



Vol. XXXV - 1º Trimestre de 2018

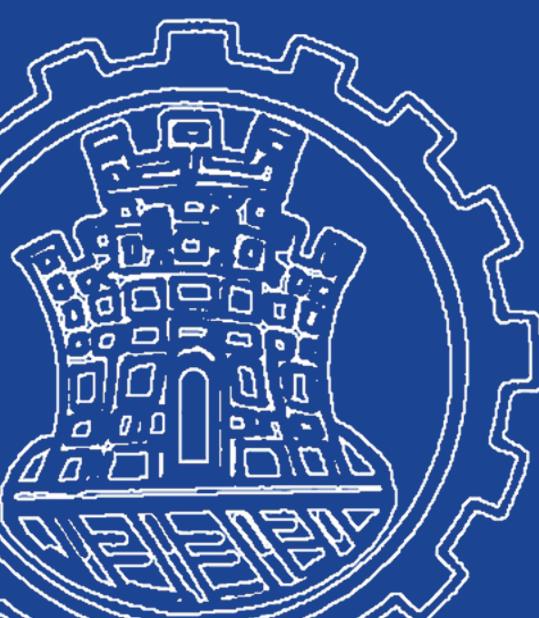
ARTIGOS

Revista Militar de Ciência e Tecnologia

Versão on-line: ISSN 2316-4522

ESTUDO DE MODELOS DE PNEU SEGUNDO A TEORIA DE JULIEN E A FÓRMULA MÁGICA DE PACEJKA	3
André N de Oliveira*, Caroline G Campos, Alejandro O Peralta, Ricardo T da Costa Neto, Aldélio B Caldeira	
INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM E POTÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO INDUTIVO LOCALIZADO SOBRE A GEOMETRIA DE JUNTAS SOLDADAS.....	10
William Todendi Dutra, Ivan Guerra Machado, Arnaldo Ruben Gonzalez	
GERAÇÃO DE ÁREA DE INFLUÊNCIA: MÉTODO DE HUFF ADAPTADO	15
Raquel Vieira da Silva, Wagner Braga Nunes Coelho	
CONSUMO DE ENERGIA EM REDES AD-HOC PARA USO EM AMBIENTES DE COMANDO E CONTROLE	21
Marcelo F. Vasconcelos, Ronaldo M. Salles	
ANÁLISE DE CENÁRIO ENVOLVENDO INCÊNDIO EM MATERIAL RADIOATIVO ORIENTADO À RESPOSTA À EMERGÊNCIA	30
Rodrigo Werner da Silva, Wilson Freitas Rebello da Silva Junior, Edson Ramos de Andrade	
ANÁLISE DA INTERAÇÃO TUBO-PROJÉTIL DURANTE A BALÍSTICA INTERNA DE UMA MUNIÇÃO APFSDS EM UM CANHÃO 105 MM	34
Allan A G Ferreira*, Jorge A M de Gois, Aldélio B Caldeira	
COMPARATIVO DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE EMISSORES DE RF BASEADOS APENAS EM MEDIDAS DE MARCAÇÃO	44
Edilson C dos Santos, José A. Apolinário Jr. e José C A dos Santos	
UMA ABORDAGEM PARA DESVIO DE OBSTÁCULOS NA ASSISTÊNCIA AO CONTROLE DE UM QUADRICÓPTERO EM TEMPO REAL	54
Bruno S. Giovanini, Luis Claudio Batista da Silva, Paulo Fernando Ferreira Rosa	
MODELAGEM DA PROPAGAÇÃO DA VARIÂNCIA EM PROCESSOS MULTIVARIADOS CORRELACIONADOS EM ESTÁGIOS	64
Josiane Da S Jesus, Paulo H C Maranhão*, D.Sc.	

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



Biblioteca do Exército
Tradição e qualidade em publicações



Editorial

Nesta edição da Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT) destaco a atividade militar, por suas próprias características, constituída, historicamente, como uma importante alavanca para o desenvolvimento científico e tecnológico do País. Desta forma, julgo importante rememorar a tecnologia desenvolvida para captação, transmissão e recepção de imagens, eletronicamente, hoje tão familiar nas casas através de receptores de televisão, teve seu desenvolvimento e aplicação inicial, embora ainda em forma muito rudimentar, com um equipamento com imagens pouco definidas. Nesta direção, basta lembrarmos do segundo conflito mundial, pelas forças aliadas, onde tal tecnologia permitiu que os tripulantes de aeronaves de combate tivessem acesso à informações relativas à localização de alvos. A Ciência e Tecnologia Militar, no Brasil, estiveram presentes no desenvolvimento tecnológico desse conhecimento. Por este motivo, revivo, a importância que as pesquisas realizadas no Instituto Militar de Engenharia, responsável pelo desenvolvimento do sistema Pal-M, e atualmente em uso em transmissões à cores, foi publicada no Volume X, do 1º trimestre de 1993, com o título “Analise do Emprego do Sistema PAL-M no Brasil”, os seus autores foram o Cel R/1 Alcyone Fernandes de Almeida Junior, o Ct (FN) Antonio Carlos Chineli Fonsec, o Sr. José Mauricio Sengo Costa Leonardo Guimarães Dobbin e o Sr. Marcelo Santa Rosa Arraes.

Nessa linha, a RMCT reafirma o compromisso em promover a Ciência e Tecnologia, voltada para a área de Defesa, destacando a contribuição relevante dos Autores.

Expediente

Publicação de Pesquisa e
Desenvolvimento Científico-Tecnológico
Do Exército Brasileiro



Revista Militar de Ciência e Tecnologia

Comandante do Exército

Gen Ex Eduardo Dias da Costa Villas Bôas

Departamento de Ciência e Tecnologia

Gen Ex Juarez Aparecido de Paula Cunha

Departamento de Educação e Cultura do Exército

Gen Ex Mauro Cesar Lourena Cid

Editor

Ten Cel Cav Marco André Leite Ferreira

Diretor da BIBLIEEx

Corpo Redatorial

- Presidente: Hildo Vieira Prado Filho
- Editor executivo: Edison Conde Perez dos Santos
- Engenharia Civil, Transportes e Ciências Ambientais:
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães – IME (SE/2)
- Engenharia Nuclear: Sérgio de Oliveira Vellozo – IME (SE/7)
- Engenharia Elétrica: Geraldo Magela Pinheiro Gomes – IME (SE/3)
- Engenharia Mecânica: André Luiz Tenório Rezende – IME (SE/4)
- Ciência dos Materiais: Ronaldo Sérgio de Biasi – IME (SE/4)
- Ciência da Computação: Ronaldo Moreira Salles – IME (SE/8)
- Engenharia de Defesa: Antônio Eduardo Carrilho da Cunha – IME (SE/3)
- Engenharia Química e Química: Kátia Regina de Souza – IME (SE/5)
- Engenharia Cartográfica: Heloisa Alves Silva Marques – IME (SE/6)
- Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação: Aderson Campos Passos – IME (SE/8)
- Outras áreas: Paulo Henrique Coelho Maranhão – IME (SE/4); Raquel Aparecida Abrahão Costa e Oliveira – IME (SE/6)

Editores associados externos

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

Composição

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA – IME

Praça General Tibúrcio, 80

Praia Vermelha – Rio de Janeiro-RJ – CEP 22.290-270

Tel.: (21) 2546-7115

Projeto Web

Rubenildo Python de Barros

<http://rmct.ime.eb.br>

rmct@ime.eb.br

Revisão, programação e diagramação

Coordenador: Edison Conde Perez dos Santos

Revisores: Giana Elvira de Oliveira Marquês; Suzana Marly da Costa Magalhães

Programador Web: Rubenildo Python de Barros

Diagramador: Luiz Tadeu Carqueija Mota

Projeto gráfico e editoração eletrônica

Luiz Tadeu Carqueija Mota – IME (SMA)

Telefone: (21) 2546-7118

tadeu.mota@gmail.com

Direção, edição e distribuição

BIBLIEEx

Palácio Duque de Caxias

Praça Duque de Caxias, 25 – 3º andar – Ala Marcílio Dias

Rio de Janeiro, RJ – Brasil – CEP 20.221-260

Tels.: (21) 2519-5715 – Fax: (21) 2519-5569

www.bibliex.ensino.eb.br

bibliex@bibliex.ensino.eb.br

Estudo de modelos de pneu segundo a Teoria de Julien e a Fórmula Mágica de Pacejka

André N de Oliveira*, Caroline G Campos, Alejandro O Peralta, Ricardo T da Costa Neto, Aldélio B Caldeira.

Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80, 29270-030, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

*jmiguez@ime.eb.br

RESUMO: Neste trabalho, dois modelos de pneu são apresentados: a Teoria de Julien (TJ) e a Fórmula Mágica de Pacejka (FM). Um modelo de carro completo, utilizado para simular a dinâmica longitudinal do veículo, foi implementado em MatLab/Simulink®, empregando a teoria de Grafos de Ligação. Os métodos de otimização: Random Restricted Window (R2W) e Gradiente Conjugado (GC) são utilizados para estimar os parâmetros do modelo TJ. Precisão, tempo computacional, eficiência e eficácia dos modelos são comparadas no que tange ao comportamento das respostas de desempenho do veículo. Os resultados mostram a equivalência dos modelos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo de Pneu. Teoria de Julien. Fórmula Mágica. Problemas Inversos. Dinâmica Veicular.

ABSTRACT: In this work, two tire models are depicted: the Julien's Theory (JT) and the Pacejka's Magic Formula (MF). A full car model, used to simulate the longitudinal vehicle dynamics, was implemented by using MatLab/Simulink®, employing the Bond Graph theory. The optimization methods: Random Restricted Window (R2W) and Gradient Conjugate (GC) are used to estimate the parameters of the JT model. Accuracy, computational time, efficiency and efficacy of the models are compared regarding the behavior of the performance responses of the vehicle. The results show that the studied models are equivalent.

KEYWORDS: Tire model. Julien's Theory. Magic Formula. Inverse Problems. Vehicle Dynamics.

1. INTRODUÇÃO

O pneu é um dos subsistemas veiculares mais importantes, influenciando a segurança, o conforto e o desempenho do veículo. São funções dos pneus: suportar o peso do veículo; amortecer o veículo ao trafegar por superfícies irregulares; proporcionar tração suficiente para condução e frenagem; e fornecer um adequado controle na direção e estabilidade do veículo [1].

No desenvolvimento de novos pneus para diferentes tipos de veículos muitos experimentos são realizados. Estes experimentos consomem tempo e dinheiro. Desta forma, bem como em outras áreas da engenharia, a pesquisa e o desenvolvimento de pneus tem utilizado simulações computacionais com o propósito de reduzir o número de experimentos, diminuir os custos e acelerar o processo de desenvolvimento de novos produtos. Neste contexto, os modelos físico-matemáticos de pneus se tornam relevantes.

Os modelos de pneus podem ser divididos em dois grupos: on-road, para terrenos rígidos, como estradas de asfalto; e off-road, para superfícies suaves como gelo, areia ou lama [2]. Outra classificação propõe a divisão em três grupos: análise de direção e estabilidade; análise sobre o conforto; e análise de carga rodoviária [3].

O modelo de pneu mais utilizado é a Fórmula Mágica de Pacejka [1], o qual é um modelo semi-empírico e, portanto, com parâmetros sem significado físico. Contudo, aprimoramentos deste modelo têm sido propostos [4]. [5] usa alguns métodos de otimização diferentes para avaliar os parâmetros da FM, por meio da força longitudinal, da força lateral e do momento de auto-alinhamento. [6] identifica esses parâmetros por um método híbrido, conjugando duas técnicas de problemas inversos: Levenberq-Marquadt e Algoritmo Genético. [7] realiza a estimativa de parâmetros da TJ, com a utilização dos métodos Particule Swarm Optimization (PSO), R2W e Differential Evolution

(DE), baseado na FM de Pacejka, restringindo-se, portanto, à utilização de métodos estocásticos de otimização. Por outro lado, o modelo de pneu da Teoria de Julien (TJ) se afasta do empirismo da Formula Mágica por meio da utilização de hipóteses físicas.

O objetivo deste trabalho é mostrar a equivalência entre o modelo de pneu da Teoria de Julien e o modelo da Fórmula Mágica de Pacejka. Ou seja, mostrar que a argumentação física da Teoria de Julien tem correspondência com a modelagem empírica da Fórmula Mágica. Ademais, também é objetivo deste trabalho avaliar comparativamente o desempenho de um método estocástico de otimização, o R2W, em relação a um método determinístico de otimização, o GC, diferindo e extendendo a abordagem de problema inverso proposta em [7].

Assim, um estudo de caso é adotado, utilizando um modelo da dinâmica longitudinal de um carro completo, representando um veículo All Wheel Drive (AWD). Neste modelo, o qual foi implementado em Matlab/Simulink®, a força lateral e o momento de auto-alinhamento não são considerados.

Os resultados provenientes do modelo da dinâmica longitudinal do veículo, considerando a Fórmula Mágica de Pacejka, são utilizados como dados pseudo-experimentais. Estes dados são empregados, numa abordagem de problema inverso, na estimativa dos parâmetros do modelo de pneu da Teoria de Julien. Os métodos de otimização Random Restricted Window (R2W) e Gradiente Conjugado (GC) são usados na solução do problema inverso, permitindo a avaliação comparativa de um método estocástico e de um método determinístico. Os dois modelos de pneus são comparados, quanto à precisão, tempo computacional, eficiência e eficácia.

2. MODELAGEM DO VEÍCULO

O veículo usado neste artigo é uma Pickup AWD. Um

modelo de carro completo, utilizando a teoria dos Grafos de Ligação, foi implementado no software MatLab/Simulink®.

A Fig. 1 mostra o sistema de coordenadas do pneu adotado pela Society of Automotive Engineers (SAE) e empregado no presente trabalho.

A origem do sistema está no centro da área de contato pneu/solo. O eixo X está na interseção do plano do pneu com o plano do solo, o eixo Z é orientado para baixo e perpendicular à área de contato do pneu com o solo, e o eixo Y está no plano do solo orientado para a direita, completando o quadro de coordenadas sob a orientação do espaço. Existem três forças que atuam no pneu: força longitudinal (tração / frenagem), força lateral e força normal. Do mesmo modo, existem três momentos de atuação: momento de resistência ao rolamento, momento de rotação e momento de auto-alinhamento. O ângulo de deslizamento é aquele entre a direção de condução em que a roda viaja e a direção da roda, enquanto o ângulo camber é o único entre o plano XZ e o plano da roda.

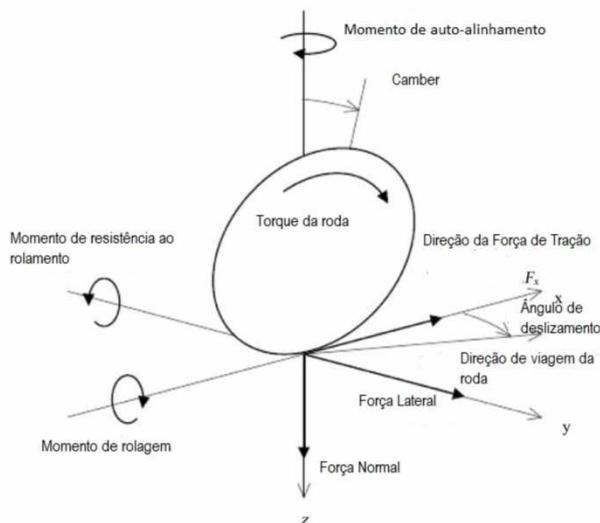


Fig. 1 – Forças e Momentos atuando no pneu, de acordo com o sistema de coordenadas adotado pela SAE.

A Fig. 2 mostra o diagrama de blocos da modelagem do veículo com o powertrain, conjunto roda/pneu e equação de movimento do veículo, usando a abordagem de fluxo de potência. Neste diagrama as variáveis de entrada e de saída são esforços e velocidades em subsistemas que podem ser acoplados, respeitando a compatibilidade de entradas e saídas. Essa conexão é feita através de Grafos de Ligação. Assim, os sistemas mais complexos podem ser divididos em subsistemas mais simples, respeitando sempre a relação causa-efeito dos módulos [8].

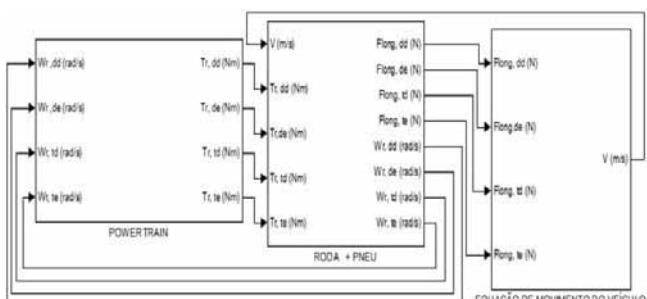


Fig. 2 – Diagrama de blocos do powertrain, composto pelo mo-

tor, conjunto roda/pneu e equação de movimento do veículo.

A Fig. 3 mostra o diagrama de blocos do powertrain com motor, caixa de marchas e os diferenciais: central, dianteiro e traseiro.

O torque é produzido pelo motor (fonte de esforço) e transmitido aos transformadores, sendo o primeiro a caixa de marchas, onde é multiplicado pela relação de transmissão correspondente. Imediatamente após a saída da caixa de marchas, torque é transmitido para o diferencial central, que, no caso em análise, é aberto e o divide em proporções iguais para o diferencial dianteiro e o traseiro, de acordo com a Eq. 1. O fluxo do torque segue ao conjunto roda/pneu, onde a força de tração é desenvolvida e transmitida para o elemento capacitivo de inércia (equação de movimento do veículo), de acordo com a Eq. 2. Em seguida, o veículo se moverá, depois de superar a resistência, com uma velocidade linear, que retorna ao conjunto roda/pneu, onde é transformada em velocidade angular e percorrerá o caminho inverso através do diferencial central aberto, de acordo com a Eq. 3, até fechar o ciclo no motor. Na Eq. 1, T_d e T_t são os torques para o diferencial dianteiro e traseiro, respectivamente, e T_m é o torque da caixa de marchas. Observe que $1/2$ é a relação de transmissão do diferencial, que também é a proporção do número de dentes da coroa e do pinhão.

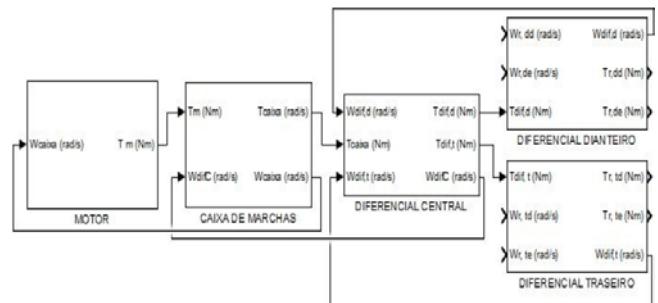


Fig. 3 – Diagrama de blocos composto pelo motor, caixa de marcha, diferenciais central, dianteiro e traseiro.

$$\begin{bmatrix} T_d \\ T_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} T_m \quad (1)$$

$$A_1 = (F_{long,dd} + F_{long,de} + F_{long,td} + F_{long,te} - F_{resist})/m \quad (2)$$

No Eq. 2, $F_{long,dd}$, $F_{long,de}$, $F_{long,td}$ e $F_{long,te}$ são as forças longitudinais da dianteira direita e esquerda, traseira direita e esquerda, respectivamente, e m é a massa do veículo. F_{resist} são as forças de resistência do veículo, ora representadas pela soma das seguintes forças: aerodinâmica e de resistência à rampa (que não é considerada neste estudo). A velocidade linear do veículo é obtida integrando-se a aceleração linear para alimentar o sistema. Deve-se notar que a força de resistência ao rolamento é inserida na equação do subsistema roda/pneu.

$$W_{caixa} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_d \\ W_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

Na Eq. 3 W_{caixa} , W_d e W_t são as velocidades angulares da caixa de marcha, diferencial dianteiro e traseiro, respectivamente.

3. MODELO DE PNEU

Na dinâmica longitudinal, quando um torque é aplicado ao pneu, uma força de tração é desenvolvida na região de contato pneu/solo. A força desenvolvida provoca uma compressão na região anterior da superfície de contato, o que faz com que o pneu percorra uma distância menor do que quando não há torque aplicado no estado estacionário. Esse fenômeno é devido à compressão, e é chamado de deslizamento longitudinal, como mostrado pela Eq. 4. Os valores dos limites são $V = w r$, quando o deslizamento é igual a zero, representando o deslizamento puro, e $V = 0$, quando o deslizamento é igual a um, e o pneu gira, mas o veículo não se move.

$$i = (1 - \frac{V}{w r}) \quad (4)$$

Na Eq. 4, é a velocidade linear do centro do pneu, w é a velocidade angular e r é o raio dinâmico do pneu. Ambos os modelos tentam explicar a relação entre deslizamento longitudinal e força de tração. A Fig. 4 mostra esse comportamento, onde W é a carga vertical aplicada no pneu, μ_p é o valor de pico do coeficiente de aderência μ_p e μ_s é o valor do deslizamento do coeficiente de aderência.

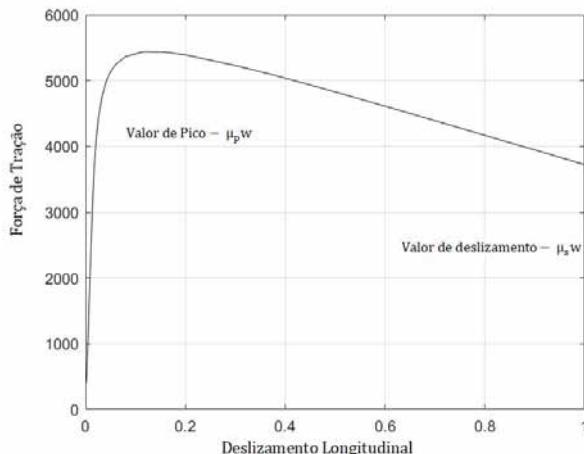


Fig. 4 – Variação da Força de Tração e o deslizamento longitudinal do pneu.

