porém estudos posteriores sugerem que este valor esteja superestimado [32]. Esta limitação farmacocinética é comum a todos os reativadores de AChE disponíveis em clínica, o que propulsiona a pesquisa de novos compostos cada vez mais ativos e eficientes para reativação do SNC.

A administração da 2-PAM em humanos a uma dose de 10 mg/kg levou a concentrações maiores do que 4 µg/ml no plasma sanguíneo em menos de 10 minutos, o que se manteve pelos 50-55 minutos subsequentes em decorrência de sua elevada estabilidade em água [33], [34]. O emprego deste reativador pode incluir efeitos colaterais como tontura, visão embaçada, diplopia (visão dupla), náusea e dores de cabeça [33], [35].

### 2.2 Metodologias sintéticas para a pralidoxima

Green e colaboradores [36] descreveram, em 1956, uma síntese do iodeto de pralidoxima (2) na qual reagiu-se 2-piridinaldoxima (1) com iodeto de metila em etanol sob refluxo durante 4 horas (Fig. 7). O grupo de pesquisa também apresentou uma possível interação entre oximas e o agente neurotóxico sarin. O rendimento da reação não foi reportado no artigo.

**Fig. 7** - Síntese do iodeto de pralidoxima proposta por Green.

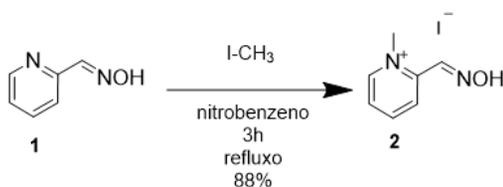


**Fonte:** elaborado pelos autores.

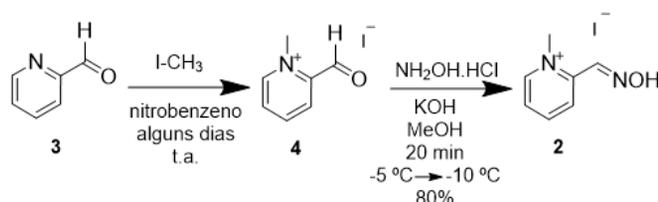
Em 1957, Ginsburg e colaboradores [37] descreveram a síntese da pralidoxima e de diversos outros derivados desta. Para a síntese do iodeto de pralidoxima, três rotas sintéticas diferentes foram apresentadas (Fig.8).

**Fig. 8** - Três diferentes rotas sintéticas para o iodeto de pralidoxima apresentadas por Ginsburg.

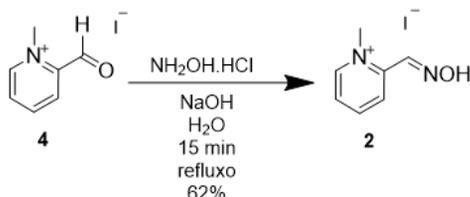
Método 1:



Método 2:



Método 3:



**Fonte:** elaborado pelos autores.

No 1º método, **1** reage com excesso de iodeto de metila em nitrobenzeno por 3h com refluxo, formando **2** com um rendimento de 88% (Fig.8) [37].

Em seguida no 2º método, reagiu-se 2-piridina-carboxaldeído (**3**) com excesso de iodeto de metila em nitrobenzeno com agitação durante alguns dias a temperatura ambiente. O produto obtido (iodeto de

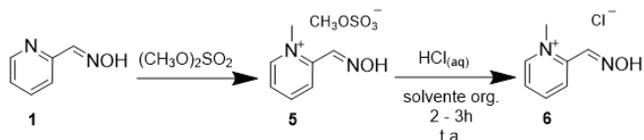
2-formil-1-metil piridínio, **4**) foi precipitado utilizando-se acetona. Na etapa seguinte, **4** foi adicionado a uma solução metanólica de cloridrato de hidroxilamina e hidróxido de potássio a -5 °C e deixado sob agitação por 20 minutos enquanto a temperatura reduzia até -10 °C. O produto foi precipitado em éter dietílico, obtendo-se 80% de rendimento (Fig. 8).

No 3º método, reagiu-se **4** com excesso de cloridrato de hidroxilamina em água por 15 minutos sob refluxo seguido de um ajuste de pH a uma faixa de 6-7 usando-se uma solução de hidróxido de sódio. A oxima foi recristalizada por metanol ou etanol, chegando-se a um rendimento de 62% (Fig.8).