De acordo com [1], para a TJ o deslizamento i é condicionado por um deslizamento crítico i_c obtido pela Eq. 5. Onde L_{contato} é o comprimento da região de contato, K_{tg} é a rigidez tangencial e também é uma constante de proporcionalidade.

$$i_c = \frac{\mu_p W}{K_{tg} L_{\text{contato}} (L_{\text{contato}} + \lambda)} \quad (5)$$

Se $i \leq i_c$, então a força de tração é definida pela Eq. 6, onde é calculado pela Eq. 7. Caso contrário, a força de tração é obtida pela Eq. 8.

$$F_{tr} = \frac{K' \cdot i \cdot (1 + L_{\text{contato}})}{2 \cdot \lambda} \quad (6)$$

$$K' = K_{tg} \cdot L_{\text{contato}} \cdot \lambda \quad (7)$$

$$F_{tr} = \frac{\mu_p \cdot W - \lambda \cdot (\mu_p \cdot W - K' \cdot i)^2}{2 \cdot L_{\text{contato}} \cdot K' \cdot i} \quad (8)$$

Nota-se que, quatro parâmetros (μ_p , λ , L_{contato} e K_{tg}) serão estimados. Além disso, TJ é usada para calcular apenas a

força de tração empregada em solos rígidos.

A abordagem conhecida como FM apresenta um conjunto de fórmulas analíticas que interpola os dados medidos experimentalmente dos pneus, em vez de modelar a própria estrutura. Por outro lado, a força de tração, a força lateral e o momento de auto-alinhamento são calculados como variáveis de saída. Existem várias abordagens para FM, mas a usada neste trabalho é descrita por [1], e mostrada na Eq. 9.

$$y = D \cdot \operatorname{sen} \left[C \cdot \operatorname{tg}^{-1} \left(B \cdot x - E \left(B \cdot x - \operatorname{tg}^{-1} (B \cdot x) \right) \right) \right] + S_v \quad (9)$$

Onde y é a variável de saída, B é o fator de rigidez, C é o fator de forma, E é o fator de curvatura, S_v é o desvio vertical e x é o parâmetro de entrada, definido pela Eq. 10,

$$x = X + S_h \quad (10)$$

onde X é o deslizamento longitudinal e S_h é o desvio horizontal.

Os componentes da FM, descritos pela Eq. 9, podem ser decompostos em função da carga vertical aplicada no pneu.

A Tabela 1 mostra os valores utilizados neste trabalho para os coeficientes relacionados à carga aplicada no pneu, no cálculo da força longitudinal.

Tabela 1: Valores dos coeficientes da FM.

	Peso (KN)	B	C	D	E	Sh	Sv
F(N)	4	0,171	1,69	4236	0,619	0	70

Uma das diferenças existentes entre as duas teorias apresentadas se concentra no cálculo da aceleração angular na equação de movimento da roda. A Fig. 5 mostra o diagrama de blocos do conjunto roda/pneu em um segundo nível para a FM e a Fig. 6 para a TJ. Nota-se que, para a FM, a força de tração, que sai do bloco de modelo de pneu, segue para a equação de movimento do veículo e, também, realimenta a equação de movimento da roda, como descrito na Eq. 11, o que não acontece com a TJ, como descrito pela Eq. 12.



Fig. 5 – Diagrama de blocos do conjunto roda/pneu para FM em um 2º nível.



Fig. 6 – Diagrama de blocos do conjunto roda/pneu para TJ em um 2º nível.

$$\dot{W}_r = \frac{1}{I_{yyr}} (T_{dif} + F_{tracão} r_{pneu} - T_{resist.rol}) \quad (11)$$

$$\dot{W}_r = \frac{1}{I_{yyr}} (T_{dif} - T_{resist.rol}) \quad (12)$$

Nas Eqs. 11 e 12, \dot{W}_r é a aceleração angular da roda, I_{yyr} é o momento de inércia na roda, T_{dif} é o torque do diferencial e $T_{resist.rol}$ é o torque de resistência ao rolamento.

4. PROBLEMAS INVERSOS

As técnicas de problemas inversos para estimativa de parâmetros têm sido largamente utilizadas na Engenharia. Nesta abordagem, métodos de otimização são empregados para minimizar uma função objetivo definida, usualmente, pela diferença quadrática média entre dados de referência (dados experimentais ou pseudo-experimentais) e dados provenientes de cálculos matemáticos analíticos ou numéricos. Assim, ao se determinar o ponto de mínimo da função objetivo, estimam-se os parâmetros do modelo matemático.

O presente trabalho utiliza dois métodos de otimização: um determinístico, o Gradiente Conjugado (GC), e um estocástico, o Random Restricted Window (R2W).

4.1 Função Objetivo

No problema de inverso em estudo, a função objetivo é dada por

$$S = \frac{1}{n} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{F_{trp} - F_{trj}}{\max(F_{trp}) - \min(F_{trp})} \right) \right]^2 + \frac{1}{n} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{V_p - V_j}{\max(V_p) - \min(V_p)} \right) \right]^2}} \quad (13)$$

onde F_{trp} e V_p são, respectivamente, a força de tração e a aceleração longitudinal da FM, enquanto F_{trj} e V_j são de TJ. Por sua vez, n é o número de elementos em cada vetor.

4.2 Critério de parada

O critério de parada adotado para o processo iterativo, tanto para o GC, quanto para o R2W, é definido pela Eq. 14, onde a diferença entre o valor da função objetivo na iteração presente e na anterior deve ser menor que a tolerância estabelecida ou o número máximo de iterações alcançado.

$$S(k) - S(k-1) \leq 10^{-5} \text{ ou } k = itmax \quad (14)$$

Porém, a fim de garantir que a função objetivo atinja o mínimo desejado, este processo deve ser repetido por 20 vezes consecutivas.

4.3 Gradiente Conjugado

O método do gradiente conjugado se baseia na minimização da função objetivo, partindo de uma estimativa inicial da solução e determinando uma nova direção e um novo passo de busca para uma nova estimativa aperfeiçoada da solução a cada iteração. A direção de busca é uma combinação da direção oposta ao gradiente da função objetivo com a direção de busca da iteração anterior [9].

Segundo [9], o processo iterativo é dado pela Eq. 15, onde β^k é o tamanho do passo de procura, d^k é a direção de descida e k o número de iterações.

$$P^{(k+1)} = P^k - \beta^k d^k \quad (15)$$

A direção de descida é obtida pela conjugação da direção do gradiente, $\nabla S(P^k)$, e a direção de descida da iteração prévia $d^{(k-1)}$, como descrita pela Eq. 16.

$$d^k = \nabla S(P^k) + \gamma^k d^{(k-1)} \quad (16)$$

γ^k é obtido pela expressão desenvolvida por "Fletcher-Reeves", conforme descrito pela Eq. 17.

$$\gamma^k = \frac{\sum_{j=1}^N [\nabla S(P^k)]_j^2}{\sum_{j=1}^N [\nabla S(P^{k-1})]_j^2} \quad (17)$$

A expressão para a direção do gradiente é dada pela diferenciação da Eq. 13 com o respectivo parâmetro desconhecido.

$$\nabla S(P^k) = -2(J^k)^T [Y - T(P^k)] \quad (18)$$

Onde Y são os valores experimentais ou pseudo-experimentais e $T(P)$ são valores calculados a partir do modelo matemático adotado e J^k é a matriz de sensibilidade definida pela Eq. 19.

$$J(P) = \left[\frac{\partial T^T(P)}{\partial P} \right]^T \quad (19)$$

O passo de busca β^k é definido pela Eq. 20.

$$\beta^k = \frac{\sum_{i=1}^I \left[\left(\frac{\partial T}{\partial P^k} \right)^T d^k \right] [T(P^k) - Y]}{\sum_{i=1}^I \left[\left(\frac{\partial T}{\partial P^k} \right)^T d^k \right]^2} \quad (20)$$

O processo iterativo é desenvolvido até que o critério de parada seja atingido.

4.4 Random Restricted Window

R2W é um método estocástico de otimização de fácil implementação [10-12]. Neste método uma população de possíveis soluções é criada randomicamente. Em seguida o melhor elemento da população é identificado, correspondendo ao elemento que resulta no menor valor para a função objetivo. Ao redor e centrada no melhor elemento ζ_i^* , uma subregião do domínio, denominada janela, é criada, e uma nova população de possíveis soluções é criada randomicamente dentro da janela. Este procedimento executado sucessivas vezes conduz ao mínimo.

A regra de criação do elemento ζ_i da população dentro da janela é descrito pela Eq. 21, enquanto os limites inferiores, ζ_L e superiores, ζ_H , da janela são estabelecidos pelas Eq. 22 e 23, onde R é um número randômico com distribuição uniforme entre 0 e 1 e δ é o fator de restrição. Neste trabalho, δ assume o valor 0,02.

O processo de minimização se repete até que o critério de parada seja atingido [10-12].

$$\zeta_i = \zeta_{iL} + R(\zeta_{iH} - \zeta_{iL}) \quad (21)$$

$$\zeta_L = \zeta_i^* - \delta \zeta_i^* \quad (22)$$

$$\zeta_H = \zeta_i^* + \delta \zeta_i^* \quad (23)$$

5. RESULTADOS

As estimativas realizadas com o R2W utilizaram uma população com 50 indivíduos criada de acordo com a Eq. 21, considerando os valores iniciais do domínio de interesse mostrados na Tabela 2. De forma análoga, a estimativa inicial para o método do GC também é apresentada na mesma Tabela.

Tabela 2: Valores iniciais dos parâmetros com GC e R2W.

Parâmetro	GC	R2W Limite Inferior	R2W Limite Superior
λ	0,05	0	0,1
μ_p	0,85	0,8	0,95
L_{contac}	0,3	0	0,5
Ktg	4400000	4600000	4900000

A Tabela 3 mostra os valores dos parâmetros estimados com GC e R2W. Esses parâmetros servirão de base para extrair as curvas da força longitudinal desenvolvida pelo pneu, velocidade angular da roda, deslizamento do pneu, aceleração linear e velocidade do chassis.

Tabela 3: Valores estimados da TJ com GC e R2W.

Parâmetro	GC	R2W
λ	0,035281396	0,040194250
μ_p	0,946796989	0,905243184
L_{contac}	0,268394697	0,312039528
Ktg	4499999,999	4764554,433

A Fig. 7 mostra a curva de força longitudinal desenvolvida pelo pneu ao longo de 100 segundos. Os dois métodos utilizados (GC e R2W) desenvolveram o mesmo comportamento do modelo de pneu de Pacjeka. Nota-se que a curva desenvolvida com os parâmetros estimados pelo método GC tem uma estabilização anterior ao R2W.

A Fig. 8 mostra o mesmo comportamento dinâmico da curva da velocidade linear do chassis através do tempo, quando os dois métodos são comparados com a FM. Observa-se, também, que o veículo atinge sua velocidade máxima em aproximadamente 44 m/s (158 km/h).

A curva que representa o comportamento da aceleração linear do veículo é mostrada na Fig. 9. Nesta curva, são observadas cinco degraus na parte descendente, onde o tra-

lho da caixa de câmbio é representado durante a mudança de marchas. Embora o comportamento dos dois métodos siga a FM, observa-se que o método R2W obteve uma maior suavidade durante a mudança de marchas, porém com maior instabilidade quando a aceleração tende a zero.

Fig. 7 – Variação da Força Longitudinal com os métodos GC e R2W.

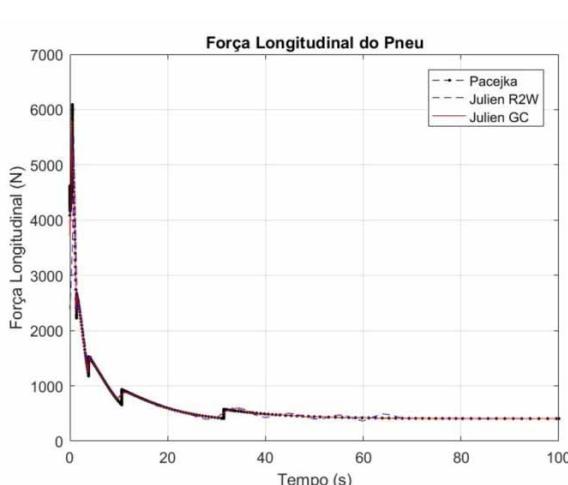


Fig. 7 – Variação da Força Longitudinal com os métodos GC e R2W.

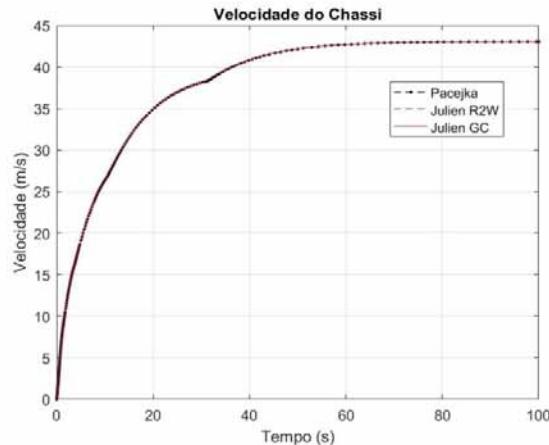


Fig. 8 – Velocidade linear do chassis com emprego do GC e R2W.

A Fig. 10 mostra o comportamento dinâmico da curva de velocidade angular produzida na roda no domínio do tempo de 100 segundos. Observa-se que os dois métodos seguiram o comportamento desenvolvido pelo modelo da FM.

Na Fig. 11 observa-se o deslizamento desenvolvido na área de contato pneu/solo com a força de tração desenvolvida no pneu. Em sua parte linear, todos os modelos de pneu (FM e TJ com a utilização os parâmetros estimados pelo método GC e R2W) desempenharam o mesmo comportamento, porém quando a curva atinge o valor de pico do coeficiente de aderência, nota-se que a TJ com GC se aproximou mais da FM. O mesmo comportamento é observado quando a curva atinge o ponto de valor de deslizamento do coeficiente de aderência. Isto se deve ao fato que o valor de pico do coeficiente de aderência é um dos parâmetros estimados, portanto assume valores próximos, porém diferentes, como mostrado na Tabela 2. Adicionalmente, o cálculo da força de tração para TJ, Eq. 6 e 8, depende dos seguintes parâmetros estimados: μ_p e L_{contac} .

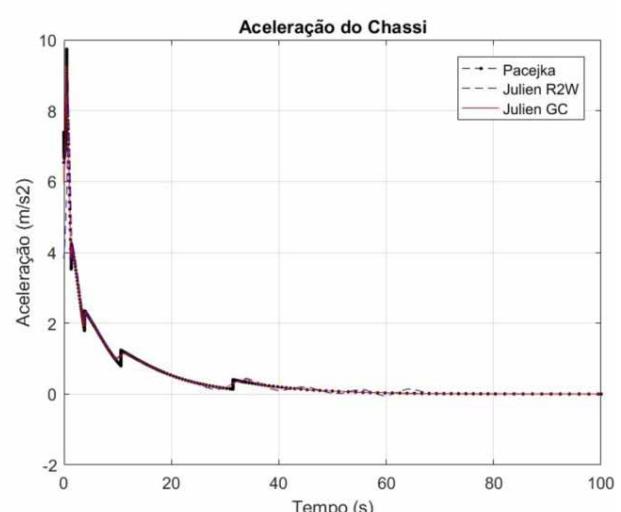


Fig. 9 – Aceleração linear do chassis com emprego do GC e R2W.

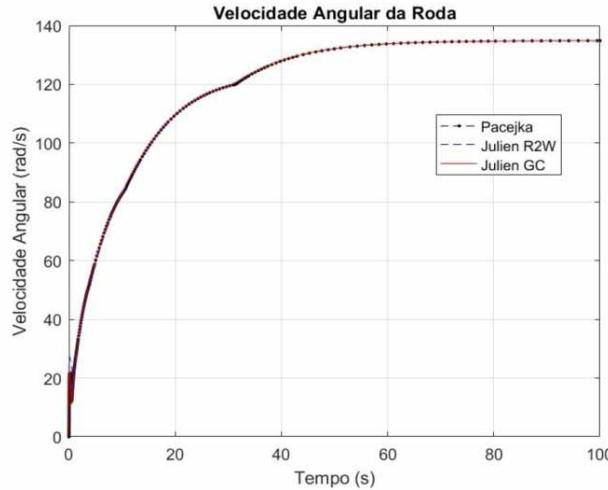


Fig. 10 – Velocidade angular da roda com a utilização do GC e R2W.

O processo iterativo desenvolvido pelos dois métodos foi feito com a minimização da função objetivo descrita pela Eq. 13, onde a força de tração e a aceleração longitudinal do veículo foram comparadas entre os modelos FM e TJ.

A Fig. 12 mostra a evolução da função objetivo com o aumento do número de iterações. Observa-se que nos dois métodos a curva tem uma parte decrescente e logo depois estabiliza. Esse comportamento é devido ao processo de minimização. No entanto, o método R2W converge primeiro.

A Tabela 4 mostra o resultado numérico dos dois métodos em relação à aceleração e à velocidade do chassi. O erro é calculado de acordo com a Eq. 24, onde é o valor máximo da diferença entre FM e TJ, e é o valor encontrado com o FM.

$$\text{erro} = \frac{\text{erromax}}{\text{VMF}} \quad (24)$$

Nota-se que os erros máximos encontrados não passam de 4% em comparação a FM, demonstrando, portanto, uma excelente precisão para os dois métodos.

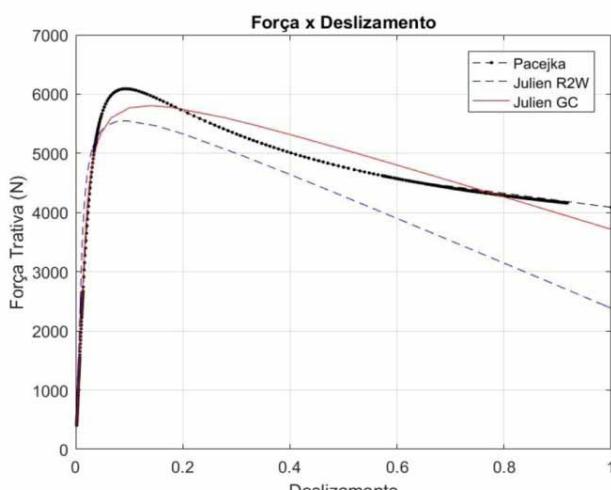


Fig. 11 – Força de tração e deslizamento do pneu.

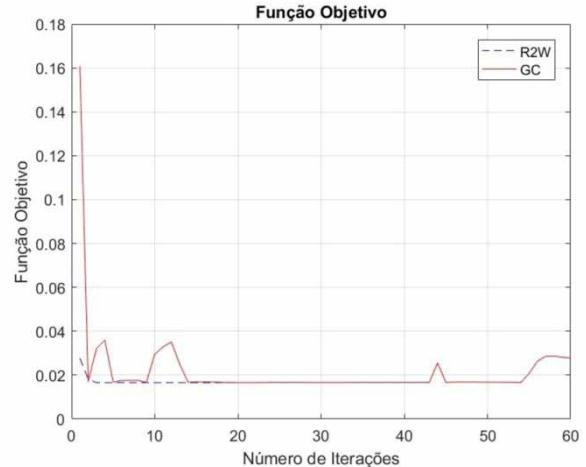


Fig. 12 – Resultados do GC e R2W para função objetivo com o número de iterações.

Tabela 4: Erro máximo da TJ com GC e R2W.

	Erro máximo TJ em %	
	R2W	GC
Aceleração	3,9071	1,3760
Velocidade	1,6441	0,0723

Embora nas Fig. 7-10 os dois métodos demonstrem o mesmo comportamento dinâmico das curvas do veículo com a utilização da FM, percebe-se que, através da análise do erro percentual, o GC obteve um erro menor

Além desta análise, o tempo computacional dispendido pelos métodos foi de 0,141152 segundos para o GC e de 0,64157 segundos para R2W. Outra diferença é notada pelo número de iterações no processo de convergência, onde GC obteve 60 iterações e o R2W apenas 23.

Cabe ressaltar que os resultados encontrados em [7] foram satisfatórios. Porém somente foram empregados métodos estocásticos para estimativa de parâmetros. Neste trabalho uma comparação entre métodos determinísticos e estocásticos foi realizada. Sendo assim, dois tipos de otimização diferentes foram comparadas.

6. CONCLUSÕES

O uso da abordagem de fluxo de potência para o processo de modelagem do veículo forneceu resultados satisfatórios em relação ao comportamento da dinâmica longitudinal do veículo AWD, tanto para FM como para TJ.

O modelo de pneu conhecido como FM já foi validado em vários estudos. No entanto, o uso de TJ ainda não foi o escopo de muitos trabalhos. Desta forma, propôs-se uma abordagem de problemas inversos para realizar uma validação da TJ para a dinâmica longitudinal.

Quatro parâmetros foram estimados pelos métodos de otimização GC e R2W. Os resultados mostraram erros insignificantes em relação aos dois métodos utilizados. A comparação com os valores de referência foi alcançada através da análise da força longitudinal, velocidade angular da roda, velocidade e aceleração linear do chassi. Nesses quatro requisitos dinâmicos, as curvas apresentaram o mesmo comportamento quando comparadas à FM. Além destas curvas, realizou-se a análise da curva de força de tração desenvolvida no pneu

de acordo com o deslizamento, e a curva do valor da função objetivo ao longo das interações para os dois métodos.

Apesar do mesmo comportamento, o método do GC consumiu 60 iterações no processo de convergência, enquanto o R2W consumiu apenas 23 iterações. Por outro lado, as estimativas realizadas com GC resultaram em menores erros na cinemática estudada. Portanto, pode-se afirmar que os métodos determinísticos são promissores na aplicação proposta.

Conclui-se finalmente que os resultados da TJ são equivalentes aos da FM no que diz respeito a: força longitudinal, velocidade do chassi, aceleração do chassi e a velocidade angular da roda. Entretanto, diferenças significativas existem na avaliação da força de deslizamento do pneu.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Wong, J. Y. Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons, 2008, ISBN 0-471-35461-9.
- [2] Gruber, Patrick, Robin S. Sharp. Special issue on the 4th International Tyre Colloquium, Vehicle System Dynamics, vol. 54, nr. 4, 2016, pg 445-447, doi:10.1080/00423114.2016.1166599.
- [3] Li, B., Xiaobo, Y., Yang, J. Tire model application and parameter identification-A literature review, SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems 7.2014-01-0872, 2014, pg 231-243, doi:10.4271/2014-01-0872.
- [4] Jonson, A., Olsson, E. A Methodology for Identification of Magic Formula Tire Model Parameters from In-Vehicle Measurements, Master's Thesis, Department of Applied Mechanics, Gothenburg, Sweden, 2016.
- [5] Alagappan, A. V., K.V. Narasimha Rao, Kumar, R. K. A comparison of various algorithms to extract Magic Formula tyre model coefficients for vehicle dynamics simulations, Vehicle System Dynamics 53.2, 2015, pgs 154-178, doi:10.1080/00423114.2014.984727.
- [6] Talebitooti, R., Torabi, M. Identification of tire force characteristics using a Hybrid method, Applied Soft Computing 40, 2016, pgs 70-85, doi:10.1016/j.asoc.2015.09.053.
- [7] de Oliveira, A. N., Campos, C. G., Peralta, A. O., da Costa Neto, R. T., Caldeira, A. B. Parameters Estimation of a Tire Model Based on Julien's Theory; Society of Automotive Engineers (SAE), submetido.
- [8] da Costa Neto, R. T. Modelagem e Integração dos Mecanismos de Suspensão e Direção de Veículos Terrestres Através do Fluxo de Potência, Tese Doutorado, PUC-Rio, 2008.
- [9] Ozisik, M. N., Orlande, H. R. B. Inverse Heat Transfer: fundamentals and applications, Taylor & Francis, 2008, ISBN 1-56032-838-X.
- [10] Câmara, L. D. T., Silva Neto, A. J. Inverse stochastic characterization of adsorption systems by a random restricted window (R2W) method, In Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Optimization, 2008, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- [11] Bihain, A. L. J., Câmara, L. D. T., Silva Neto, A. J. Avaliação da rotina inversa R2W na estimação de parâmetros de transferência de massa no processo de adsorção de glicose e frutose, TEMA (São Carlos), vol. 13, nr. 3, 2012, pg 277-289, doi:10.5540/TEMA.2012.013.03.277.
- [12] Caldeira, A. B., da Costa Neto, R. T. and de Carvalho, M. S. Inverse Stochastic Identification of Vehicle Suspension Damping Coefficients, In Proceedings of the 5th International Conference on Engineering Optimization, 2016, Foz do Iguaçu, PR, Brazil.

Influência da Velocidade de Soldagem e Potência do Pré-Aquecimento Indutivo Localizado Sobre a Geometria de Juntas Soldadas

William Todendi Dutra, Ivan Guerra Machado, Arnaldo Ruben Gonzalez
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas,
Porto Alegre, RS, Brasil,
william.dutra@ufrgs.br

RESUMO: Este trabalho tem por objetivo avaliar, através de um Projeto de Experimentos 3k, a influência da velocidade de soldagem e da potência de pré-aquecimento indutivo localizado sobre a geometria de cordões de solda. O trabalho mostra que a penetração e largura do cordão de solda foram aumentadas com o aumento do pré-aquecimento, e reduziram com o aumento da velocidade de soldagem, sendo a velocidade de soldagem o fator com maior influência nas respostas.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem. Aquecimento indutivo localizado. Pré-aquecimento.

ABSTRACT: The purpose of this work is to evaluate the influence of welding speed and inductive localized preheating power on the geometry of a weld bead. The work shows that penetration and weld bead width increase with the increasing of the preheating and reduces with the increase in welding speed. The welding speed the factor with the greatest influence on the responses.

KEYWORDS: Welding. Inductive localized heating. Preheating.

1. INTRODUÇÃO

Em soldagem, a utilização de pré-aquecimento está intimamente ligada à redução das taxas de resfriamento da região soldada e, eventualmente, à diminuição da distorção. O pré-aquecimento é principalmente empregado em aços tratados termicamente ou termomecanicamente, ou naqueles que tendem a formar trinca induzida por hidrogênio, já que nesse caso são mantidas temperaturas onde as taxas de difusão do hidrogênio são significativamente maiores que aquelas em temperatura ambiente [1]. A necessidade de pré-aquecimento aumenta com o aumento da espessura do aço, com o maior nível de constrangimento da junta soldada e maior conteúdo de carbono/elemento de liga do aço, e por fim, da quantidade de hidrogênio difusível do metal de solda [2] [3].

Duas formas são as mais utilizadas para realizar o pré-aquecimento: uma com chama através de maçaricos para oxigás, e a outra pela utilização de mantas de aquecimento resistivo. Em ambos os casos, as áreas aquecidas são extensas, pois abrangem muito mais do que somente a área próxima ao cordão de solda. Esse problema pode ser contornado em alguns casos, utilizando-se uma máquina de aquecimento indutivo. Esse tipo de equipamento gera calor de forma rápida, uniforme e localizada, podendo ser focalizado através de concentradores de fluxo magnético (um dos princípios do funcionamento desse tipo de aquecimento) direta e somente na região a ser soldada.

Entretanto, o aquecimento localizado na junta também tem a função de auxiliar na fusão do metal base, fazendo com que este alcance temperaturas próximas à fusão do material. Esse pré-aquecimento pode favorecer o aumento da penetração do cordão de solda. Logo, em juntas de chapas mais espessas, pode ser descartada a usinagem de chanfro em alguns casos, e podem ser alcançadas maiores velocidades do processo de soldagem [4].

Com a função de auxiliar a fusão do material base, é proposta a utilização de um sistema de aquecimento indutivo, constituído por um indutor de formato adequado à aplicação do campo eletromagnético, e um concentrador de fluxo para concentrar as linhas do campo sobre a pequena área em que

se deseja soldar, montado em tandem com a tocha de soldagem. JONES [5] cita que a estratégia de usar um sistema composto visa reduzir, ou até eliminar distorções de soldagem e incrementar consideravelmente a produtividade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Em um sistema de soldagem composto, os parâmetros de montagem também podem ter influência sobre a geometria do cordão de solda. Na Fig. 1 é mostrado o esquema de montagem do sistema composto de soldagem com pré-aquecimento (devido à direção da soldagem e posição de montagem dos elementos) indutivo localizado, evidencian- do o indutor com concentrador de fluxo e os parâmetros de montagem, dti: distância tocha-indutor, dip: distância indutor-peça. O comprimento do indutor é fixo e representado pela cota li.

Em estudo anterior [6], foi determinado que os parâmetros de montagem ‘dti’ e ‘dip’ não afetam significativamente a geometria do cordão de solda, então se buscou entender melhor a participação da Velocidade de Soldagem (Vs) e Potência de Aquecimento Indutivo (Pind) sobre a geometria do cordão de solda. Na Fig. 2 são mostradas as cotas de medição da geometria do cordão avaliadas, tidas como a resposta à variação dos parâmetros de estudo, sendo: Pes: penetração do cordão de solda e Lcs: largura do cordão de solda.

- Para efeito de determinação dos níveis dos parâmetros de controle e de análise, considerou-se que uma soldagem adequada é aquela avaliada quanto à qualidade visual, considerando como critérios de avaliação o aspecto, o formato e a ausência de irregularidades superficiais do cordão de solda. Portanto, determinaram-se os parâmetros que seriam mantidos constantes e os valores máximos e mínimos dos parâmetros variáveis que seriam analisados. As variáveis do processo mantidas constantes foram:
 - Processo de soldagem MAG convencional.
 - Fonte de energia: curva característica tensão constante.
 - Eletrodo em corrente contínua polaridade positiva (CCEP).
 - Tensão de soldagem: 30 V.

- Ângulo de deslocamento da tocha: neutro.
- Eletrodo AWS E70S-6 com diâmetro de 1,2 mm.
- Velocidade de alimentação do arame: 8,0 m/min. (correspondendo a intensidade de corrente de aproximadamente 245 A).
- Gás de proteção: argônio + 25% CO₂, com vazão de 15 l/min.
- Distância do bico de contato à peça: 18 mm.
- Material base: chapas de aço AISI 1045 com 7,9 mm de espessura.

As dimensões das chapas são 76 mm de largura (aos pares) e 100 mm de comprimento, com a utilização de chapas postiças no início e fim do cordão de solda, com a finalidade de estabilização do arco antes de ele entrar na região a ser analisada. Estas condições de soldagem visaram estabelecer penetração menor do que 30% da espessura das chapas, com a finalidade de permitir uma melhor avaliação da variação da penetração frente aos outros parâmetros.

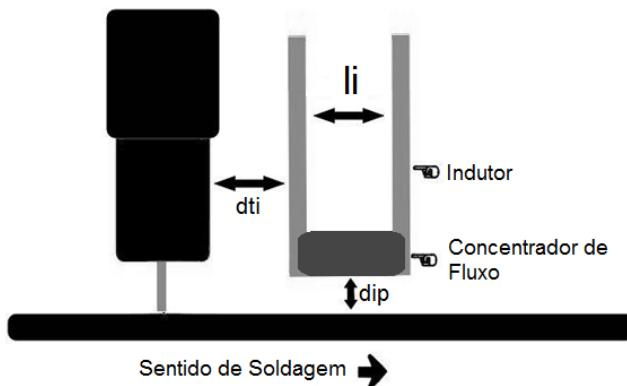


Fig. 1 - Esquema da montagem em tandem de um sistema de soldagem MIG/MAG com pré-aquecimento indutivo localizado.

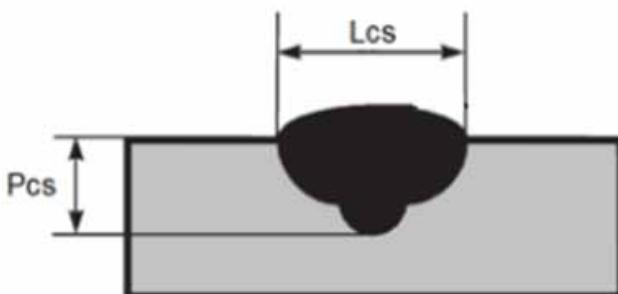


Fig. 2 - Parâmetros da geometria do cordão de solda avaliados. Pcs: penetração do cordão de solda e Lcs: largura do cordão de solda.

2.1. PRÉ-AQUECIMENTO INDUTIVO

Os princípios do aquecimento indutivo se baseiam na variação de um campo eletromagnético que induz uma corrente elétrica alternada a circular na peça a ser aquecida, de sentido oposto àquela que gerou o campo. Por sua vez, a corrente induzida na peça faz com que ela aqueça por efeito joule. Quanto maior a frequência da variação do campo eletromagnético, mais superficial é a concentração de corrente elétrica induzida e, por consequência, o aquecimento.

Foi utilizado um equipamento de aquecimento indutivo com capacidade de 15 kW de potência e frequência máxima de 200 kHz. Durante os experimentos, a frequência de operação foi de 111,1 kHz com potências de aquecimento

Pind= 6 kW e Pind=12 kW. As taxas de aquecimento, na superfície, alcançaram 30°C/s e 74°C/s para as respectivas potências, calculadas a partir da máxima temperatura e divididas pelo tempo de interação com o indutor durante o deslocamento.

2.2. Temperaturas de pré-aquecimento

A temperatura de pré-aquecimento localizado é um fator que depende tanto da potência ajustada no equipamento de aquecimento indutivo, tanto quanto da velocidade relativa entre indutor e peça a ser aquecida. Portanto variando esses dois fatores pode-se obter temperaturas em uma ampla faixa. Com o intuito de estimar estas temperaturas, foi utilizado uma termo câmera para a aquisição apenas desta interação. Foram feitas combinações das máximas e mínimas velocidades e potências para estimar os limites de temperaturas encontradas nos experimentos. A Fig. 3 mostra um exemplo de imagem adquirida com este equipamento, com a escala do campo de temperaturas gerado pelo software que a acompanha.

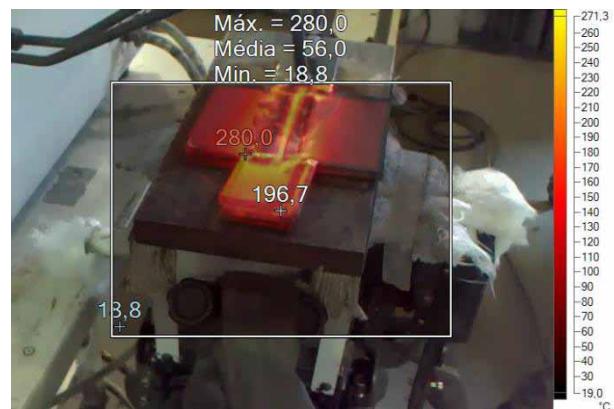


Fig. 3 - Imagem de peça aquecida indutivamente, adquirida com uma termo câmera.

A faixa de temperaturas superficiais de pré-aquecimento variou de aproximadamente 170°C para o caso de maior velocidade e menor potência, até 590°C para o de menor velocidade e maior potência de aquecimento. **Efeitos esperados para estas combinações de parâmetros.** Combinações intermediárias variaram em torno de 250°C a 420°C, conforme tabela 1.

2.3. Projeto de experimentos

Na elaboração do plano de estudo, utilizou-se o planejamento fatorial em três níveis, onde cada fator assume valor máximo, intermediário e mínimo. A utilização de planejamento de experimentos embasados em fundamentos estatísticos proporciona a obtenção de um número máximo de informações do sistema em estudo, a partir de um número mínimo de experimentos ou ensaios [7]. Os valores adotados para os níveis máximos, intermediários e mínimos encontram-se na Tabela 2.

Combinando-se esses níveis entre todos os fatores obtém-se N = 3k experimentos, onde k é o número de fatores analisados. Como foram analisados k = 2 fatores, o número de ensaios é N=9, somando uma repetição, totaliza-se 18 experimentos. A tabela 3 contém a combinação de fatores gerada pelo software Statistica®, em modo aleatório e replicado.

Tabela 1 - Valores de temperaturas adquiridos para a combinação de potência de pré-aquecimento indutivo e velocidade de soldagem.

Pot. (kW)	Velocidade (mm/s)	Temp. (°C)
12	6	590
12	12	418
6	6	253
6	12	167

Tabela 2 - Níveis utilizados para os fatores estudados.

Fator	Mínimo	Intermediário	Máximo
V _s : velocidade de soldagem (mm/s)	6	9	12
P _{ind} : potência do indutor (kW)	0	6	12

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizados os ensaios, os corpos de prova foram seccionados transversalmente ao cordão de solda, lixados e atacados quimicamente com reagente nital 10%. A seguir, com o auxílio de uma lupa estereoscópica avaliou-se Pcs e Lcs. Os resultados obtidos na aplicação do projeto fatorial, penetração e largura do reforço do cordão de solda, estão contidos nas 2 últimas colunas da Tabela 3.

A variação da penetração com os parâmetros avaliados se comportou como o previsto. Como adendo aos experimentos foi feita uma nova série de soldas na velocidade de soldagem de 3 mm/s para as diferentes potências de pré-aquecimento. Porém, esta série não foi utilizada no processamento dos resultados do projeto de experimentos, sendo somente analisada a penetração. A tabela 4 mostra os valores de penetração obtidos nas diferentes potências de pré-aquecimento para essa nova velocidade.

Tabela 3 - Planejamento factorial completo do experimento, e valores de penetração e largura do cordão de solda

Ordem	Réplica	P _{ind} (kW)	V _s (mm/s)	P _{cs} (mm)	L _{cs} (mm)
13	2	6	6	4,0	14,5
11	2	0	9	2,9	10,5
9	1	12	12	3,1	10,2
17	2	12	9	3,5	12,2
7	1	12	6	4,3	15,4
16	2	12	6	4,6	15,4
2	1	0	9	3,3	10,6
18	2	12	12	2,7	9,0
3	1	0	12	2,8	9,2
6	1	6	12	2,6	9,1
15	2	6	12	3,2	9,4
12	2	0	12	2,3	8,6
14	2	6	9	3,2	11,3
5	1	6	9	3,7	11,8
8	1	12	9	3,2	12,0
1	1	0	6	3,1	12,3
4	1	6	6	3,7	14,6
10	2	0	6	3,4	12,8

Tabela 4 – Valores de penetração do cordão de solda para as diferentes potências de pré-aquecimento na velocidade de soldagem de 3 mm/s.

Fator	Mínimo	Intermediário	Máximo
V _s : velocidade de soldagem (mm/s)	6	9	12
P _{ind} : potência do indutor (kW)	0	6	12

3.1. Análise de variância (ANOVA)

Para avaliar de maneira mais consistente os efeitos dos fatores principais empregados e a interação linear e quadrática sobre as respostas observadas, estas foram aplicadas à análise de variância. Neste trabalho, considerou-se como critério de análise que um determinado fator de controle afetou estatisticamente uma resposta, quando o valor-p obtido foi inferior a 5%, ou seja, uma confiança estatística de 95%. Mediante a ANOVA para a resposta em penetração, foi determinado que apenas os fatores linear de potência, linear de velocidade e a interação destes dois foram significativos na penetração, sendo as participações individuais de aproximadamente 19%, 48% e 10%, respectivamente, na faixa de estudo.

A Fig. 4 mostra o gráfico de Pareto em termos da significância dos parâmetros Vs e Pind normalizados, sobre a penetração, onde pode ser vista também a proximidade da significância escolhida (valor-p < 0,05). Observa-se que a penetração tem uma resposta linear à variação tanto de Vs quanto de Pind.

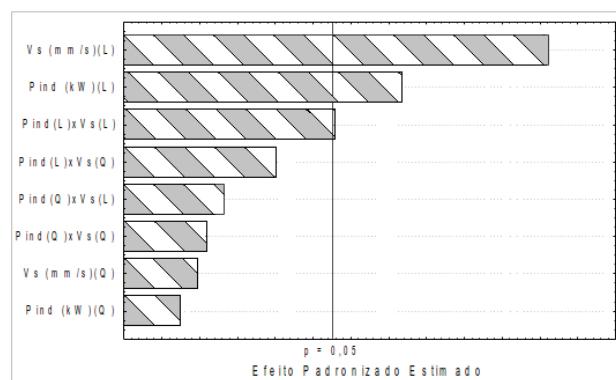


Fig. 4 – Diagrama de Pareto das interações lineares (L) e quadráticas (Q) dos parâmetros em relação à penetração do cordão de solda.

Na ANOVA da largura do cordão de solda, novamente os fatores principais Vs e Pind, e a interação linear desses dois fatores foi significativa na resposta. A participação da velocidade Vs é predominante na variação da largura do cordão de solda, sendo de quase 85% a sua importância, valor maior que na análise da penetração. A potência de aquecimento tem uma menor participação (aproximadamente 10%) e a interação linear dos dois fatores tem uma contribuição de praticamente 3%.

3.2. Análise da penetração do cordão de solda

Considerando todos os ensaios realizados é possível ver na Fig. 5(a) que ao aumentar a potência do aquecimento, e por consequência a temperatura do metal a ser soldado, a penetração teve aumento. Essa elevação de temperatura aproxima a fusão do material base, e assim o calor gerado pelo arco elétrico é usado primariamente para fusão do metal de adição [5]. Já na Fig. 5(b), a maior velocidade acarreta na redução da

penetração, isso ocorre, pois há menor energia por unidade de comprimento interagindo localmente para a fusão do material a ser soldado. Utilizando estes parâmetros, a penetração teve um aumento de 10% a 57% com o aumento da potência, e redução de 26% a 47% com o aumento da velocidade.

Na Fig. 6 é possível visualizar uma plotagem de curva de contorno da superfície de resposta da penetração para a interação entre potência e velocidade de soldagem. É possível notar a dominância da Vs sobre a Pind, ao passo que para maior velocidade (12 mm/s) a curva permanece sobre o mesmo campo para toda extensão de Pind. Ou seja, as superfícies têm uma tendência mais horizontal do que vertical.

A Fig. 7 mostra a penetração para todos os experimentos (incluindo a série adicional com velocidade igual a 3 mm/s), ressaltando a variação com a velocidade de soldagem, mostrada no eixo horizontal. É possível novamente visualizar a dominância da velocidade sobre a potência de pré-aquecimento pela tendência da penetração se igualar nas velocidades de soldagem mais altas.