Em 1964, uma rota inovadora foi proposta por Bloch para a síntese do cloreto de pralidoxima (**6**) [38]. Anteriormente, **6** era sintetizado a partir da reação de uma solução de **2** com cloreto de prata sólido. Então o iodeto de prata formado era filtrado e a solução aquosa evaporada até a secura a baixas temperaturas. A desvantagem deste método estava nos traços de prata remanescentes no produto, difíceis de se remover, e no fato de se utilizar um reagente caro, o cloreto de prata. Outro método de conversão do iodeto de pralidoxima no cloreto envolvia o uso de uma resina de troca aniônica, porém este método era caro e não muito prático, pois a regeneração da resina saturada de iodeto era difícil e, assim como no método anterior, também era necessário a evaporação de grandes volumes de água a baixas temperaturas. Também era feita a quaternarização direta de **1** com cloreto de metila em um reator de pressão, porém o rendimento obtido era baixo e eram necessárias sucessivas recristalizações para se alcançar uma pureza aceitável [38]. Tendo conhecimento de tais desvantagens, Bloch propôs uma metodologia sintética em que se passaria por uma etapa intermediária formando-se metilsulfato de pralidoxima (**5**) através da reação de **1** com sulfato de dimetila. A molécula **5** era então convertida em cloreto ao reagir com ácido clorídrico concentrado e um solvente orgânico miscível em água (Fig. 9). Os solventes testados foram isopropanol (rendimento de 85%), metanol (30%), etanol absoluto (70%), isobutanol (84%), propileno glicol (27%), dioxano (29%) e acetona (75%). Como **5** se mostrou significativamente

mais solúvel do que **6** nos solventes citados, ao fim da reação o produto podia ser facilmente separado por filtração e então lavado com acetona, obtendo-se um alto grau de pureza [38].

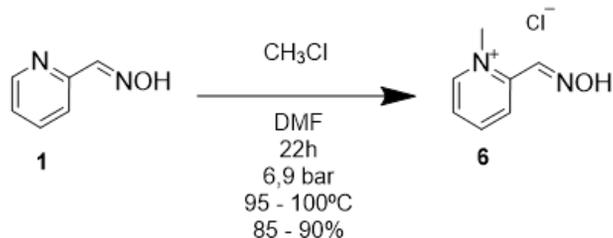
**Fig. 9** - Síntese do cloreto de pralidoxima proposta por Bloch.



**Fonte:** elaborado pelos autores.

No trabalho de Ellin e colaboradores [39], a molécula **6** foi sintetizada reagindo **1** com cloreto de metila em *N,N*-dimetilformamida (DMF) (Fig. 10). À pressão atmosférica, tanto DMF como outros solventes como acetona, etanol, tetraidrofurano e benzeno apresentaram baixos rendimentos para o método apresentado. No entanto, ao se utilizar DMF a pressões da ordem de aproximadamente 7 bar, obteve-se um rendimento em torno de quatro vezes maior do que os obtidos quando os outros solventes foram empregados. O motivo deste aumento se deve ao fato de o DMF ser um solvente polar aprótico e a reação seguir um mecanismo do tipo S<sub>N</sub><sub>2</sub>, que tem como etapa lenta a formação de um estado de transição dipolar, o qual tem sua energia diminuída pelo efeito de solvatação do DMF, levando a uma maior estabilidade [39].

**Fig. 10** - Síntese do cloreto de pralidoxima proposta por Ellin.

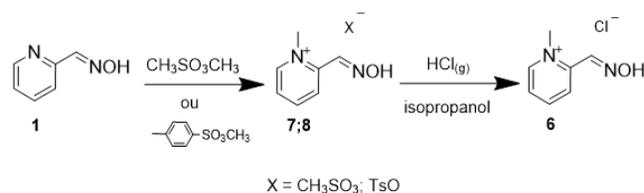


**Fonte:** elaborado pelos autores.

No estudo de Rao e colaboradores [40], tendo por objetivo a síntese do cloreto de pralidoxima através da metilação de **1**, foram testados diversos agentes de metilação tais como metanossulfonato de metila