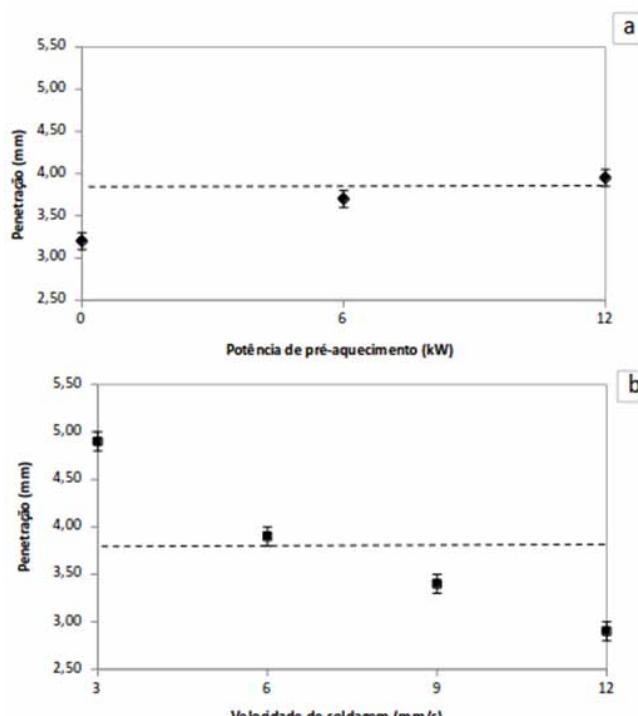


Fig. 5 - Penetração média do cordão de solda em função da potência de aquecimento indutivo (a) e velocidade de soldagem (b).

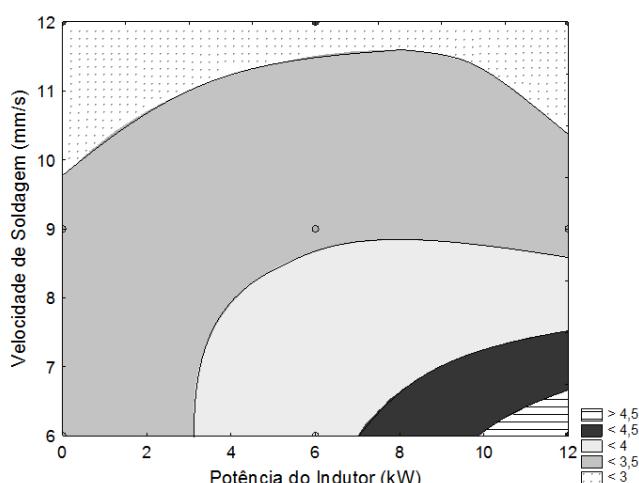


Fig. 6 - Curvas de contorno da superfície de resposta da penetração do cordão de solda para a interação velocidade de soldagem e potência de aquecimento indutivo.

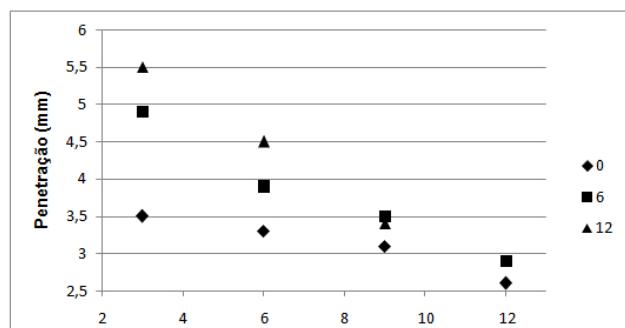


Fig. 7 – Penetração do cordão de solda em função da velocidade de soldagem para as diferentes potências de pré-aquecimento.

3.3. ANÁLISE DA LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA

A largura aumentou com a elevação da potência do pré-aquecimento indutivo localizado, enquanto diminuiu com o aumento da velocidade de soldagem. A Pind influencia na medida em que, ao aquecer a superfície da peça, o metal de adição demora mais para solidificar e fluir lateralmente por um tempo maior. A Fig. 8 mostra a variação da largura em função da potência de aquecimento e da velocidade de soldagem. Pode ser calculado a partir da Tabela 3 que o aumento da largura é de cerca de 19% na menor velocidade com o aumento da potência, enquanto na maior velocidade a variação é de aproximadamente 6%. Com o aumento da velocidade de soldagem, a redução da largura sem pré-aquecimento é de 13%. Porém, com pré-aquecimento, a redução é de 18% para as duas potências utilizadas.

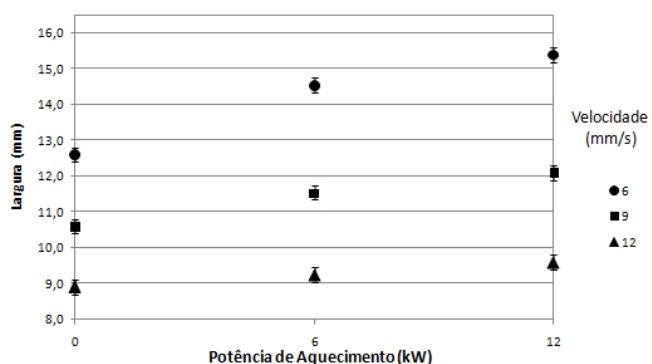


Fig. 8 - Relação da largura do cordão de solda com a potência de pré-aquecimento indutivo e velocidade de soldagem

Na Fig. 9 estão as curvas de nível de resposta da largura do cordão. Novamente é possível ver o caráter dominante da Vs sobre Pind através da horizontalidade das curvas. As figuras 7 e 8 também mostram a grande variação da largura em função dos parâmetros. Esta variação foi de cerca de 73% entre a de menor Vs com maior Pind, e a de maior Vs com menor Pind (sem pré-aquecimento).

A Fig. 10 mostra a relação entre os valores estimados e os observados, demonstrando relativamente boa aproximação do modelo com os valores obtidos experimentalmente.

Por fim, na Fig. 11 é possível ver macrografias de algumas das amostras, distribuídas de acordo com a velocidade de soldagem e potência de pré-aquecimento indutivo localizado utilizados em cada uma delas. É possível verificar o aumento de penetração e largura conforme mencionado.

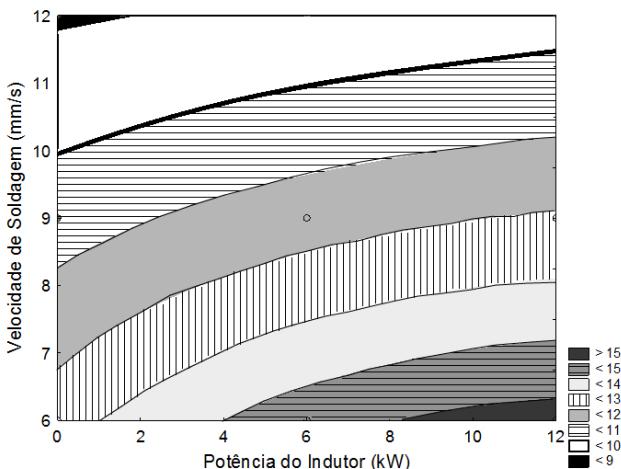


Fig. 9 - Curvas de contorno da superfície de resposta da largura do cordão de solda para a interação velocidade de soldagem e potência de aquecimento indutivo.

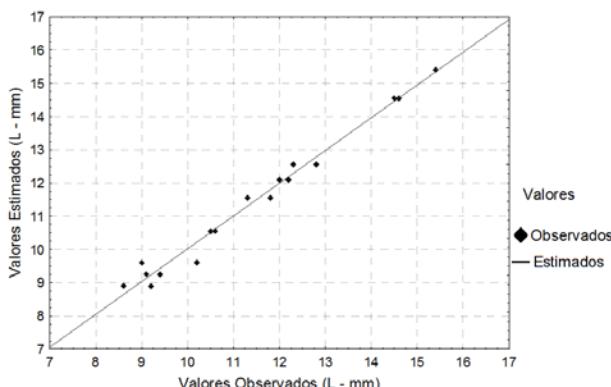


Fig. 10 - Relação entre valores estimados e observados na resposta da largura do cordão de solda.

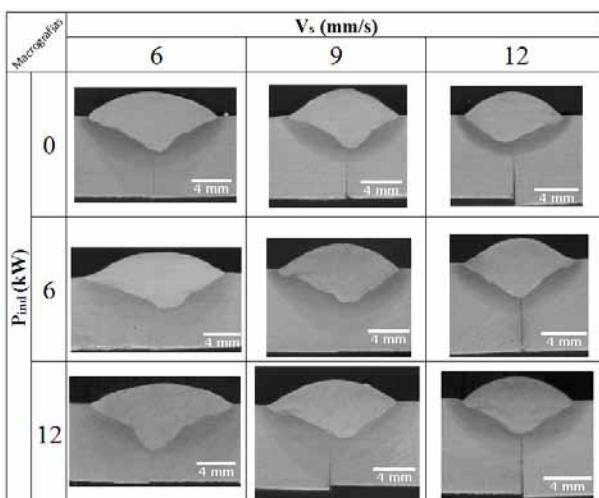


Fig. 11 - Macrografias da seção transversal dos cordões de solda distribuídos de acordo com a velocidade de soldagem e potência de pré-aquecimento indutivo localizado

4. CONCLUSÃO

Considerando os objetivos do trabalho, investigação de um sistema auxiliar de aquecimento indutivo localizado e do efeito dos parâmetros principais de aquecimento (potência do indutor) e de soldagem (velocidade de soldagem), sobre a geometria do cordão de solda, chega-se às seguintes conclusões:

Para todos os parâmetros de resposta, representada pela penetração e largura do cordão de solda, a velocidade de soldagem foi o parâmetro de maior significância entre os estudados, contribuindo de 48% a 84% na variação das respostas;

A potência de pré-aquecimento indutivo localizado teve efeito significativo sobre a variação da penetração e largura, sendo a sua participação de 10% a 18%, respectivamente.

Em maiores velocidades de soldagem, a tendência é a redução da variação das respostas, já que as temperaturas de pré-aquecimento são atenuadas pela menor energia por unidade de comprimento transferida pelo equipamento de indução;

A largura foi o parâmetro mais afetado, provavelmente devido à alta frequência de operação do equipamento de aquecimento indutivo, pois assim a concentração de calor é superficial e a penetração deste não chega a 5% da espessura das chapas soldadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BS EN 1011-2: 2001: 'Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Arc welding of ferritic steels', British Standards Institution, 2001.
- [2] EL RAYES, M., WALZ, C. e SEPOLD, G. The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry. *Welding Journal*, v. 83, n. 5, May 2004.
- [3] ALORAIER, A., IBRAHIM, R. e THOMSON P. FCAW Process to Avoid the Use of Post Weld Heat Treatment. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 83, p. 394 – 398, 2006.
- [4] JONES, J.; RHOADES, V.L.; MADDEN, S.K. High Deposition Welding for Shipbuilding. Paper No. P44, 2012 Presentation, NSRP Joint Panel Meeting, PPPF Panel, Minneapolis, MN, EUA.
- [5] JONES, J. Hybrid Induction Arc Welding Reduces Weld Distortion And Boosts Productivity. *Advanced Materials and Processes*, Jan, 2015.
- [6] DUTRA, W.T.; MACHADO, I.G.; GONZALES. A.R. Soldagem a Arco Assistida por Aquecimento Indutivo Localizado. Congresso Nacional de Soldagem, ABS, Belo Horizonte, Brasil, 2016.
- [7] NETO, B.B.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E., "Como fazer experimentos", Campinas, SP, Editora da Universidade Estadual de Campinas, 2007.

Geração de área de influência: método de Huff adaptado

Raquel Vieira da Silva¹, Vagner Braga Nunes Coelho²

¹ Instituto Militar de Engenharia (IME)

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

² 4º Centro de Geoinformação (4ºCGEO)

Avenida Marechal Bittencourt, 97, Compensa, Manaus,
AM, Brasil, 69027-140

RESUMO: A pesquisa procura gerar áreas de influência visando determinar localizações onde a atuação de um ponto gerador seja dominante em relação aos demais. Para tal, adapta-se a técnica desenvolvida por Huff, especificamente quanto ao cálculo do custo de deslocamento e o estabelecimento do parâmetro λ , visando eliminar o empirismo utilizado por Huff. A metodologia inicia-se com a aplicação da Lei de Reilly para identificar pontos de equilíbrio entre cada par de ponto gerador. Posteriormente, considerando uma influência igual nestes pontos, aplica-se a Lei de Huff adaptada visando desenvolver um ajustamento, pelo modelo paramétrico, das equações linearizadas, considerando o custo de deslocamento proporcional à distância euclidiana. O resultado do ajustamento é a valoração do parâmetro λ responsável por ponderar o custo de deslocamento. De posse da Lei de Huff adaptada e sua consequente aplicação, é procedido uma avaliação do resultado pelo Índice de Similaridade Cartográfico (ISC) visando comparar a metodologia desenvolvida com os métodos tradicionais de Voronoi e de Reilly. Constatata-se, por fim, a viabilidade da metodologia desenvolvida para obtenção de áreas de influência.

PALAVRAS-CHAVE: Geomarketing. Área de influência. Lei de Huff.

ABSTRACT: The research seeks to generate areas of influence in order to determine locations where the performance of one generating point is dominant in relation to the others. For this, the technique developed by Huff is adapted, specifically with regard to the calculation of the cost of displacement and the establishment of the parameter λ , in order to eliminate the empiricism used by Huff. The methodology begins with the application of Reilly's Law to identify equilibrium points between each pair of generator points. Later, considering an equal influence on these points, applies to Huff Act adapted in order to develop an adjustment, the parametric model, the linearized equations, considering the cost of proportional offset the Euclidean distance. The result of the adjustment is the valuation of the parameter λ responsible for weighing the displacement cost. Having the Act adapted Huff and its consistent implementation, is carried an evaluation of the results by Similarity Cartographic Index (CSI) in order to compare the methodology developed with traditional methods of Voronoi and Reilly. Finally, the feasibility of the methodology developed to obtain areas of influence is verified.

KEYWORDS: Geomarketing. Area of influence. Huff's Law.

1. INTRODUÇÃO

O mercado corporativo sempre está atento às demandas da sociedade e à busca de locais onde possua maior aceitação por parte dos potenciais clientes. Por conseguinte, identificar as regiões onde uma determinada empresa tenha maior facilidade de oferecer seus produtos é de suma importância para uma maximização de lucros tão desejada [1]. Tais regiões são usualmente identificadas a partir das pesquisas de mercado realizadas nos diversos locais onde se deseja obter uma “radiografia” dos anseios da comunidade. Estabelecer, porém, os limites geográficos destas regiões é tarefa da Cartografia. Evidentemente, o conhecimento cartográfico prévio da região de estudo favorece o estabelecimento das subdivisões encontradas *in loco*, em virtude das segmentações possíveis às quais a organização pode considerar [2].

Neste contexto, a aplicação de técnicas de delimitação das áreas de influência são de suma importância para a tomada de decisão empresarial, definição de rotas rentáveis e otimização de campanhas publicitárias. Isto porque a necessidade de se obter respostas rápidas podem ser impeditivas para uma averiguação do mercado *in loco*. Assim, inferências operacionalizadas por meio de metodologias aplicadas exclusivamente em gabinete podem oferecer uma resposta adequada e rápida a determinadas necessidades da organização. Destarte, o desenvolvimento ou a aplicação de técnicas de identificação das áreas de influência são de utilidade para a empresa hodierna.

Para se estabelecer uma área de influência é preciso considerar a existência de pontos geradores B_i , uma função de influência I associada a cada B_i e um método a ser aplicado.

Assim, é possível descrever, cartograficamente, os limites de uma determinada região a partir do estabelecimento de critérios para sua construção. No caso, os pontos geradores B_i são usualmente conhecidos pelo mercado corporativo como *Business Point*.

Evidentemente, a seleção ou o estabelecimento de uma metodologia é crucial para a geração de uma área de influência condizente com a realidade do mercado. Logo, não é suficiente apenas estabelecer um método, é necessário validá-lo com a realidade de campo para que se possa aplicá-lo com a devida segurança.

Assim, este artigo procura apresentar um método que viabilize a construção de áreas de influência considerando aspectos exclusivamente objetivos.

2. CONCEITOS

2.1. Ponto gerador

Neste trabalho, o ponto gerador é definido como o centro geográfico de uma organização qualquer; é um ponto comercial (*Business Point*). Destarte, é o local de origem de todos os aspectos que servem para influenciar os potenciais clientes, ou seja, as pessoas. Por conseguinte, tais aspectos podem ser atrativos (f_a) ou de repulsa (f_r). Daí, a necessidade de se compreender o mercado para que se possa estabelecer as condicionantes que tornam um efeito atrativo ou repulsivo para determinada clientela. Evidentemente, o ponto gerador B_i possuirá uma força resultante, que pode ser considerada simplesmente como a influência I exercida pela organização.

2.2. Função de influência

A influência I é uma função resultante capaz de modelar o espaço em que se encontre os pontos geradores. A função identifica locais onde um determinado ponto gerador B_i atua de modo relevante quando comparado aos demais pontos presentes na região. Destarte, cada metodologia utilizada estabelece uma função para a influência I . Logo, infere-se que cada método empregado gera uma área de influência potencialmente diferente da outra.

Quando aplicado ao mundo real, entende-se que a influência é a resultante entre as forças de atração f_a e de repulsão f_r , que um determinado ponto gerador p_i exerce sobre um ponto qualquer x . Assim, a influência é o resultado da diferença entre as forças e nunca inferior a zero (Eq. 1).

$$I(x, B_i) = \begin{cases} f_a(x, B_i) - f_r(x, B_i), & \text{se } f_a > f_r \\ 0, & \text{se } f_a \leq f_r \end{cases} \quad (1)$$

2.3. Áreas de influência

A área de influência Z é, na realidade, uma região modelada no entorno de um ponto gerador B_i a partir de uma hipótese válida. Os limites de Z são usualmente definidos por isócotas ou isócronas, gerando o que é conhecido como áreas influência primária, secundária e terciária [3].

Nesta pesquisa, para se estabelecer os limites de Z é preciso determinar a quantificação da influência I exercida pelo ponto gerador B_i em um ponto qualquer x de modo que a avaliação seja superior a um limiar \mathcal{E}_z dado. Neste caso, a área de influência de um determinado ponto é dado por Eq. 2:

$$Z(B_i) = \{\forall x \in \mathbb{R}^2 / I(x, B_i) \geq \mathcal{E}_z\} \quad (2)$$

O limiar \mathcal{E}_z é um valor percentual que permite avaliar a atuação de cada ponto gerado B_i em um dado universo. Assim, os valores para o limiar geram áreas de influência com a seguinte classificação [4]:

- Área de Influência Dominante: $I \geq \mathcal{E}_z = 50\%$
- Área de Influência Litigiosa: $10\% < I < 50\%$
- Área de Influência Residual: $I \leq 10\%$

3. EXEMPLO MOTIVADOR

Seja o espaço geográfico (Fig. 1) definido por uma região R qualquer. Considere-se, ainda, como B , o conjunto dos 9 pontos geradores B_i existentes na região, definidos da seguinte forma:

$$B = \left\{ \begin{array}{l} B_1 = (480000.0, 8980000.0); \\ B_2 = (500000.0, 8980000.0); \\ B_3 = (520000.0, 8980000.0); \\ B_4 = (480000.0, 9000000.0); \\ B_5 = (500000.0, 9000000.0); \\ B_6 = (520000.0, 9000000.0); \\ B_7 = (480000.0, 9200000.0); \\ B_8 = (500000.0, 9200000.0); \\ B_9 = (520000.0, 9200000.0) \end{array} \right\}$$

Para cada um dos pontos geradores estará associado uma influência. Por sua vez, inferir qual porção do espaço é influenciada diretamente por cada um dos pontos geradores é crucial para uma análise de geomarketing [5]. Evidentemente,

ter-se-á uma conformação da região caracterizada para cada modo particular de se avaliar a influência individualizada dos pontos geradores.

Visando permitir uma quantificação das áreas de influência, a região R foi subdividida em células de tamanho quadrangular, perfazendo um total de 4900 (70×70) células na região R proposta.

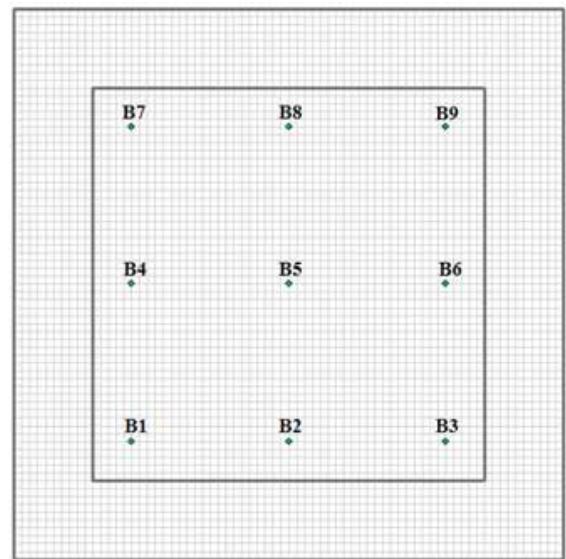


Fig. 1 - Exemplo motivador

4. MODELOS PARA ÁREA DE INFLUÊNCIA

A inferência de uma função I e a definição de um limiar \mathcal{E}_z são cruciais para o estabelecimento da área Z . Encontra-se na literatura alguns possíveis modelos para se estabelecer a área de influência a partir de uma função, dentro dos quais destacam-se:

- Diagrama de Voronoi [6];
- Lei de Reilly [7];
- Lei de Huff [8].