e *para*-toluenossulfonato de metila (Fig. 11). No caso da metilação com metanossulfonato de metila, os solventes testados foram tolueno (rendimento de 70%), éter metil terc-butílico (52%), dimetoxietano (60%), acetonitrila (90%) e 1,4-dioxano (55%). Para a metilação com *para*-toluenossulfonato de metila, foram testados os solventes tolueno (91%) e acetonitrila (70%). Em todas as reações, com exceção da metilação com metanossulfonato de metila em acetonitrila, foi realizada a cristalização do produto bruto em uma solução de etanol com acetato de etila. Na etapa final, para a conversão em cloreto de pralidoxima, foi feita uma solução em isopropanol do produto da metilação, a qual foi borbulhada com gás de cloreto de hidrogênio anidro para formar **6** (Fig. 11).

**Fig. 11** - Síntese do cloreto de pralidoxima proposta por Rao.



**Fonte:** elaborado pelos autores.

### 3. Discussão

A 2-PAM faz parte de uma ampla família de compostos com forte caráter nucleofílico, capazes de reativar a AChE inibida por agentes neurotóxicos. Do ponto de vista estrutural, é empregada como um sal de amônio quaternário e possui apenas um grupo oxima, enquanto os outros três reativadores disponíveis possuem dois. A quaternarização das oximas tem a finalidade de aumentar a afinidade com o sítio catalítico aniônico da AChE, aumentar a solubilidade em água e ajustar os valores de pKa (entre 7,0 e 8,35), de modo a contribuir com o processo de reativação [41]. Uma das principais limitações das oximas catiônicas é a sua fraca penetração pela barreira hematoencefálica, o que se deve à baixa lipofilicidade e faz com que ajam predominantemente no sistema nervo-

so periférico [42]. No entanto, a 2-PAM apresentou uma penetração de 10% da barreira hematoencefálica de ratos, contra valores de 1 a 3% para as oximas biperidínicas [31], [43]. Dentre os antídotos disponíveis, tem-se a asoxima como a menos tóxica, seguida da 2-PAM, e a obidoxima e trimedoxima como as mais tóxicas [44].

Embora os antídotos de emprego clínico sejam catiônicos e possuam um ou dois anéis piridínicos, estudos recentes têm buscado reativadores de AChE com outras características estruturais. Em busca de uma maior lipofilicidade, oximas neutras e derivados de oximas contendo heterociclos com nitrogênio em sua estrutura têm sido testados como potenciais novas classes de reativadores de AChE [45]–[47]. Outros tipos de abordagens com o mesmo objetivo são dadas pela modificação estrutural das oximas catiônicas por meio da adição de átomos de flúor ligados aos anéis piridínicos e pela transformação destas oximas em pró-fármacos – fármacos administrados em uma forma inativa e ativados após uma biotransformação dentro do organismo por meio de alguma rota metabólica [48]. Além das abordagens químicas, existem também pesquisas que buscam novos métodos de administração dos antídotos, desenvolvendo técnicas que facilitem a entrada do reativador no SNC, tais como a administração intranasal [49].

No que tange as metodologias de síntese apresentadas, levando-se em consideração o número de etapas e rendimento, nota-se que as metodologias sintéticas mais eficientes foram aquelas apresentadas por Ginsburg (uma etapa; rendimento de 88%) e Ellin (uma etapa; rendimento de 85-90%).

## Referências

- [1] SCHOMBURG, I.; CHANG, A.; SCHOMBURG, D. BRENDA, enzyme data and metabolic information. *Nucleic Acids Research*, Oxford, v. 30, n. 1, p. 47–49, 2002. DOI: 10.1093/nar/30.1.47.
- [2] SOREQ, H.; SEIDMAN, S. Acetylcholinesterase: new roles for an old actor. *Nature Reviews Neuroscience*, [s.l.], v. 2, n. 4, p. 294–302, 2001. DOI: 10.1038/35067589.
- [3] FRANJESEVIC, A. J.; SILLART, S. B.; BECK, J. M.; VYAS, S.; CALLAM, C. S.; HADAD, C. M. Resurrection and reactivation of Acetylcholinesterase and Butyrylcholinesterase. *Chemistry - A European Journal*, Weinheim, v. 25, n. 21, p. 5337–5371, 2019. DOI: 10.1002/chem.201805075.
- [4] QUINN, D. M. Acetylcholinesterase: enzyme structure, reaction dynamics, and virtual transition states. *Chemical Reviews*, Washington, D.C., v. 87, n. 5, p. 955–979, 1987. DOI: 10.1021/cr00081a005.

## 4. Conclusão

Foram descritas diversas metodologias sintéticas para a 2-PAM, uma das mais relevantes dentre as oximas piridínicas disponíveis no combate à intoxicação por agentes neurotóxicos. Foram pesquisados artigos publicados desde 1955, ano em que a 2-PAM foi reportada pela primeira vez. Na discussão, as rotas sintéticas foram comparadas em termos de eficiência, levando-se em consideração o número de etapas, rendimento e a praticidade das sínteses, e foi feita uma comparação entre as propriedades e limitações da 2-PAM em relação a outros reativadores de AChE. Também foram citadas abordagens na pesquisa por novas classes de reativadores de AChE.

### Lista de abreviaturas e siglas

<b>2-PAM</b>	=	Pralidoxima
<b>ACh</b>	=	Acetilcolina
<b>AChE</b>	=	Acetilcolinesterase
<b>CPAQ</b>	=	Convenção de Proibição de Armas Químicas
<b>DA</b>	=	Doença de Alzheimer
<b>DMF</b>	=	<i>N,N</i> -Dimetilformamida
<b>EC</b>	=	Número EC (em inglês, <i>Enzyme Commission Number</i> )
<b>HI-6</b>	=	Asoxima
<b>OBD</b>	=	Obidoxima
<b>RENAME</b>	=	Relação Nacional de Medicamentos Essenciais
<b>SNC</b>	=	Sistema Nervoso Central
<b>TMB-4</b>	=	Trimedoxima