4.1 Diagrama de Voronoi

Seja $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\} \subset \mathbb{R}^2$. Neste caso, cada B_i é um ponto gerador. Logo, a função de influência I é dado pela avaliação das distâncias euclidianas d calculadas de um ponto qualquer x a um ponto gerador B_i . Neste caso, as áreas de influência são as localidades do plano onde a distância de um ponto qualquer a um ponto gerador específico é menor que a distância aos demais pontos do conjunto, ou seja, é identificado o mais próximo do ponto. Assim, tem-se a Eq. 3:

$$I = \begin{cases} 1, & \text{se } d(x, B_i) \leq d(x, B_j), \forall B_i \neq B_j \\ 0, & \text{nos demais casos} \end{cases} \quad (3)$$

Destarte, tem-se a obtenção das áreas de influência Z_v a partir da identificação das células que formam o Diagrama de Voronoi [9] – $Vor(P_B)$ - a partir de cada um de seus pontos geradores (Eq. 4):

$$Z_v(B_i) = \{\forall x \in \mathbb{R}^2 / I(x, B_i) > I(x, B_j), \forall B_j \neq B_i\} \quad (4)$$

Considerando o exemplo motivador (Seção 3), é possível aplicar o método de Voronoi aos pontos geradores e identificar as áreas de proximidade (Fig. 2).

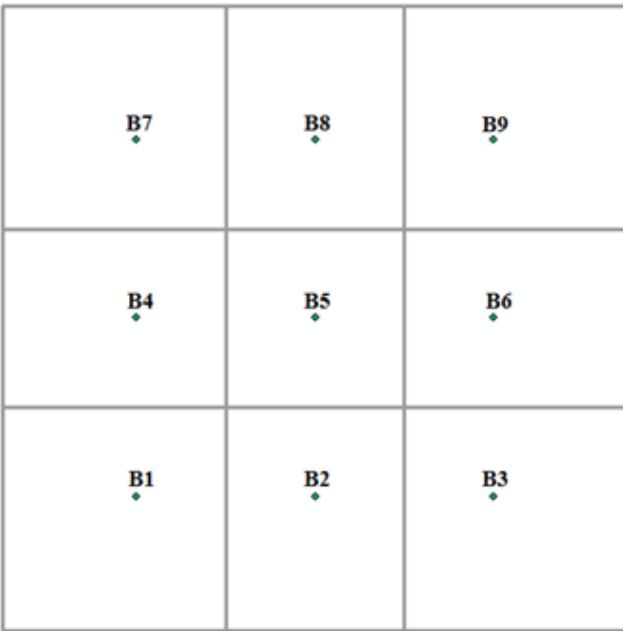


Fig. 2 – Áreas de influência obtidas por Voronoi

4.2 Lei de Reilly

O Lei de Gravitação Universal estabelecida por Newton inspirou William Reilly a estabelecer o que ficou conhecido como a Lei de Reilly ou Teoria Gravitacional do Varejo [2]. Neste caso, a premissa da Lei estabelece que um determinado ponto qualquer é mais influenciado por pontos geradores próximos. Logo, ao se quantificar a influência de dois pontos geradores distintos ($(B_i \text{ e } B_j)$) é possível calcular a distância de um destes até um ponto específico conhecido como ponto R_{ij} de equilíbrio de Reilly.

Esta distância de equilíbrio (Eq. 5), permite construir regiões onde há maior influência de um ponto gerador específico. Tal região forma um polígono que representa a predominância de B_i em relação aos demais $B_j, \forall j \neq i$.

$$d(R_{ij}, B_i) = \frac{d(B_i, B_j)}{1 + \sqrt{\frac{I(B_i)}{I(B_j)}}} \quad (5)$$

sendo,

$d(R_{ij}, B_i)$ é a distância de equilíbrio contada a partir de B_i na direção $(B_i B_j)$;

$d(B_i, B_j)$ é a distância entre os pontos B_i e B_j ;

$I(B_i)$ e $I(B_j)$ são as influências dos pontos B_i e B_j , respectivamente.

A partir dos pontos geradores B_i e B_j é possível se calcular o azimute Az_{ij} entre eles e com o conhecimento da distância de equilíbrio $d(R_{ij}, B_i)$ calcular as coordenadas de R_{ij} da seguinte forma (Eq. 6):

$$\begin{cases} R_{ij}.x = B_i.x + d(R_{ij}, B_i) \cdot \text{sen}(Az_{ij}) \\ R_{ij}.y = B_i.y + d(R_{ij}, B_i) \cdot \text{cos}(Az_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

A partir dos pontos de equilíbrio R_{ij} é possível construir o Diagrama de Reilly (Fig. 3), gerando as áreas de influência Z_R individuais de cada ponto gerador B_i .

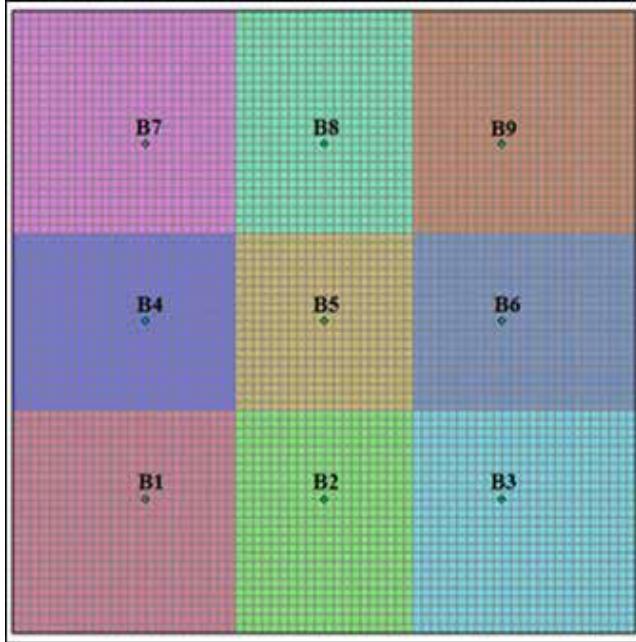


Fig. 3 – Áreas de influência obtidas pela Lei de Reilly

Ao se observar a Lei de Reilly, percebe-se que esta é uma generalização do Diagrama de Voronoi (Seção 4.1). Caso as influências I de cada ponto gerador sejam iguais, o Diagrama gerado pela Lei de Reilly será idêntico ao Diagrama construído a partir de Voronoi. Assim, há que se utilizar a Lei de Reilly somente quando houver valores distintos para as influências I de cada ponto gerador B_i .

4.3 Lei de Huff

David Huff apresentou o modelo de interação espacial baseado na aferição da probabilidade de pontos quaisquer no espaço serem influenciados por um determinado ponto gerador. Ressalta-se de que este modelo sugere a existência de zonas de influência complexas, contínuas e probabilísticas. Neste caso, ocorrem áreas de sobreposição com influências múltiplas. Isto porque a influência I de um ponto gerador específico B_i não afeta exclusivamente um determinado ponto x qualquer da região. Sempre há uma influência de todos os demais pontos geradores encontrados na região. Assim, a Lei de Huff favorece a valoração de influência, em um determinado ponto B_i , de um ponto gerador específico x ao se computar todos os demais pontos $B_j, \forall j \neq i$ da região.

A probabilidade P_H , portanto, é dado por Eq. 7:

$$P_H(x, B_i) = \frac{\frac{I(B_i)}{T(x, B_i)^\lambda}}{\sum_{k=1}^n \frac{I(B_k)}{T(x, B_k)^\lambda}} \quad (7)$$

sendo,

$P_H(x, B_i)$ é a probabilidade com a qual o ponto x é influenciado pelo ponto gerador B_i ;

$I(B_k)$ é a influência exercida pelo k -ésimo ponto gerador;

$T(x, B_k)$ é o custo de deslocamento do k -ésimo ponto gerador ao ponto x ;

λ é um parâmetro estimado empiricamente que visa refletir o efeito do custo de deslocamento.

Por Eq. 7, percebe-se que dois elementos são cruciais para uma determinação adequada da probabilidade. O custo de deslocamento $T(x, B_k)$ e o parâmetro λ . O custo de

deslocamento, evidentemente, pode ser aferido de diversos modos, tais como:

- pela distância euclidiana;
- pela distância sobre grafos;
- tempo despendido no deslocamento.

Avaliar qual o melhor modo aplicar para o cálculo do custo de deslocamento, permitirá obter-se uma resposta mais adequada à probabilidade. Fator crucial para se obter uma resposta satisfatória utilizando a Lei de Huff. Há, ainda, o parâmetro λ , que por ser inferido empiricamente, irá atuar sobre o custo a partir de um tipo específico de mercado. Neste caso, λ irá vincular-se diretamente ao custo de deslocamento estabelecido.

5. METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Com o intuito de se eliminar a subjetividade no processo de caracterização das áreas de influência, esta pesquisa propôs uma metodologia com a finalidade de inferir o parâmetro empírico λ da Lei de Huff ao se identificar pontos de equilíbrio obtidos pela formulação proposta por Reilly, da seguinte forma:

- Identificar os pontos geradores B_i ;
- Calcular os pontos de equilíbrio de Reilly;
- Adaptar do cálculo do custo de deslocamento T ;
- Ajustar o parâmetro λ ;
- Calcular as probabilidades segundo Huff;
- Classificar as áreas de influência.
- Para se viabilizar a construção da Lei de Huff que se aplique aos pontos geradores é necessário definir o custo de deslocamento e inferir adequadamente o parâmetro λ . Entretanto, para se inferir um valor para λ é preciso estabelecer um método de cálculo para se evitar a determinação de forma empírica. Para tal, esta pesquisa propõe uma metodologia combinada entre a Lei de Reilly R_{ij} e a Lei de Huff. Por conseguinte, é necessário calcular o ponto de equilíbrio de Reilly e neste ponto calcular-se a probabilidade de Huff considerando-a igual (50%), posto ser este um ponto de equilíbrio.

Considerando o conjunto B (Seção 2) dos pontos geradores e tendo suas influências individuais arbitradas com um valor unitário, obtém-se 36 pontos de equilíbrio de Reilly R_{ij} , sendo que há superposição em alguns dos pontos em função da influência ser idêntica para todos os pontos geradores. Sendo visível, portanto, apenas 21 pontos de equilíbrio (Fig. 4).

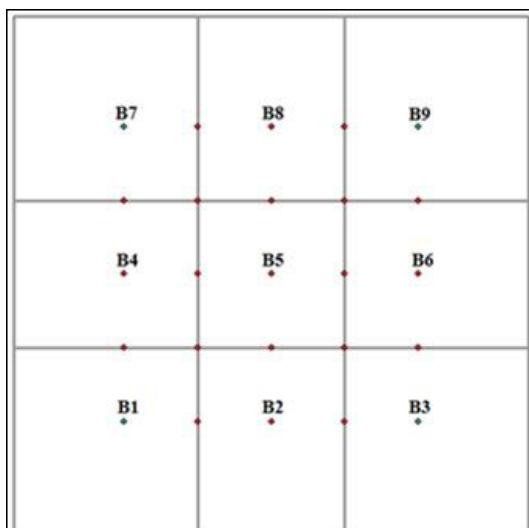


Fig. 4 – Pontos de equilíbrio de Reilly

Esta pesquisa considerou como modelo para o custo de deslocamento $T(x, B_k)$ o tempo decorrido entre o ponto gerador B_i e o ponto x . Visando a simplificação, considerou-se um deslocamento realizado com uma velocidade constante, ou seja, $v = c^{te}$, daí resulta que:

$$T(x, B_k) = \frac{1}{v} \cdot d(x, B_k) \Rightarrow T(x, B_k) \propto d(x, B_k) \quad (6)$$

Neste caso, $T(x, B_k)$ pode ser substituído por $d(x, B_k)$ sem alteração na probabilidade oferecida pela Lei de Huff. Logo, tem-se (7) generalizado da seguinte forma:

$$P(x, B_i) = \frac{\frac{I(B_i)}{T(x, B_i)^\lambda}}{\sum_{k=1}^n \frac{I(B_k)}{T(x, B_k)^\lambda}} = \frac{\frac{I(B_i)}{d(x, B_i)^\lambda}}{\sum_{k=1}^n \frac{I(B_k)}{d(x, B_k)^\lambda}} \quad (7)$$

Aplicando-se a Lei de Huff no ponto de equilíbrio obtido por Reilly R_{ij} obtém-se a seguinte condição (Eq. 8):

$$P(R_{ij}, B_i) = \frac{\frac{I(B_i)}{d(R_{ij}, B_i)^\lambda}}{\sum_{k=1}^n \frac{I(B_k)}{d(R_{ij}, B_k)^\lambda}} = \frac{\frac{I(B_i)}{d(R_{ij}, B_i)^\lambda}}{\sum_{k=1}^n \frac{I(B_k)}{d(R_{ij}, B_k)^\lambda}} = P(R_{ij}, B_j) \quad (8)$$

Ao se analisar a Eq. 8 - condição aplicável aos pontos de equilíbrio obtidos por Reilly – percebe-se que o denominador $\sum_{k=1}^n \frac{I(B_k)}{d(R_{ij}, B_k)^\lambda}$ é o mesmo. Logo, constante. Neste caso, da Eq. 8 pode-se inferir a simplificação (Eq. 9):

$$P(R_{ij}, B_i) = \frac{I(B_i)}{d(R_{ij}, B_i)^\lambda} = \frac{I(B_j)}{d(R_{ij}, B_j)^\lambda} = P(R_{ij}, B_j) \quad (9)$$

A partir da Eq. 9 verifica-se que a condição de equilíbrio proporciona simplificações e linearizações que favorecem o procedimento posterior de cálculo da seguinte forma:

$$\frac{I(B_i)}{d(R_{ij}, B_i)^\lambda} = \frac{I(B_j)}{d(R_{ij}, B_j)^\lambda} \Rightarrow I(B_i) \cdot d(R_{ij}, B_j)^\lambda = I(B_j) \cdot d(R_{ij}, B_i)^\lambda \quad (10)$$

Linearizando e desenvolvendo, tem-se:

$$\ln(I(B_i) \cdot d(R_{ij}, B_j)^\lambda) = \ln(I(B_j) \cdot d(R_{ij}, B_i)^\lambda),$$

$$\ln(I(B_i)) + \ln(d(R_{ij}, B_j)^\lambda) = \ln(I(B_j)) + \ln(d(R_{ij}, B_i)^\lambda),$$

$$\ln(I(B_i)) + \lambda \cdot \ln(d(R_{ij}, B_j)) = \ln(I(B_j)) + \lambda \cdot \ln(d(R_{ij}, B_i)).$$

Logo,

$$\lambda \cdot \ln(d(R_{ij}, B_j)) - \lambda \cdot \ln(d(R_{ij}, B_i)) = \ln(I(B_j)) - \ln(I(B_i))$$

Finalmente, obtém-se a equação de condição linearizada (Eq. 10) aplicada aos pontos de equilíbrio:

$$\lambda \cdot (\ln(d(R_{ij}, B_j)) - \ln(d(R_{ij}, B_i))) = \ln(I(B_j)) - \ln(I(B_i))$$

Sejam, $D_i = \ln(d(R_{ij}, B_i))$, $D_j = \ln(d(R_{ij}, B_j))$, $S_i = \ln(I(B_i))$ e $S_j = \ln(I(B_j))$. Tem-se a equação linearizada simplificada (Eq. 11):

$$\lambda \cdot (D_j - D_i) = (S_j - S_i) \quad (11)$$

Sabe-se que (11) é aplicada a cada par de pontos gerado-

res. Logo, ter-se-á $C_2^n = \frac{n!}{(n-1)! \cdot 2!} = \frac{n \cdot (n-1)}{2}$ equações, obtidas a partir dos n pontos geradores existentes. No caso do exemplo motivador tem-se n=9. Logo, haverá 36 equações.

De posse de (11) é possível proceder o ajuste do valor considerando o modelo paramétrico (Eq. 12):

$$\lambda = (A^T \cdot L)^{(-1)} \cdot A^T \cdot L \quad (12)$$

sendo,

$$A = \begin{bmatrix} D_2 - D_1 \\ \vdots \\ D_i - D_j \\ \vdots \\ D_n - D_{n-1} \end{bmatrix} \text{ e } L = \begin{bmatrix} S_2 - S_1 \\ \vdots \\ S_i - S_j \\ \vdots \\ S_n - S_{n-1} \end{bmatrix}, \text{ para } 1 \leq j < i \leq n.$$

A partir dos pontos R_{ij} é possível proceder o ajustamento do valor do parâmetro λ existente na Lei de Huff. A aplicação do método (Eq. 12) no exemplo motivador (Seção 3) permitiu obter o valor 2.0 para λ . Assim, obtém-se a seguinte formulação para a Lei de Huff (Eq. 13) aplicada ao exemplo.

$$P(x, B_i) = \frac{\frac{1}{d(x, B_i)^2}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{d(x, B_k)^2}} \quad (13)$$

Destarte, é possível visualizar as áreas de influência litigiosas ($0,10 \leq f_z < 0,50$) e dominantes ($f_z \geq 0,50$), conforme pode ser observado na Fig. 5, sendo as regiões em verde as áreas dominantes.

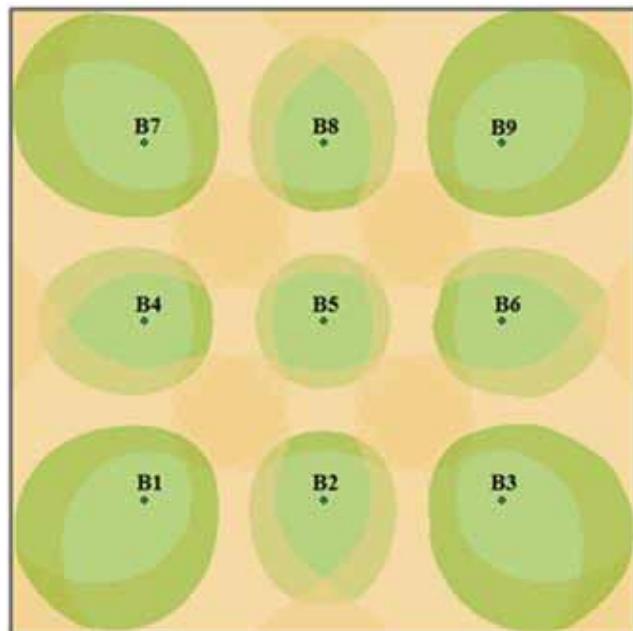


Fig. 5 – Áreas de influência obtidas pela Lei de Huff

6. ANÁLISE DAS METODOLOGIAS

Ao se observar as 3 (três) formas de inferir regiões de dominância, percebe-se algumas particularidades que podem ser observadas, especialmente quanto à superposição de áreas e a obtenção das mesmas de modo probabilístico (Tabela 1).

Tabela 1 – Análise metodologias

Metodologia	Superposição?	Probabilística?
Diagrama de Voronoi	Não	Não
Lei de Reilly	Não	Não
Lei de Huff	Sim	Sim

O Diagrama de Voronoi se assemelha à Lei de Reilly por viabilizar a construção de regiões sem interseções. Neste caso, há criações de células individualizadas sem regiões de atuação nebulosa. Evidentemente, esta aproximação não se coaduna com a realidade observada. Sabe-se que embora haja regiões de clara dominância por parte de um ponto gerador qualquer, há regiões onde há disputas acirradas do mercado e que não podem ser caracterizado como dominada por um ponto gerador qualquer.

Diante dos fatos observados, presume-se que a Lei de Huff adequa-se melhor ao fenômeno de eleição das regiões de dominância relativas a um conjunto de pontos geradores. Entretanto, a Lei de Huff apresenta como inconveniente a não objetividade para o estabelecimento na forma de se avaliar o custo de deslocamento e no empirismo da determinação do parâmetro .

A partir das Figuras 2, 3 e 4 pode-se quantificar a quantidade de células influenciadas por cada ponto gerador no caso tanto de Voronoi como pela Lei de Reilly, conforme a Tabela 2, e pela Lei de Huff, considerando apenas as Áreas Dominantes (Tabela 3) e Litigiosas (Tabela 4). Além disso, é possível avaliar a similaridade das regiões criadas por meio do Índice de Similaridade Cartográfico (ISC), conforme especificado por [10] e apresentada pela Eq. 14, para cada par de metodologias aplicada (Tabela 5). No caso, e são as áreas obtidas após a aplicação de cada metodologia.

$$ISC(A_i, A_j) = \frac{A_i \cap A_j}{A_i \cup A_j} \quad (14)$$

Na Tabela 5 verifica-se que método adaptado de Huff produz uma similaridade diferente das encontradas quando se compara Voronoi com Reilly. Tal fato decorre em função de Huff ser um método probabilístico cuja interação com os pontos geradores são sempre considerados, independentemente da distância. Como Huff é mais adequado a realidade do mercado corporativo, pela Tabela 5 observa-se que tanto Reilly quanto Voronoi são aproximações menos precisas que a desenvolvida por Huff.

Tabela 2 – Quantidade de células por ponto gerador utilizando Voronoi e a Lei de Reilly

Ponto gerador	Qtd células	Ponto gerador	Qtd células	Ponto gerador	Qtd células
	625		500		625
	500		400		500
	625		500		625

Tabela 3 – Quantidade de células dominantes por ponto gerador utilizando a Lei de Huff

Ponto gerador	Qtd células	Ponto gerador	Qtd células	Ponto gerador	Qtd células
	425		260		425
	260		180		260
	425		260		425

Tabela 4 – Quantidade de células litigiosas por ponto gerador utilizando a Lei de Huff

Ponto gerador	Qtd células	Ponto gerador	Qtd células	Ponto gerador	Qtd células
	625		940		625
	940		770		940
	625		940		625

Tabela 5 – Análise do Índice de Similaridade Cartográfico

	Voronoi	Lei de Reilly	Lei de Huff
Voronoi	-	1,00	0,68
Lei de Reilly	1,00	-	0,68
Lei de Huff	0,68	0,68	-

Ao se observar as Tabelas 2, 3 e 4 verifica-se que tanto Voronoi quanto Reilly geram diagramas que ocupam, diferentemente de Huff, toda a região a ser modelada – total de 4900 células. Neste caso, constata-se que apenas a aplicação da Lei de Huff é capaz de identificar áreas de dominância com valoração da atuação da influência. Assim, apenas a Lei de Huff permite, a partir de uma influência, especificar as áreas dominantes, litigiosas e residuais (Seção 2.3) consideradas a partir de respectivos limiares. Residindo, ainda, como óbice a aplicação desta técnica, identificar o modo mais adequado para se inferir o parâmetro.