- [5] TAYLOR, P. The cholinesterases. *Journal of Biological Chemistry*, Washington, D.C., v. 266, n. 7, p. 4025–4028, 1991. DOI: 10.1016/S0021-9258(20)64277-6.
- [6] SPLETTSTOESSER, T. Schematic of a synapse. In: Wikimedia Commons, 2015. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SynapseSchematic\\_en.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SynapseSchematic_en.svg). Acesso em: 5 dez. 2020.
- [7] AMBURE, P.; ROY, K. Advances in quantitative structure-activity relationship models of anti-Alzheimer's agents. *Expert Opin on Drug Discovery*, Londres, v. 9, n. 6, p. 697–723, 2014. DOI: 10.1517/17460441.2014.909404.
- [8] DELFINO, R. T.; RIBEIRO, T. S.; FIGUEROA-VILLAR, J. D. Organophosphorus compounds as chemical warfare agents: a review. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, Campinas, v. 20, n. 3, p. 407–428, 2009. DOI: 10.1590/S0103-50532009000300003.
- [9] POHANKA, M. Cholinesterases, a target of pharmacology and toxicology. *Biomedical Papers*, [s.l.], v. 155, n. 3, p. 219–223, 2011. DOI: 10.5507/bp.2011.036.
- [10] MALINAK, D.; KORABECNY, J.; SOUKUP, O.; GORECKI, L.; NEPOVIMOVA, E. A review of the synthesis of quaternary acetylcholinesterase reactivators. *Current Organic Chemistry*, [s.l.], v. 22, n. 6, p. 1619–1648, 2018. DOI: 10.2174/1385272822666180711123529.
- [11] KLOSKE, M.; WITKIEWICZ, Z. Novichoks – The a group of organophosphorus chemical warfare agents. *Chemosphere*, [s.l.], v. 221, p. 672–682, 2019. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.054.
- [12] COSTANZI, S.; SLAVICK, C. K.; HUTCHESON, B. O.; KOBLENTZ, G. D.; CUPITT, R. T. Lists of chemical warfare agents and precursors from international nonproliferation frameworks: structural annotation and chemical fingerprint analysis. *Journal Chemical Information Modeling*, Washington, D.C., v. 60, n. 10, p. 4804–4816, 2020. DOI: 10.1021/acs.jcim.0c00896.
- [13] KONING, M. C. de; HORN, G.; WOREK, F.; VAN GROEL, M. Discovery of a potent non-oxime reactivator of nerve agent inhibited human acetylcholinesterase. *European Journal Medicinal Chemistry*, [s.l.], v. 157, p. 151–160, 2018, doi: 10.1016/j.ejmech.2018.08.016.
- [14] VITOROVIĆ-TODOROVIĆ, M. D.; WOREK, F.; PERDIH, A.; BAUK, S. D.; VUJATOVIĆ, T. B.; CVIJETIĆ, I. N. The in vitro protective effects of the three novel nanomolar reversible inhibitors of human cholinesterases against irreversible inhibition by organophosphorous chemical warfare agents. *Chemico-Biological Interactions*, [s.l.], v. 309, 108714, 2019. DOI: 10.1016/j.cbi.2019.06.027.
- [15] GREENFIELD, S.; VAUX, D. Parkinson's disease, Alzheimer's disease and motor neurone disease: identifying a common mechanism. *Neuroscience*, [s.l.], v. 113, n. 3, p. 485–492, 2002. DOI: 10.1016/S0306-4522(02)00194-X.
- [16] TOUGU, V. Acetylcholinesterase: mechanism of catalysis and inhibition. *Current Medicinal Chemistry – Central Nervous System Agents*, [s.l.], v. 1, n. 2, p. 155–170, 2005. DOI: 10.2174/1568015013358536.
- [17] YANAGISAWA, N.; MORITA, H.; NAKAJIMA, T. Sarin experiences in Japan: acute toxicity and long-term effects. *Journal of the Neurological Science*, [s.l.], v. 249, n. 1, p. 76–85, 2006. DOI: 10.1016/j.jns.2006.06.007.
- [18] YOKOYAMA, K. Our recent experiences with sarin poisoning cases in Japan and pesticide users with references to some selected chemicals. *Neurotoxicology*, [s.l.], v. 28, n. 2, p. 364–373, 2007. DOI: 10.1016/j.neuro.2006.04.006.
- [19] CANNARD, K. The acute treatment of nerve agent exposure. *Journal of the Neurological Science*, [s.l.], v. 249, n. 1, p. 86–94, 2006. DOI: 10.1016/j.jns.2006.06.008.
- [20] WILSON, I. B.; GINSBURG, B. A powerful reactivator of alkylphosphate-inhibited acetylcholinesterase. *BBA - Biochimica et Biophysica Acta*, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 168–170, 1955. DOI: 10.1016/0006-3002(55)90040-8.
- [21] POZIOMEK, E. J.; HACKLEY Jr., B. E.; STEINBERG, G. M. Pyridinium Aldoximes. *Journal of Organic Chemistry*, v. 23, n. 5, p. 714–717, 1958. DOI: 10.1021/jo01099a019.
- [22] LUTTRINGHAUS, A.; HAGEDORN, I.; ENGELHARD, H.; ENGELHARD, N. Preparation of bis-quaternary pyridinium salts. 3,187,702. Concessão: 16 jun. 1964.
- [23] OLDIGES, H.; SCHOENE, K. Pyridinium- und Imidazoliumsalsze als Antidote gegenüber Soman- und Paraoxonvergiftungen bei Mäusen. Fühner-Weilands Sammlung von Vergiftungsfällen *Archives für Toxikologie*, Welling, v. 26, p. 293–305, 1970. DOI: 10.1007/BF00577721.
- [24] AMEND, N.; NIESSEN, K. V.; SEEGER, T.; WILLE, T.; WOREK, F.; THIERMANN, H. Diagnostics and treatment of nerve agent poisoning –current status and future developments. *Annals of the New York Academy Sciences*, Nova Iorque, v. 1479, n. 1, p. 1–16, 2020. DOI: 10.1111/nyas.14336.
- [25] WOREK, F.; THIERMANN, H. The value of novel oximes for treatment of poisoning by organophosphorus compounds. *Pharmacology & Therapeutics*, [s.l.], v. 139, n. 2, p. 249–259, 2013. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2013.04.009.