Percebe-se ao analisar as Tabelas que não há proporcionalidade entre as regiões de dominância e a litigiosa, ou seja, são áreas geradas de modo totalmente independentes. Neste caso, é possível determinar que quanto mais central for a unidade de negócio, desde que tenha um valor de influência representativo, maior será a área litigiosa gerada.

Acrescenta-se, também, que a posição geográfica do ponto gerador influencia a área de influência. Logo, apenas considerar a influência não é necessário e suficiente para se obter uma área maior; sua localização relativa frente aos demais pontos geradores também terá impacto sobre a área de influência a ser obtida.

7. CONCLUSÕES

A pesquisa desenvolvida procurou estabelecer uma nova forma de se avaliar e de se gerar uma área de influência. Para tal, foram aplicados os métodos determinísticos clássicos de Voronoi e de Reilly e se propôs uma adaptação ao método probabilístico de Huff. Basicamente a proposta de adaptação do método de Huff procurou eliminar o empirismo existente na formulação da Lei.

Com a adoção de uma metodologia adaptada de Huff foi possível gerar as áreas de influência sem o empirismo caracterizado na proposta clássica do método. Neste caso, a determinação de modo objetivo da Lei de Huff, por meio do ajustamento de observações considerando nos pontos de equilíbrio obtidos por Reilly uma probabilidade de 50%, mostrou-se mais satisfatória do que os demais métodos.

A metodologia empregada no exemplo motivador mostrou-se viável. Entretanto, o método demanda maiores cuidados em casos de cenários com distribuições espaciais mais complexas. É mister aplicar Huff adaptado em outros conjunto de dados. Entretanto, observações gerais podem ser inferridas. Percebe-se que quanto mais distante uma determinada unidade de negócio se encontra daquela de maior influência

e quanto menos esta encontrar-se envolvida por outras unidades, maior será a sua região de dominância.

Ressalta-se, também, de que não apenas a influência é relevante para a unidade de negócio. Sua posição relativa frente aos seus concorrentes exercem uma relevância considerável na geração das áreas de dominância e litigiosa. Conforme pode ser observado, quanto mais central for a unidade de negócio maior será a sua área litigiosa e menor a de dominância. Em oposição a esta observação tem-se que quanto mais extrema for a unidade de negócio menor será a área litigiosa e maior a de dominância, evidentemente em função da extensão do locus e do espaçamento entre as unidades de negócio.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Masano, T. F. Geografia de Mercado. In: Sérgio Roberto Dias (Org.) Gestão de Marketing: Professores do Departamento de Mercadologia da FGV-EAESP e Convidados; Saraiva: São Paulo, 2010;
- [2] Kotler, P.; Armstrong, G. Introdução ao marketing; Editora LTC: São Paulo, 2000;
- [3] Applebaum, W. Methods for determining store trade areas, market penetration, and potentials sales; Journal of Marketing Research, Vol 3, nº 2: 1966, pp 127-141;
- [4] da Silva, R. V. Adaptação ao Método de Huff para geração de áreas de influência; Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Enseñaria, 2015;
- [5] Cliquet, G., Geomarketing: methods and strategies in spatial marketing; John Wiley & Sons: 2006;
- [6] Aragão, P.; Medeiros, C. M. B. Voronmarketing; IN: C. IOCHPE, G. CAMAR (Ed), VI Brazilian Symposium on Geoinformatics – GEOINFO; São José dos Campos: 2004;
- [7] Reilly, W. The law of retail gravitation; Ed WJ Reilly, 1931;
- [8] Huff, D. L. Defining and estimating a trading area; Journal of Marketing nº 28, 1964;
- [9] Boots, B. Voronoi (Thiessen) Polygons; Geo Books: 1986;
- [10] Coelho, V. B. N.; Strauch, J. C. M.; Esperança, C. Similarity among multiple geographic representations; International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-3-4/C; ISPRS: 2009

Consumo de energia em redes Ad-Hoc para uso em ambientes de comando e controle

Marcelo F. Vasconcelos*, Ronaldo M. Salles

Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro,

RJ, Brasil, 22290-270

* vasconcelos@ime.eb.br

RESUMO: A minimização do consumo de energia em redes Ad-Hoc constitui uma grande preocupação para os administradores desse tipo de rede. Com a disponibilidade cada vez maior de recursos de redes, as operações que envolvem os conceitos de Comando e Controle, sejam civis ou militares, podem cada vez mais se beneficiar desse tipo de estudo. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica dos principais conceitos de redes de comando e controle, bem como sobre o consumo de energia em redes Ad-Hoc, que são bastante utilizadas nesse tipo de ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Comando e Controle. Redes Ad-Hoc. Consumo de energia.

ABSTRACT: Minimizing energy consumption in Ad-Hoc networks is a major concern for network administrators. With the increasing availability of network resources, operations involving the concepts of command and control, whether civilian or military, can increasingly benefit from this type of study. This work presents a bibliographic review on main concepts of command and control networks and energy consumption on Ad-Hoc Networks, which are commonly used on command and control environments

KEYWORDS: Command and Control. Ad-Hoc Networks. Energy Consumption.

1. INTRODUÇÃO

As redes de computadores se tornaram uma ferramenta essencial para todas as pessoas. Diversas situações do cotidiano agora estão fortemente ligadas às redes, seja na utilização de serviços básicos, no entretenimento ou na interação com outras pessoas.

Além dessa utilização essencialmente pela população civil em situações de normalidade, as redes de computadores também desempenham um papel fundamental em situações de defesa civil e guerras, através de cenários de comando e controle (C2).

Situações de guerra são hostis para as redes de comunicações. Além das limitações impostas pela infraestrutura, como por exemplo fonte de energia limitada, existem dificuldades impostas pelo inimigo, como ataques cibernéticos e ataques à integridade física da rede por meio de interferência eletromagnética ou bombardeios.

A guerra moderna pressupõe a troca de informações rápidas e o processo de tomada de decisão está diretamente ligado ao rápido fluxo de informações. Com as novas tecnologias disponibilizadas, informações de sensores, imagens e vídeos estão cada vez mais presentes no campo de batalha e a disponibilização desse conteúdo, para o ponto central onde as decisões estratégicas são tomadas, é vital para o sucesso das operações.

Operações militares em que os tomadores de decisões estratégicas não têm conhecimento de todos os dados para a correta tomada de decisão, podem ser levadas ao insucesso, seja pela vitória do inimigo ou por baixas causadas por situações de fogo amigo. O fogo amigo ocorre quando tropas da mesma força se atacam por puro desconhecimento uma da outra.

Redes de C2 apresentam características bem definidas, como a demanda de tráfego variável, a distribuição em uma área geográfica definida e a necessidade de conexão em tempo real. A combinação entre a demanda de tráfego variável e a necessidade de conexão em tempo real, podem ser fundamentais para alcançar o objetivo desejado. Não atender a es-

sas demandas no momento que elas ocorrem, pode significar uma situação de fracasso.

Com o objetivo de aumentar as chances de sucesso em operações militares, beneficiando-se de todas as informações possíveis no momento mais adequado, as redes de computadores aplicadas aos ambientes de C2 precisam atender as demandas de tráfego impostas pela situação e manter o seu funcionamento pelo maior tempo possível.

Neste artigo será apresentada uma revisão bibliográfica, abordando os principais conceitos de redes de C2 e outros tópicos de interesse para o estudo da redução do consumo de energia em redes de C2. Os tópicos abordados são: características relacionadas com o consumo de energia em redes Ad-Hoc, redes de sensores e minimização do consumo de energia.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a revisão da literatura e a seção 3, as considerações finais.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção serão apresentadas as revisões literárias divididas em quatro partes, a primeira para redes de comando e controle, a segunda para redes wireless Ad-Hoc, a terceira para redes de sensores e a quarta para redução do consumo de energia em redes.

A primeira parte compreendeu a coleta de dados sobre trabalhos que envolvam redes de comando e controle, buscando o maior número de informações sobre as características de topologia e tráfego que são importantes nestes cenários. Os resultados nessa parte da pesquisa levaram a definição das características específicas de ambientes de comando e controle. Os principais tópicos são apresentados na subseção 2.1

A segunda parte realizada foi o estudo das redes wireless Ad-Hoc, especialmente em relação aos possíveis casos de minimização do consumo de energia na ligação entre os nós. As revisões dos principais trabalhos estão apresentadas

na subseção 2.2. A minimização do consumo de energia na topologia existente é um tópico de interesse, pois em redes de C2 os nós podem estar sendo alimentados por fontes de energia limitadas, com isso, garantir o seu funcionamento pelo maior tempo possível é um objetivo a ser alcançado. Mesmo em redes com infraestrutura, as áreas de cobertura podem ser atendidas por diferentes combinações de nós e a redução no consumo de energia é igualmente importante.

A terceira parte realizada foi o estudo de redes de sensores que compõem uma grande área de pesquisa, com diversas aplicações civis e militares. Esse tipo de rede busca garantir uma cobertura para uma determinada área de interesse e disponibilizar os dados coletados para um processo de tomada de decisão.

A quarta e última parte apresenta alguns trabalhos de interesse com o objetivo de reduzir o consumo de energia em redes que podem ser utilizadas em ambientes de C2.

2.1 Redes de Comando e Controle

O termo Comando e Controle (C2) é um termo militar utilizado para gerenciar pessoas e recursos [1]. O cenário de C2 possui algumas características específicas, que não fazem parte das preocupações levadas em conta em um projeto de redes usual. Uma rede de C2 possui como principal característica levar os dados coletados ao longo da rede para um ponto central. A partir deste, os dados são processados e transformados em informações, que, por sua vez, são utilizados para o auxílio no processo de tomada de decisão.

Os ambientes em que são empregadas as técnicas de C2 normalmente são hostis ou com limitações de infraestrutura, como, por exemplo, nas operações militares ou situações de desastres.

Em [2] são apresentados diversos conceitos de interesse a respeito do uso de redes em ambientes de C2. A seguir serão apresentados alguns desses conceitos que servirão de apoio na definição da pesquisa realizada.

Operações militares apresentam uma cadeia de comando muito bem definida. Isso não quer dizer que não exista comunicação fora dessa cadeia de comando, mas a maior parte da comunicação seguirá a cadeia. Essa característica afeta diretamente a topologia, pois os locais ocupados pelos postos de comando são geralmente fixos e esses pontos vão ser origem e destino de grande parte do tráfego nessa rede.

As operações militares são baseadas em missões. As unidades que participam dessas missões devem cooperar entre si em busca de um objetivo único. O conhecimento prévio desse objetivo também pode influenciar na rede a ser utilizada, possibilitando uma certa previsibilidade nas necessidades de tráfego.

As operações são realizadas em áreas determinadas e por um período de tempo definido e a disposição dos nós não será aleatória.

Outra característica importante é a imprevisibilidade do campo de batalha, onde equipamentos podem simplesmente desaparecer sem aviso prévio e a rede deve se adaptar para manter o seu funcionamento. Este tópico específico será atendido por meio da busca pelo aumento da resiliência que é por si só um grande tópico de pesquisa em redes de computadores, conforme [3], [4], [5]e[6].

Considerando resiliência como a habilidade de uma entidade de tolerar, resistir e automaticamente se recuperar de desafios nas condições da rede, ataques coordenados e anomalias no tráfego [7], é possível verificar que a definição é

bastante genérica, o que possibilita o estudo e aplicação através de diversas técnicas.

Os oponentes das operações militares estarão sempre buscando interromper as comunicações para interromper a cadeia de comando. Com isso a rede deve ser resiliente e capaz de se adaptar aos diversos tipos de desafios e formas de interrupção e manter o seu funcionamento.

Em [8] é apresentada uma proposta de rede sem fio *multihop* composta dos próprios equipamentos dos usuários que se conectam à rede e ao mesmo tempo aumentam a cobertura. Foram apresentados bons resultados para *streaming* de vídeo e voz para até sete saltos na topologia. A proposta é eficiente economicamente e funciona de forma transparente para os usuários. Os testes foram realizados após um terremoto no Japão. Este trabalho colabora com a ideia de criar uma rede de forma rápida em situações específicas, como a recuperação de desastres.

A proposta do uso de rádios cognitivos em veículos em situações de recuperação de desastres é apresentada em[9]. O uso do rádio cognitivo se justifica pela indisponibilidade da infraestrutura existente e a necessidade de consumo de banda. O uso de veículos também foi escolhido devido a todas as agências envolvidas fazerem o uso de veículos para o atendimento das vítimas.

Em [10] é apresentada uma metodologia independente de protocolo que busca a redução do consumo de energia em redes MANET (*Mobile Ad-Hoc Networks*) utilizadas em desastres e operações de resgate.

2.2 Redução do consumo de energia em redes Ad-Hoc

As redes *Ad-Hoc* são muito adequadas para o ambiente de C2 e a possibilidade de interligação entre qualquer nó traz a flexibilidade necessária para atuar em ambiente hostil e sem infraestrutura considerada. A vantagem de poder utilizar praticamente qualquer combinação de interligação entre os nós também traz a desvantagem da dificuldade de determinar a ligação que minimiza o consumo de energia. Para o presente artigo, será considerado que os nós formam uma rede *wireless Ad-Hoc* e, por isso, faz-se necessário uma maior investigação sobre esse tipo de rede.

Redes *wireless Ad-Hoc* são compostas por diversos dispositivos transmissores de comunicação por rádio que formam uma rede sem qualquer infraestrutura especial [11]. Existem cenários importantes onde a infraestrutura para a construção de uma rede de dados com cabos metálicos ou fibra óptica não é viável, seja pela situação geográfica não favorável pelo tempo necessário para implementação ou pelo alto investimento necessário. Para esses cenários descritos, a utilização de uma rede *wireless Ad-Hoc* é adequada.

As redes *wireless Ad-Hoc* podem ser utilizadas em situações de desastres naturais, batalhas ou outros cenários com limitações de infraestrutura de comunicação de dados e infraestrutura elétrica [8]. Em tais situações, diversos dispositivos wireless podem formar uma rede temporária sem a necessidade de qualquer infraestrutura estabelecida e administração centralizada, obrigando os nós a cooperar entre si a fim de viabilizar a comunicação entre nós distantes. Esta topologia é conhecida também como rede *wireless Ad-Hoc multihop* [12].

O consumo de energia dos nós é um fator crítico para as redes *wireless Ad-Hoc*. Os dispositivos que fazem parte de uma rede *Ad-Hoc* geralmente são alimentados por baterias que possuem capacidade limitada. Em muitos cenários

é difícil a substituição ou a recarga da bateria. Dessa forma, a redução do consumo de energia dos nós é geralmente a melhor maneira para estender o tempo de vida da rede. A desativação de um nó por falta de energia pode prejudicar o funcionamento da rede.

Até este ponto, este artigo se refere à redução do uso de energia. Entretanto, como potência é energia por unidade de tempo, reduzir o uso de energia ou reduzir a potência necessária são duas formas de abordar o mesmo problema. Em alguns trabalhos apresentados neste artigo, o objetivo é redução da potência e não será feita a substituição por uso de energia para seguir a metodologia utilizada.

2.2.1 MPSC - Min-Power Symmetric Connectivity

Para a caracterização do MPSC (*Min-Power Symmetric Connectivity*), será necessária uma definição de atribuição de potência aos nós da rede, considerando que é preciso minimizar a potência total da rede, que é o somatório das potências atribuídas a cada nó e manter algumas propriedades da rede como a conectividade. Este problema é conhecido como *Min-Power Symmetric Connectivity*, é abordado em [13], [14] e [15] e atende ao objetivo de minimizar o consumo de energia.

Diversas soluções têm sido propostas na literatura para lidar com a questão citada acima. Neste trabalho, serão apresentadas algumas soluções envolvendo a questão da conservação de energia.

Uma rede *Ad-Hoc multi-hop* é um conjunto finito de estações localizadas em uma área geográfica que são capazes de se comunicar, transmitindo e recebendo sinais de rádio. Portanto para cada estação t , é atribuída uma potência de transmissão denotada por $p(t)$ que fornece o alcance da transmissão denotado por $r(t)$.

A potência de transmissão de um nó está relacionada ao consumo de energia, ou seja, quanto maior a potência de transmissão, maior será o alcance da rede e também o consumo de energia do nó. Cada nó pode ajustar sua potência de transmissão entre zero e uma potência de transmissão máxima denotada por $p'(t)$. O modelo mais comum de atenuação para a potência do sinal é a queda do sinal conforme $1/r^k$ onde r é a distância até a antena do transmissor e k é uma constante real dependente do ambiente *wireless*, tipicamente entre 2 e 4, de acordo com [16].

Diferente das redes com cabo metálico ou fibra óptica, onde uma transmissão de um nó i geralmente pode alcançar somente o nó m , em redes *wireless* com antenas omnidirecionais é possível chegar a vários nós com uma única transmissão. Esta propriedade é uma das vantagens da rede *wireless*, ou seja, a facilidade de comunicação *Multicast* e *Broadcast*.

Adotando o modelo acima de atenuação do sinal e adotando a convenção usual detalhada em [15] em que cada nó possui a mesma eficiência de transmissão e o mesmo limite de sensibilidade de detecção, a potência proporcional necessária para estabelecer uma ligação do nó i para o nó j , separados por uma distância d_{ij} , é então dada pela Equação 1.

$$P_{ij} = (dij)^k \quad (1)$$

A Figura 1 mostra a comunicação entre os nós i e m , porém, como os nós j e k estão a uma distância menor que o nó m , estes também receberão o sinal originário em i , ou seja, eles estão dentro do alcance da transmissão do nó i para o nó m .

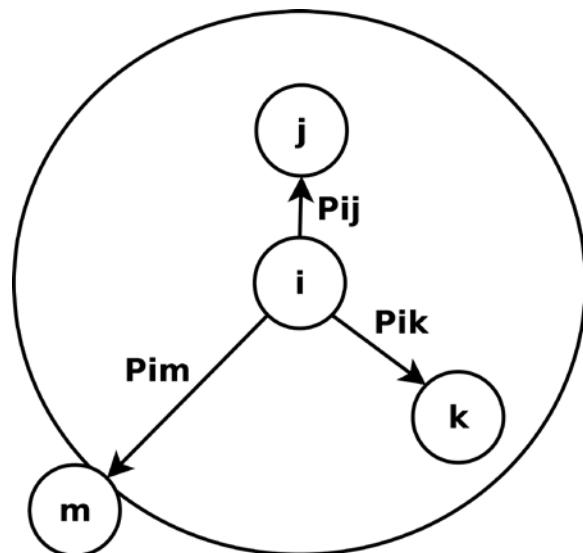


Fig. 1 – Modelo de Comunicação

Analizando a Figura 1, se o alcance de transmissão do nó k for suficientemente grande para alcançar o nó i , então teremos uma comunicação bidirecional entre os nós i e k . Neste trabalho iremos considerar apenas enlaces bidirecionais, e o custo $p(i, k)$ representa os requisitos de potência para ambos os nós i e k estabelecerem um enlace bidirecional entre i e k . Com este pressuposto, os requisitos de potência para estabelecer um enlace bidirecional entre dois nós u e v separados por uma distância r está representada pela Equação 2:

$$p(u,v) = p(v,u) = r^k \quad (2)$$

A rede *wireless Ad-Hoc* pode ser representada por um grafo $G(V, E, c)$, onde V é o conjunto dos nós da rede; E é o conjunto de enlaces; e c é o custo ou requisito de potência para o enlace bidirecional entre dois nós (custo).

Formalmente, seja V o conjunto de nós da rede. Uma atribuição de alcance da transmissão é uma função $r: V \rightarrow R^+$. Um enlace bidirecional entre u e v em V é estabelecido sobre a atribuição do alcance da transmissão se $r(u) \geq p(u, v)$ e $r(v) \geq p(v, u)$. Seja $B(r)$ o conjunto de todos os enlaces bidirecionais estabelecidos entre pares de nós de V sob a designação do alcance r .

A definição do Problema de acordo com [15] é dada por: Dado um conjunto de nós V e requisitos de potência simétricos $p(u, v) = p(v, u)$, u e $v \in V$; encontrar uma atribuição de alcance de transmissão $r: V \rightarrow R^+$ minimizando $\sum_{(v \in V)} r(v)$ sujeito as restrições que o grafo $(V, B(r))$ seja conexo.

Considerando a rede *wireless Ad-Hoc* como um grafo, outra maneira de visualizar o problema é encontrar a árvore geradora do grafo com o mínimo de custo de potência. Seja $G = (V, E, c)$ um grafo com custo nos enlaces e seja uv um enlace bidirecional entre os nós u e v . O custo $c(uv)$ de um enlace com u e v em V corresponde ao requisito de potência $p(u,v) = p(v,u)$. Para o nó $u \in V$ e a *Spanning Tree* T de G , seja uu_t o enlace de máximo custo incidente para u em T , ou seja, $uu_t \in T$ e $c(uu_t) \geq c(uv)$ para todos os $uv \in T$. O custo da potência da *Spanning Tree* T é dado pela Equação 3.x

$$p(T) = \sum_{u \in V} uu_t \quad (3)$$

Essa nova visualização do problema é possível, pois cada grafo conexo contém uma árvore geradora, então dado um grafo, é necessário encontrar a árvore geradora com o míni-

mo de custo de potência.

A definição do problema de acordo com o conceito de *Minimum Power-Cost Spanning Tree* apresentado acima é dado por: Seja $G = (V, E, c)$ um grafo com custo nos enlaces, encontrar a *Spanning Tree* T de G com mínimo custo de potência.

Onde:

- X_{uv} para todo $uv \in E$, X_{uv} é definido como 1 se uv pertencer ao *Spanning Tree* T e é definido como 0 no caso contrário. Estas variáveis são definidas como variáveis da árvore.
- $Y_{uv'}$ para todo $uv' \in E' := uv' | uv \in E$, $Y_{uv'}$ é definido como 1 se $v = ut$, ou seja, se $uv \in T$ e $c(uv) \geq c(uw)$ para todo $uw \in T$. Estas variáveis são definidas como variáveis de alcance.

Note que existem $|E|$ variáveis da árvore e $2|E|$ variáveis de alcance. Definimos ST como o conjunto de todos os vetores incidentes de todas as *Spanning Trees* de G (visualize como subconjunto de E).

Formulação de uma ILP - Integer Linear Program
Min

$$\sum_{uv \in E} c(uv) \cdot y_{uv} \quad (4)$$

Sujeito a

$$\sum_{v \in V / uv \in E'} y_{uv} = 1 \quad \forall u \in V \quad (5)$$

$$x_{uv} \leq \sum_{uv' \in E' / c(uw) \geq c(uv)} y_{uw'} \quad \forall uv' \in E' \quad (6)$$

$$x \in \text{conv}(ST)$$

A restrição na Equação 5 reforça que deve ser selecionada exatamente uma variável de alcance para cada nó $v \in V$, ou seja, define corretamente o alcance de cada nó. A restrição na Equação 6 reforça que um enlace uv está incluído na árvore somente se o alcance de cada ponto da extremidade é, pelo menos, o custo do enlace. A restrição na Equação 7 reforça que, de fato, as variáveis da árvore formem uma árvore geradora. As restrições nas Equações 8 e 9 são restrições de domínio das variáveis. Existem diversas descrições lineares para $x \in \text{conv}(ST)$. Será utilizada a formulação em [15]:

$x \in \text{conv}(ST)$ se e somente se para todo $S \subseteq E$, onde $Y(S)$ é o conjunto de enlaces E com ambas as extremidades em S .

O problema descrito através das duas definições detalhadas nesta subseção e apresentadas em [15], é conhecido como problema do MPSC - *Minimum Power Symmetric Connectivity*. Diversos trabalhos foram apresentados para a resolução do MPSC, como, por exemplo, [13] e [14].

Em [17] são apresentadas duas outras formulações de Programação Linear Inteira Mista para o problema do MPSC. Antes de apresentar essas duas novas formulações, serão apresentados alguns conceitos utilizados.

O grafo $G' = (V; A; p)$ é um grafo completo, direcionado e ponderado que foi derivado do grafo G ($V; E; p$) pela definição $A = \{(i,j), (j,i) | i, j \in V\}$, ou seja, para cada aresta em E, há dois respectivos arcos em A e um arco simulado (i,i) com

$p(i,i)=0$ inserido em cada $i \in V$. A Figura 2 mostra um exemplo, sem considerar a proporção entre a distância entre os nós e a potência da transmissão de um grafo direcionado que foi derivado de um não direcionado.

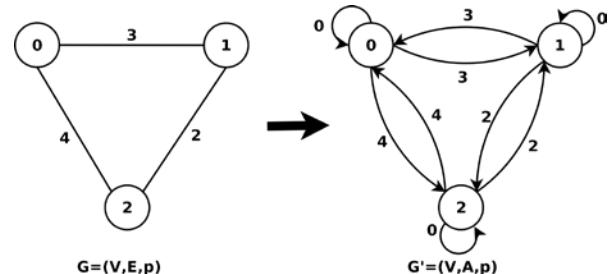


Fig. 2 – Um grafo direcionado G' derivado de um grafo não direcionado G

Definição: Seja $(i, j) \in A$, é definido ancestral de (i, j) conforme a Equação 10.

$$a_j^i = \begin{cases} i, & \text{se } p_{ij} = \min_{k \in V} p_{ik} \\ \arg \max_{\{k \in V\}} p_{ik} | p_{ik} < p_{ij}, \text{ nos casos contrários} \end{cases} \quad (10)$$

De acordo com essa definição, (i, a_j^i) é um arco originado no nó i com o maior custo tal que $p_i a_j^i < p_{ij}$. No caso do ancestral não existir para o arco (i, j) , o vértice i é retomado, ou seja, um arco simulado (i, i) .

A Figura 3 ilustra o conceito de nó ancestral, o arco (i, k) é o ancestral do arco (k, m) ; o arco (i, j) é o ancestral do arco (i, k) e o arco simulado (i, i) é retomado com ancestral de (i, j) .

Quanto aos custos para as formulações matemáticas, c_{ij} é a potência necessária para acessar j de i , enquanto c_{ik} é a potência adicional necessária para alcançar k quando j já foi alcançado a partir de i . Analogamente, c_{km} é a potência adicional necessária para o nó i alcançar o nó m ao mesmo tempo que k já foi alcançado.

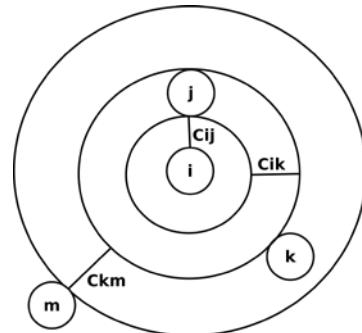


Fig. 3 – Custos para as formulações matemáticas

As duas formulações que serão descritas a seguir são baseadas em um mecanismo incremental sobre as variáveis que representam as potências de transmissão. Os custos associados a estas variáveis são calculados de acordo com a Equação 11.

$$c_{ij} = p_{ij} - p_i a_j^i \quad \text{para qualquer } (i, j) \in A \quad (11)$$

O valor c_{ij} é igual ao requisito de potência para estabelecer uma transmissão do nó i para o nó j (p_{ij}), menos o requisito da potência do nó i para alcançar o nó a_j^i ($p_i a_j^i$).

A primeira formulação proposta em [17] utiliza o conceito de fluxo de rede onde um nó é eleito como origem do

fluxo, e uma unidade de fluxo é enviada a partir de s para todos os outros nós. A variável do nó s responsável pelo *broadcast* é a raiz do *Spanning Tree*, e uma unidade do fluxo é enviada para todos os nós. A variável x_{ij} (com $i \neq j$) representa o fluxo do arco (i,j) . A variável y_{ij} (com $i \neq j$) é definida como 1 quando o nó i tem uma potência de transmissão que permite alcançar j, $y_{ij}=0$ em casos contrários.

Formulação de uma MILP - *Mixed Integer Linear Program*.

Min

$$\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot y_{ij} \quad (12)$$

Sujeito a

$$y_{ij} \leq y_i a_j^i \text{ para qualquer } (i,j) \in A, a_j^i \neq i \quad (13)$$

$$x_{ij} \leq (|V|-1) y_{ij} \text{ para qualquer } (i,j) \in A \quad (14)$$

$$x_{ij} \leq (|V|-1) y_{ji} \text{ para qualquer } (i,j) \in A \quad (15)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{(k,i) \in A} x_{kj} = \begin{cases} |V| - 1, \text{ se } i = s \\ -1 \text{ demais casos} \end{cases} \quad (16)$$

$$x_{ij} \in \mathbb{R} \text{ para qualquer } (i,j) \in A \quad (17)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \text{ para qualquer } (i,j) \in A \quad (18)$$

A restrição 13 realiza um mecanismo incremental, forçando as variáveis associadas com o arco (i, a_j^i) a assumir em 1 quando a variável associada com o arco (i, j) possui o valor 1, ou seja, os arcos originados no mesmo nó são ativados em ordem crescente de potência. As restrições 14 e 15 conectam as variáveis de fluxo x nas variáveis y. A equação 16 define o problema do fluxo, enquanto as equações 17 e 18 são restrições de domínio.

A segunda formulação proposta em [17], é definida uma variável z_{ij} para a *Spanning Tree*. A variável z_{ij} é igual a 1 se o enlace (i,j) pertencer a *Spanning Tree*, $z_{ij}=0$ caso contrário. A variável y_{ij} (com $i \neq j$) é igual a 1 quando a potência de transmissão do nó i consegue alcançar j, e $y_{ij}=0$, caso contrário.

Formulação de uma MILP - *Mixed Integer Linear Program*

Min

$$\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot y_{ij} \quad (19)$$

Sujeito a

$$y_{ij} \leq y_i a_j^i \text{ para qualquer } (i,j) \in A, a_j^i \neq i \quad (20)$$

$$z_{ij} \leq y_{ij} \text{ para qualquer } (i,j) \in E \quad (21)$$

$$z_{ij} \leq y_{ji} \text{ para qualquer } (i,j) \in E \quad (22)$$

$$\sum_{\substack{(i,j) \in E, i \in S, j \in V/S}} z_{ij} \geq 1 \text{ qualquer SCV} \quad (23)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \text{ qualquer } (i,j) \in E \quad (24)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \text{ qualquer } (i,j) \in A \quad (25)$$

A restrição 20 realiza um mecanismo incremental, forçando as variáveis associadas com o arco (i, a_j^i) a assumir o valor 1 quando a variável associada com o arco (i,j) possui o valor 1, ou seja, os arcos originados no mesmo nó são ativados em ordem crescente de potência. As restrições 21 e 22 conectam as variáveis *Spanning Tree* z nas variáveis y. A equação 23 afirma que todos os vértices têm que ser mutuamente conectados no subgrafo induzido pelas variáveis z, enquanto as equações 24 e 25 são restrições de definição do domínio.

Em [15], é apresentado um algoritmo eficiente que reduz o consumo de potência comparado com o algoritmo MST.

O cálculo para obter uma *minimum spanning tree* possui duas implementações muito conhecidas: o algoritmo de *Prim* [18] e o algoritmo de *Kruskal* [19]. Os dois algoritmos são guloso e bastante utilizados.

O algoritmo começa calculando o MST do grafo conexo. Procura um enlace, geralmente com o custo máximo ou que permita um ganho máximo; retira o enlace e reconecta o grafo com o aumento mínimo de custo de potência; repete o procedimento. Este algoritmo é baseado na noção da decomposição *k-restricted* de uma árvore T. Neste trabalho, também é defendido um ganho de potência em alguma bifurcação da Árvore Geradora Mínima; existe então a definição de conjunto *Fork* (F), que são pares de enlaces que compartilham um nó comum, e a diminuição do custo da potência da Árvore Geradora é obtido com a adição de enlaces “k” F e a retirada de enlaces da MST.

A complexidade do problema MPSC é NP-difícil, conforme apresentado em [20]. Uma noção do esforço envolvido nesse problema está na Fórmula de Cayley [21]: para um valor n inteiro positivo, o número de árvores que contenha os n vértices é $n^{(n-2)}$. Para uma topologia com 10 nós ($n = 10$), existem $10^8 = 100.000.000$ topologias possíveis. Se um computador levar 0,1 segundo para calcular cada possibilidade, encontrar a topologia com o menor consumo de potência levaria quase 4 meses. Essa complexidade levou ao estudo de diversas heurísticas, e muitas delas relacionadas com problemas de otimização.

2.2.2 MPSU - Min-Power Symmetric Unicast

Em [15], é apresentada uma solução para uma variação do MPSC, chamada de MPSU - *Min-Power Symmetric Unicast*. Esta metodologia é considerada a solução ótima e em tempo polinomial para escolha do caminho de menor potência em redes *Ad-Hoc*.

Este problema consiste em escolher o melhor caminho para chegar a um nó de destino, partindo de um nó específico. Esta abordagem pode ser resolvida através de programação dinâmica determinística, conforme apresentado em [22].

O método para o cálculo do MPSU consiste na construção de um grafo auxiliar direcionado e a utilização do algoritmo de *Dijkstra* [23], através de uma abordagem de programação

dinâmica, conforme o proposto em [24].

Na Figura 4 é possível verificar que o caminho mais curto que seria obtido pelo algoritmo de *Dijkstra*. Pode não ser aquele que minimiza a potência total da rede. As ligações possíveis entre os nós s e t apresentam duas opções: a primeira seriam as ligações s, t e a segunda as ligações s, v e v, t. Na primeira, a potência total da topologia seria de 50 unidades de potência (Nó s consumindo 25 unidades e o nó t consumindo 25 unidades), enquanto que na segunda seria de 41 unidades de potência (Nó s consumindo 9 unidades, nó v consumindo 16 unidades e o nó t consumindo 16 unidades).

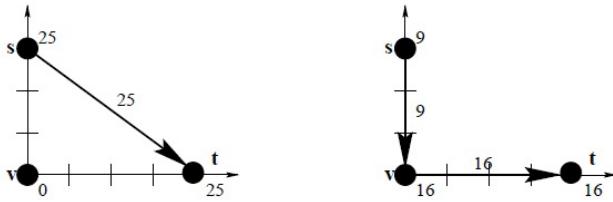


Fig. 4 – Possibilidades de ligação entre os nós s e t

A definição do problema MPSU é: seja $G(V, E, c)$ um grafo e uv o enlace que liga os nós u e v . O custo $c(uv)$ de um enlace, onde $uv \in E$, correspondente a potência de forma simétrica, ou seja $p(u,v) = p(v,u)$.

O custo de potência de um caminho $s-t$ é $P(s = v_0, v_1, \dots, v_k=t)$ é

$$p(P) = \sum_{i=0}^{k-1} \min(c(v_i, v_{i+1})) \quad (26)$$

Sujeito à restrição de obter um caminho contínuo entre s e t .

A solução proposta em [15] consiste na criação de um grafo auxiliar $G' = (V', E', c')$ e então utilizar o algoritmo de *Dijkstra* em G' . A construção do grafo G' está descrita a seguir.

A construção do grafo se inicia com a colocação de todos os vértices de V em V' . Para cada enlace (u, v) de G dois vértices são adicionados em G' , $[u, v]$ e $[v, u]$, os dois ligados com custo $c(u, v)$. Cada vértice v de G também é preservado em G' . Para cada v , os vértices adjacentes são distribuídos, por exemplo $\{u_1, u_2, \dots, u_k\}$, tal que $c(v, u_i) \leq c(v, u_{i+1})$, para todo $1 \leq i \leq k-1$. Adicionalmente todos os vértices $[v, u_i]$ são conectados por dois caminhos diferentes, $P1 = (v, [v, u_1], \dots, [v, u_{k-1}], [v, u_k])$ e $P2 = ([v, u_k], [v, u_{k-1}], \dots, [v, u_1], u)$, conforme a Figura 5. O custo dos arcos no caminho $P1$ é colocado como $c(v, u_1), c(v, u_2) - c(v, u_1), \dots, c(v, u_k) - c(v, u_{k-1})$, respectivamente, enquanto os custos para todos os arcos em $P2$ são colocados como zero. A Figura 6 mostra o grafo G' para o exemplo da Figura 4.

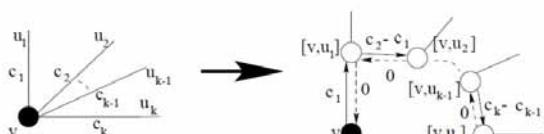


Fig. 5 – Construção do grafo G'

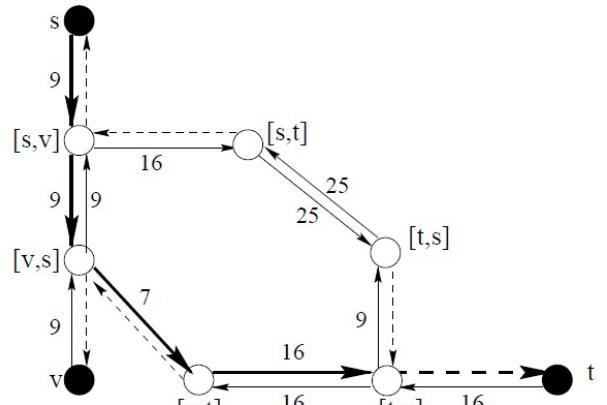


Fig. 6 – Exemplo do grafo G' para a Figura 4

Para cada caminho $s - t$ de P em G existe um caminho correspondente $s - t$ de P' em G' com o mesmo custo. De fato, considerando um caminho $P = (s = w_1, w_2, \dots, w_l = t)$ em G , por construção, existe um caminho P' em G' percorrendo, em ordem, os vértices $w_1, [w_1, w_2], [w_2, w_1], \dots, [w_{l-1}, w_l], [w_l, w_{l-1}], w_l$, tal que:

- O custo do enlace conectando w_1 a $[w_1, w_2]$ em P' é $c(w_1, w_2)$;
- O custo do enlace conectando $[w_{i-1}, w_i]$ a $[w_i, w_{i-1}]$ em P' mais o custo do sub caminho conectando $[w_i, w_{i-1}]$ a $[w_i, w_{i+1}]$ em P' é igual ao $\min\{c(w_{i-1}, w_i), c(w_i, w_{i+1})\}$ para todo $2 \leq i < l$;
- O custo do enlace conectando $[w_{l-1}, w_l]$ to $[w_l, w_{l-1}]$ é $c(w_{l-1}, w_l)$;
- O custo do sub caminho conectando $[w_l, w_{l-1}]$ a w_l é 0.
- Portanto, o custo de P' é igual ao custo de P .

2.3 Redes de Sensores

Redes de sensores representam uma grande área de pesquisa e também possuem características de interesse para redes de C2, como, por exemplo, a cooperação necessária entre todos os nós para manter a rede funcionando. Nesta subseção serão apresentadas algumas dessas características em comum.

O tópico Wireless Sensor Networks (WSNs) é apresentado em [25] e consiste em um grupo de sensores pequenos, de baixo custo e baixo consumo de energia que coletam dados do ambiente com o objetivo de proporcionar o seu processamento através de uma rede sem fio. Esse tipo de rede de sensores é largamente utilizado em ambientes militares, atendimento de saúde e outras aplicações.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos ao longo dos anos e os tópicos de pesquisa ainda em aberto são: eficiência energética, limitações de recursos como consumo de energia por exemplo, Robustez, Segurança e Tolerância a Falhas.

Em [26] são apresentadas diversas abordagens para endereçar os problemas de redes de sensores divididos por áreas de abordagem: protocolos de roteamento, algoritmos genéticos, teoria dos jogos, swarm intelligence e segurança.

Após uma extensa revisão, os seguintes itens ainda permanecem em aberto:

- Em clusterização utilizando teoria dos jogos, há uma suposição de que há apenas uma cabeça de cluster em cada região, e esta suposição não é razoável, e também limita a

- aplicabilidade de metodologia;
- Existem muitas pesquisas com foco em eficiência energética, porém não consideram uma otimização através das camadas de rede, como por exemplo estratégias de roteamento aliadas a estratégias de filas;
- Os algoritmos com foco em eficiência energética não consideram ambientes heterogêneos que tem um grande efeito em energia e tempo de vida da rede e também não consideram a mobilidade dos nós;
- Muitas pesquisas foram realizadas em ambientes estáticos, porém ambientes dinâmicos são uma realidade e precisam ser atendidos.

Em [27], duas técnicas de otimização baseadas no diagrama de Voronoi são utilizadas para obter uma redução no consumo de energia: reduzir o raio de alcance dos sensores e colocar em sleep mode sensores sem uso no momento.

Ambientes hostis para aplicação de redes de sensores são considerados em [28], onde é apresentada a alocação aleatória dos sensores como a única abordagem viável em um primeiro momento. Posteriormente a movimentação dos sensores é feita considerando maximizar a cobertura, minimizando o custo para movimentar os nós. São utilizados os algoritmos Artificial Immune System (AIS), Normalized Genetic Algorithm (NGA) e Particle Swarm Optimization (PSO). Os resultados obtidos variaram de acordo com o tempo de cálculo e menor número de sensores necessários.

A questão do tempo necessário para otimizar uma rede de sensores é abordada em [29], onde os resultados apresentados são melhores do que outros métodos de uso geral.

O objetivo de [30] e [31] é posicionar os sensores de forma a atender uma área a ser coberta completamente com o menor número possível de sensores, de acordo com os obstáculos presentes. Não é considerada a diferença de demanda ao longo da área e sua área de cobertura é fixa. Para alcançar esse objetivo, as características geométricas da área de cobertura são levadas em consideração e é proposto um algoritmo para garantir a cobertura ótima.

Garantir o funcionamento e a minimização do consumo de energia em redes de sensores são tópicos beneficiados pelo green communication. Este tópico é importante e promissor, conforme abordado em [32] e [33]. Mesmo se tratando de redes de sensores com suas características próprias, esta área tem objetivos de economia de energia em comum com redes de C2.

Uma outra abordagem para redução do consumo de energia é apresentada em [34], onde é considerada a economia do consumo de energia através do atendimento temporal das demandas pelos sensores envolvidos, de tal forma a reduzir o consumo de energia em áreas sem demanda em um determinado momento. Em redes de C2, áreas sem demanda não precisam ser cobertas, obtendo o mesmo tipo de economia proposta em [34]. Caso uma nova demanda passe a existir, os nós podem se ajustar de forma a suportar esta demanda.

O tópico Wireless Sensor and Actor Network (WSAN) é apresentado em [35] e possui grande importância na área de Internet of Things (IoT). WSAN são redes formadas por equipamentos que possuem sensores de interesse em um ambiente, como uma residência, por exemplo. Esses equipamentos também têm funções ativas no ambiente e, por isso, são chamados de atores. Os equipamentos se comunicam entre si para garantir que um determinado comando seja encaminhado pela rede. Um exemplo desse ambiente é um sensor de presença que, ao detectar uma movimentação em

uma determinada área de uma casa, faz com que uma lâmpada seja acesa.

2.4 Trabalhos Sobre Minimização do Consumo de Energia

Nesta subseção serão apresentados alguns trabalhos com foco em minimização do consumo de energia em redes.