- [26] JOKANOVIĆ, M.; PROSTRAN, M. Pyridinium oximes as cholinesterase reactivators: structure-Activity relationship and efficacy in the treatment of poisoning with organophosphorus compounds. *Current Medicinal Chemistry*, [s.l.], v. 16, n. 17, p. 2177–2188, 2009. DOI: 10.2174/092986709788612729.
- [27] BRASIL. Ministério da Saúde. Relação Nacional de Medicamentos Essenciais. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2020. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/relacao\\_medicamentos\\_rename\\_2020.pdf](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/relacao_medicamentos_rename_2020.pdf). Acesso em: jan. 15, 2022.
- [28] SIDELL, F. R.; GROFF, W. A. The reactivability of cholinesterase inhibited by VX and sarin in man. *Toxicology and Applied Pharmacology*, [s.l.], v. 27, n. 2, p. 241–252, 1974. DOI: 10.1016/0041-008X(74)90195-1.
- [29] HARRIS, L. W.; STITCHER, D. L. Reactivation of VX-Inhibited Cholinesterase by 2-Pam and Hs-6 in Rats. *Drug and Chemical Toxicology*, Londres, v. 6, n. 3, p. 235–240, 1983. DOI: 10.3109/01480548309017814.
- [30] KOPLOVITZ, I.; STEWART, J. R. A comparison of the efficacy of HI6 and 2-PAM against soman, tabun, sarin, and VX in the rabbit. *Toxicology Letters*, [s.l.], v. 70, n. 3, p. 269–279, 1994. DOI: 10.1016/0378-4274(94)90121-X.
- [31] SAKURADA, K.; MATSUBARA, K.; SHIMIZU, K.; SHIONO, H.; SETO, Y.; TSUGE, K.; YOSHINO, M.; SAKAI, I.; MUKOYAMA, H.; TAKATORI, T. Pralidoxime iodide (2-PAM) penetrates across the blood-brain barrier. *Neurochemical Research*, [s.l.], v. 28, n.9, p. 1401–1407, 2003.
- [32] LORKE, D.; KALASZ, H.; PETROIANU, G.; TEKES, K. Entry of oximes into the Brain: a review. *Current Medicinal Chemistry*, [s.l.], v. 15, n. 8, p. 743–753, 2008. DOI: 10.2174/092986708783955563.
- [33] SIDELL, F. R.; GROFF, W. A. Intramuscular and intravenous administration of small doses of 2-pyridinium aldoxime methochloride to man. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, [s.l.], v. 60, n. 8, p. 1224–1228, 1971. DOI: 10.1002/jps.2600600823.
- [34] DAWSON, R. M. Review of oximes available for treatment of nerve agent poisoning. *Journal Applied Toxicology*, [s.l.], v. 14, n. 5, p. 317–331, 1994. DOI: 10.1002/jat.2550140502.
- [35] JAGER, B. V.; STAGG, G. N. Toxicity of diacetyl monoxime and of pyridine-2-aldoxime methiodide in man. *Bulletins of the John Hopkins Hospital*, Baltimore, v. 102, n. 4, p. 203–11, 1958. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/13523283>. Acesso em: 7 mar. 2022.
- [36] GREEN, A. L.; SAVILLE, B. The reaction of oximes with isopropyl methylphosphono-fluoridate (Sarin). *Journal of the Chemical Society*, n. 0, p. 3887-3892, 1956. DOI: 10.1039/jr9560003887.
- [37] GINSBURG, S.; WILSON, I. B. Oximes of the Pyridine Series. *Journal American Chemical Society*, v. 79, n. 2, p. 481–485, 1957. DOI: 10.1021/ja01559a067.
- [38] BLOCH, L. P. Method for producing 2-pyridinealdoxime methochloride. 3,123,613. Concessão: 3 mar. 1964.
- [39] ELLIN, R. I.; EASTERDAY, D. E.; KONDRITZER, A. A. Process for preparing methyl pyridinium 2 aldoxime chloride. 3,140,289. Concessão: 7 jul. 1964.
- [40] UNNISA, L.; SUMAKANTH, M.; RAO, B. L.; DIVI, M. K.; RAO, M. A. A simple process for the preparation of pralidoxime chloride. *Indian Journal of Chemistry*, v. 53B, n. 4, p. 431–435, 2014.
- [41] GORECKI, L.; KORABECNY, J.; MUSILEK, K.; DAVID, M.; NEPOVIMOVA, E.; DOLEZAL, R.; JUN, D.; SOUKUP, O.; KUČA, K. SAR study to find optimal cholinesterase reactivator against organophosphorous nerve agents and pesticides. *Archives of Toxicology*, v. 90, n. 12, p. 2831–2859, 2016. DOI: 10.1007/s00204-016-1827-3.
- [42] CHAMBERS, J. E.; MEEK, E. C.; CHAMBERS, H. W. Novel brain-penetrating oximes for reactivation of cholinesterase inhibited by sarin and VX surrogates. *Annals New York Academy of Sciences*, Nova Iorque, v. 1374, n. 1, p. 52–58, 2016. DOI: 10.1111/nyas.13053.
- [43] KARASOVA, J. Z.; ZEMEK, F.; BAJGAR, J.; VASATOVA, M.; PROCHAZKA, P.; NOVOTNY, L.; KUČA, K. Partition of bispyridinium oximes (trimedoxime and K074) administered in therapeutic doses into different parts of the rat brain. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, [s.l.], v. 54, n. 5, p. 1082–1087, 2011. DOI: 10.1016/j.jpba.2010.11.024.
- [44] SOUKUP, O.; TOBIN, G.; KUMAR, U. K.; BINDER, J.; PROSKA, J.; JUN, D.; FUSEK, J.; KUČA, K. Interaction of nerve agent antidotes with cholinergic systems. *Current Medicinal Chemistry*, [s.l.], v. 17, n. 16, p. 1708–1718, 2010. DOI: 10.2174/092986710791111260.
- [45] SIT, R. K.; RADIĆ, Z.; GERARDI, V.; ZHANG, L.; GARCIA, E.; KATALINIĆ, M.; AMITAI, G.; KOVARIK, Z.; FOKIN, V. V.; SHARPLESS, K. B.; TAYLOR, P. New structural scaffolds for centrally acting oxime reactivators of phosphorylated cholinesterases. *Journal of Biological Chemistry*, [s.l.], v. 286, n. 22, p. 19422–19430, 2011. DOI: 10.1074/jbc.M111.230656.
- [46] RADIĆ, Z.; SIT, R. K.; KOVARIK, Z.; BEREND, S.; GARCIA, E.; ZHANG, L.; AMITAI, G.; GREEN, C.; RADIĆ, B.; FOKIN, V. V.; SHARPLESS, K. B.; PALMER, T. Refinement of structural leads for centrally acting oxime

- reactivators of phosphylated cholinesterases. *Journal of Biological Chemistry*, [s.l.], v. 287, n. 15, p. 11798–11809, 2012. DOI: 10.1074/jbc.M111.333732.
- [47] KOVARIK, Z.; NIKOLINA, M.; SIT, R. K.; RADIĆ, Z.; FOKIN, V. V.; SHARPLESS, K. B.; TAYLOR, P. Centrally acting oximes in reactivation of tabun-phosphoramidated AChE. *Chemical Biological Interaction*, [s.l.], v. 203, n. 1, p. 77–80, 2013. DOI: 10.1016/j.cbi.2012.08.019.
- [48] MERCEY, G.; VERDELET, T.; RENOUE, J.; KLIACHYNA, M.; BAATI, R.; NACHON, F.; JEAN, L.; RENARD, P. Y. Reactivators of acetylcholinesterase inhibited by organophosphorus nerve agents. *Accounts of Chemical Research*, Washington, D.C., v. 45, n. 5, p. 756–766, 2012. DOI: 10.1021/ar2002864.
- [49] Krishnan, J. K. S.; ARUN, P.; APPU, A. P.; VIJAYAKUMAR, N.; FIGUEIREDO, T. H.; BRAGA, M. F. M.; BASKOTA, S.; OLSEN, C. H.; FARKAS, N.; DAGATA, J.; FREY, W. H.; MOFFETT, J. R.; NAMBOODIRI, A. M. A. Intranasal delivery of obidoxime to the brain prevents mortality and CNS damage from organophosphate poisoning. *Neurotoxicology*, [s.l.], v. 53, p. 64–73, 2016. DOI: 10.1016/j.neuro.2015.12.020.





# PÓS-GRADUAÇÃO NO IME

Bolsas: CAPES, CNPq e FAPERJ

## Mestrado

- Sistemas e Computação
- Engenharia Mecânica

## Mestrado e Doutorado

- Química
- Ciência dos Materiais
- Engenharia de Defesa
- Engenharia Nuclear
- Engenharia Elétrica
- Engenharia de Transportes



Matrículas: Semestral

Tel.: (21) 2546-7114 – Fax: (21) 2546-7089 – [www.ime.eb.br](http://www.ime.eb.br) – [sd1@ime.eb.br](mailto:sd1@ime.eb.br)