Em [36] é apresentado um novo modelo de roteamento que leva em consideração métricas baseadas no consumo de bateria dos nós. As métricas são: minimizar a energia consumida por pacote; minimizar o tempo de partição da rede; minimizar a variância em níveis de potência nos nós; minimizar o custo por pacote e minimizar o máximo custo de nó. Algumas dessas métricas são de difícil implementação, porém os resultados obtidos foram satisfatórios e as métricas propostas podem ser incorporadas em protocolos de roteamento para redes Ad-Hoc.

Uma revisão dos protocolos de roteamento utilizados em redes Ad-Hoc é apresentada em [37], os protocolos são divididos em protocolos orientados por tabelas e protocolos sob demanda. São descritos os protocolos que se enquadram nas opções e, ao final do texto, é feita uma breve comparação, ressaltando as suas capacidades, diferenças e características.

Um estudo do consumo de energia em vários cenários específicos de uma interface de rede, com relação aos seus estados de funcionamento são apresentados em [38]. Os valores foram coletados de forma experimental e comparados com os valores teóricos previstos. Todas as comparações ficaram dentro do esperado. Uma das conclusões apresentadas é que o consumo de energia não é sinônimo de consumo de banda e a pesquisa por protocolos de roteamento que leve em consideração broadcast, unicast e tamanhos de pacotes deve ser desenvolvidas. Outra conclusão importante é o consumo de energia quando um nó não está transmitindo nem recebendo. Para esse caso, não adicionar o nó no roteamento pode gerar uma redução no consumo de energia em redes Ad-Hoc.

Uma abordagem um pouco diferente das apresentadas até o momento é feita em [39]. Neste trabalho os nós contribuem de forma autônoma para a formação da topologia, através do aumento gradual da sua potência de transmissão, até encontrar com um vizinho. Esta abordagem também reduz o consumo total de potência da rede e evita a existência de nós com baixo grau.

Em [40] é proposto um algoritmo de roteamento que leva em consideração a minimização no consumo de energia pela rede e também o nível de bateria restante nos nós para escolher as melhores rotas. Com esta abordagem em topologias com 15 nós, a longevidade das topologias foi expandida em até 40%.

Em [41] é proposto um algoritmo para minimização de potência para redes Ad-Hoc de uso Militar. Esse algoritmo consiste em utilizar o cálculo exato da topologia de menor consumo de energia, de forma distribuída, através de clusters de nós da rede e combinar esses clusters para obter uma topologia com menor consumo de energia.

Foram utilizadas topologias aleatórias para representar redes reais de C2. O método proposto apresentou resultados importantes de diminuição do consumo de energia que podem ser utilizados para garantir o funcionamento mais eficiente para redes com as características apresentadas. O método proposto não tem um custo computacional elevado, apresentando um tempo de execução adequado para o cenário.

rio proposto e podendo ser expandido para redes com mais de 100 nós.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Redes de comando e controle são de grande importância no ambiente militar e possuem características bastante específicas. Algumas dessas características não são consideradas em redes de aplicação civil, por isso existe a necessidade de estudos voltados especificamente para esse tipo de rede.

A questão do consumo de energia é muito importante em situações de batalhas pois garantir o funcionamento da rede em mais alguns minutos ou horas pode ser a diferença entre o sucesso ou fracasso de uma operação.

Neste artigo foram apresentados diversos trabalhos que se aplicam diretamente a redes de comando e controle e também, artigos voltados para redes de aplicações civis que possuem características de interesse na minimização do consumo de energia em redes de comando e controle.

As pesquisas aqui apresentadas podem servir como ponto de partida para novos estudos voltados para o consumo de energia em redes de comando e controle.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Militar de Engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALBERTS, D. S. e HAYES, R. E. Understanding command and control. Technical report, DTIC Document, 2006.
- [2] HOLLIDAY, P. Swarmm-a mobility modelling tool for tactical military networks. Em Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE, pags. 1-7. IEEE, 2008.
- [3] STERBENZ, J. P., HUTCHISON, D., CETINKAYA, E. K., JABBAR, A., ROHRER, J. P., SCHOLLER, M. e SMITH, P. Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Computer Networks*, 54(8):1245-1265, 2010.
- [4] MARINO JR., D. A. e SALLES, R. M. Medindo a robustez de uma rede com o fator de resiliência. Em Proceedings of the IADIS International Conference WWW/Internet 2009, Madrid, Espanha, outubro 2009.
- [5] VASCONCELOS, M. F. e SALLES, R. M. Resilience in computer network management. *NETWORKING 2012*, pags. 109-120, 2012b.
- [6] VASCONCELOS, M. F. e SALLES, R. M. Emprego de resili^encia na gerênciade redes de computadores. XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 1:100-114, 2012a.
- [7] AGGELOU, G. Wireless Mesh Networking. McGraw-Hill Professional, 2008. ISBN 0071482563.
- [8] MINH, Q. T., NGUYEN, K., BORCEA, C. e YAMADA, S. On-the- y establishment of multihop wireless access networks for disaster recovery. *Communications Magazine, IEEE*, 52(10):60-66, 2014.
- [9] SUN, Y. e CHOWDHURY, K. R. Enabling emergency communication through a cognitive radio vehicular network. *Communications Magazine, IEEE*, 52(10): 68-75, 2014.
- [10] RAMREKHA, T. A., TALOOKI, V. N., RODRIGUEZ, J. e POLITIS, C. Energy efficient and scalable routing protocol for extreme emergency ad hoc communications. *Mobile Networks and Applications*, 17(2):312-324, 2012.
- [11] PERKINS, C. E. e ROYER, E. M. Ad-Hoc on-demand distance vector routing. Em Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WM- CSA'99. Second IEEE Workshop on, pags. 90-100. IEEE, 1999.
- [12] BROCH, J., MALTZ, D. A., JOHNSON, D. B., HU, Y.-C. e JETCHEVA, J. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. Em Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, pags. 85-97. ACM, 1998.
- [13] BLOUGH, D. M., LEONCINI, M., RESTA, G. e SANTI, P. On the symmetric range assignment problem in wireless ad hoc networks. Em Foundations of Information Technology in the Era of Network and Mobile Computing, pags. 71-82. Springer, 2002.
- [14] CALINESCU, G., MANDOIU, I. e ZELIKOVSKY, A. Symmetric connectivity with minimum power consumption in radio networks. Em Foundations of Information Technology in the Era of Network and Mobile Computing, pags. 119-130. Springer, 2002.
- [15] ALTHAUS, E., CALINESCU, G., MANDOIU, I. I., PRASAD, S., TCHERVENSKI, N. e ZELIKOVSKY, A. Power efficient range assignment for symmetric connectivity in static ad hoc wireless networks. *Wireless Networks*, 12(3):287-299, 2006.
- [16] RAPPAPORT, T. S. e OTHERS. Wireless communications: principles and practice, volume 2. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [17] MONTEMANNI, R. e GAMBARDELLA, L. M. Exact algorithms for the minimum power symmetric connectivity problem in wireless networks. *Computers & Operations Research*, 32(11):2891-2904, 2005.
- [18] PRIM, R. C. Shortest connection networks and some generalizations. *Bell system technical journal*, 36(6):1389-1401, 1957.
- [19] KRUSKAL, J. B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical society*, 7(1):48-50, 1956.
- [20] CLEMENTI, A. E., PENNA, P. e SILVESTRI, R. On the power assignment problem in radio networks. *Mobile Networks and Applications*, 9(2):125-140, 2004.
- [21] CAYLEY, A. A theorem on trees. *Quart. J. Math*, 23(376-378):69, 1889.
- [22] WINSTON, W. L. e GOLDBERG, J. B. Operations research: applications and algorithms, volume 3. Duxbury press Boston, 2004.
- [23] DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1):269-271, 1959.
- [24] SNIEDOVICH, M. Dijkstra's algorithm revisited: the dynamic programming connexion. *Control and cybernetics*, 35(3):599, 2006.
- [25] ISMAIL, W. W. e MANAF, S. A. Study on coverage in wireless sensor network using grid based strategy and particle swarm optimization. Em Circuits and Systems (APCCAS), 2010 IEEE Asia Pacific Conference on, pags. 1175-1178. IEEE, 2010.
- [26] BHAWNA, PATHAK, T. e RANGA, V. A comprehensive survey of clustering approaches in wireless sensor networks. Em Proceedings of the Second International Conference on Emerging Research in Computing, Information, Communication and Applications (ERCICA 2014), 2014.
- [27] TANG, M., YAN, F., DENG, S., SHEN, L., KUANG, S. e XING, S. Coverage optimization algorithms based on voronoi diagram in software-defined sensor networks. Em Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2016 8th International Conference on, pags. 1-5. IEEE, 2016.
- [28] SWEIDAN, H. I. e HAVENS, T. C. Coverage optimization in a terrain-aware wireless sensor network. Em Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on, pags. 3687-3694. IEEE, 2016.
- [29] AKBARZADEH, V., GAGNE, C. e PARIZEAU, M. Sensor control for temporal coverage optimization. Em Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on, pags. 4468-4475. IEEE, 2016.
- [30] WEI, M. e SHI, Y. Brain storm optimization algorithms for optimal coverage of wireless sensor networks. Em Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI), 2015 Conference on, pags. 120-127. IEEE, 2015.
- [31] ZHU, H. e SHI, Y. Brain storm optimization algorithm for full area coverage of wireless sensor networks. Em Advanced Computational Intelligence (ICACI), 2016 Eighth International Conference on, pags. 14-20. IEEE, 2016.
- [32] MA, X., SHENG, M. e ZHANG, Y. Green communications with network cooperation: a concurrent transmission approach. *IEEE Communications Letters*, 16 (12):1952-1955, 2012.
- [33] ZHENG, J., CAI, Y., SHEN, X., ZHENG, Z. e YANG, W. Green energy optimization in energy harvesting wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 53(11):150-157, 2015.
- [34] HAN, C., SUN, L., XIAO, F. e GUO, J. An energy efficiency node scheduling model for spatial-temporal coverage optimization in 3d directional sensor networks. *IEEE Access*, 4:4408-4419, 2016.
- [35] GUO, Y., ZHANG, Y., MI, Z., YANG, Y. e OBAIDAT, M. S. A distributed coverage optimization and connectivity maintenance

- strategy based on unknown sensors in wsan. Em Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS), 2016 International Conference on, pags. 1-5. IEEE, 2016.
- [36] SINGH, S., WOO, M. e RAGHAVENDRA, C. S. Power-aware routing in mobile ad hoc networks. Em Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, pags. 181-190. ACM, 1998.
- [37] ROYER, E. M. e TOH, C.-K. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. Personal Communications, IEEE, 6(2):46-55, 1999.
- [38] FEENEY, L. M. e NILSSON, M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. Em INFO-COM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, volume 3, pags. 1548-1557. IEEE, 2001.
- [39] WATTENHOFER, R., LI, L., BAHL, P. e WANG, Y.-M. Distributed topology control for power efficiencycient operation in multihop wireless ad hoc networks. Em INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, volume 3, pags. 1388-1397. IEEE, 2001.
- [40] BALAGANESH, M. e VELAN, A. Energy efficient routing in wireless ad hoc networks. Energy, 3(3), 2014.
- [41] VASCONCELOS, M. F. e SALLES, R. M. Minimização de potência para redes adhoc de uso militar. Em XXXIV Simposio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2016), Santarém, Brazil, 2016.

Análise de cenário envolvendo incêndio em material radioativo orientado à resposta à emergência

Rodrigo Werner da Silva, Wilson Freitas Rebello da Silva Junior, Edson Ramos de Andrade

Instituto Militar de Engenharia (IME)
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270,
Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

O presente trabalho fundamenta-se no estudo de cenário envolvendo incêndio em irradiadores de sangue, tendo como base o HEMORIO, devido ao fato de possuir tal equipamento e situar-se em área densamente povoada. Usando cenário hipotético, tentou-se aproximar ao máximo de uma situação realista usando curvas de incêndio padronizadas que forneceram dados de entrada para o software HotSpot Health Physics code para estimar as doses equivalentes efetivas totais (TEDE) para a população afetada pela dispersão do radionuclídeo na atmosfera. Os resultados foram tratados e inseridos para a análise de riscos de indução de leucemia tomando por base os relatórios sobre efeitos biológicos das radiações ionizantes (BEIR V e VII), que permitiu analisar as consequências de incêndio em irradiadores de sangue que façam uso de fontes de Cs-137 e auxiliar nas medidas de prevenção, mitigação, preparação e resposta, possibilitando a proteção das comunidades potencialmente em risco de desenvolvimento de câncer.

PALAVRAS-CHAVE: Incêndio em material radioativo, radiação ionizante, risco, leucemia.

ABSTRACT: This study was based on the evaluation of a scenario involving fire in blood irradiation equipment, taking as a basis HEMORIO, since it owns such equipment and is situated in a densely populated area. Although the scenario is hypothetical, there was an effort to approach to reality by considering standardized fire curves which provide input data to the HotSpot Software Health Physics to estimate the population's Total Effective Dose Equivalent (TEDE) due to atmospheric dispersion. The Results were also treated and inserted as input for risk evaluation of induction of leukemia by mathematical means based on reports of Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR V and VII) depending on the dose level. The study of the scenario allowed us to infer the consequences of a fire in blood irradiators that use Cs-137 sources assisting in the prevention, mitigation, preparedness and response, enabling the protection of potentially at-risk communities.

KEYWORDS: Fire in radioactive material, ionizing radiation, risk, leukemia.

1. INTRODUÇÃO

O uso difuso da energia nuclear na Saúde, por meio da Medicina proporciona uma tendência de concentração de equipamentos dotados de material radioativo em áreas urbanas densas onde se encontram vários hospitais e clínicas realizando procedimentos envolvendo tais materiais, que caso sejam expostos a situações críticas de segurança, como um incêndio, podem contribuir para considerável aumento dos índices de degradação ambiental, o que inclui a real possibilidade de exposição ao perigo não só de trabalhadores como também do público em geral. Um cenário desta natureza é crítico, intrincado e de difícil solução, podendo acarretar imensos prejuízos tanto sociais como econômicos (SANTOS, 2015) [1].

Desta forma, dispor de ferramentas metodológicas que permitam avaliar consequências resultantes das atividades humanas, de qualquer natureza, sobre os seres humanos e a biosfera pode ser um caminho para a garantia da segurança e da manutenção da vida. Este desafio emerge não só das consequências dos efeitos radioativos sobre seres humanos e o espaço físico, mas também da ignorância sobre este tipo de urgências. A escolha do cenário para os estudos propostos no presente trabalho foi feita tomando por base as pesquisas relativas ao material radioativo capaz de representar uma ameaça potencial em uma região densamente povoada no Estado do Rio de Janeiro.

De acordo com Suzane de Alencar Vieira (VIEIRA, 2015), o acidente com o Cs-137 em Goiânia no ano de 1987 foi considerado o maior acidente radiológico em área urbana do mundo, de modo a provocar o medo de novas ocorrências, tornar os efeitos danosos conhecidos e aprofundar os estudos relativos à prevenção, preparação, mitigação e resposta. O Cs-137 encontra-se, dentre outras aplicações, em irradiadores de sangue, com atividades consideradas de interesse para o presente estudo, cujas doses equivalentes efetivas totais

(TEDE) geradas por sua queima podem ser estimadas, bem como os principais efeitos sobre uma população afetada [2].

O HEMORIO, local escolhido para o estudo encontra-se situado na região central do município da Cidade do Rio de Janeiro e destaca-se como um centro de referência em Hemoterapia, que apresenta em seus protocolos as indicações de hemocomponentes irradiados para reduzir o risco de Doença do Enxerto Contra o Hospedeiro (DECH), cuja dose de irradiação é de 25 Gy e deve ser realizada em irradiadores de células próprias para este fim [3].

Embora os equipamentos sejam selados e medidas de segurança previstas legalmente em âmbito nacional e para os irradiadores de sangue, selados, o histórico de eventos adversos mostra que deve sempre haver a preocupação com a violação, intencional ou não, de uma fonte, e que as possibilidades devem ser aventadas, tais como um incêndio, consumindo este uma fonte já violada ou não.

A importância das ações de prevenção, além de preservação de vidas e bens, está relacionada aos elevados esforços e custos inerentes à recuperação dos cenários. O estudo de cenário envolvendo incêndio em local contendo material radioativo permite, por meio da identificação dos possíveis riscos primários e secundários da combustão, sugerir efetiva orientação aos procedimentos a serem adotados por diversas agências normalmente envolvidas nas ações de prevenção, mitigação, preparação e resposta, identificando-se as ameaças e vulnerabilidades imediatas com efeito sobre futuros comprometimentos e fragilidades.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O critério de escolha da fonte tem amparo no TE-CDOC-1344 da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2003), que trata da categorização de fontes radioati-

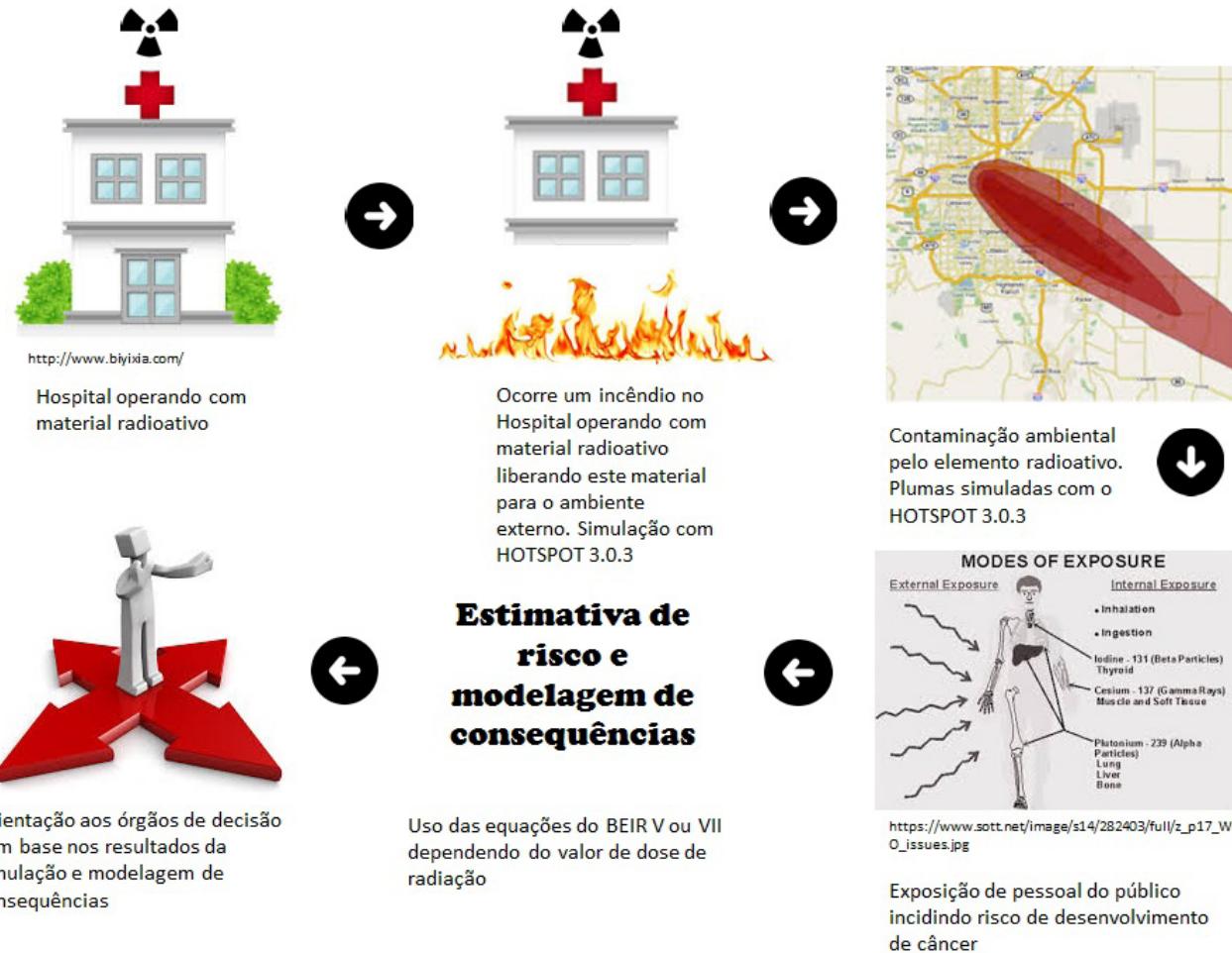


Fig 1: Resumo da metodologia utilizada.

vas e apresenta no seu apêndice II, as fontes em seus relativos usos, atividades e riscos atribuídos. Deste documento foi verificado que o Cs-137 é utilizado na irradiação de sangue, tem atividades entre 440 e 37 TBq, e classe de risco 1, em que se observa a relação $A/D \geq 1000$, onde A é a atividade da fonte e D o potencial de fontes para causar efeitos determinísticos, de modo que a esse equipamento se apresenta de maneira satisfatória para as expectativas do presente estudo [4].

Devido à falta de acesso ao interior da edificação e inabilidade de inventariar os materiais que poderiam queimar, caso o ambiente em que se encontra o irradiador fosse incendiado, a carga incêndio foi calculada por meio da Instrução Técnica de número 15 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (CB/PMESP, 2015) que define um cenário típico para o tipo de edificação e atividade tratada neste trabalho [5].

Na ausência de dados que pudessem conferir maior realidade ao trabalho, as curvas padronizadas foram consideradas como a função temperatura da atmosfera do ambiente compartimentado e assim, por meio das tabelas e gráficos de incêndio-padrão, de modelos idealizados para análises experimentais, admitindo-se que a temperatura dos gases quentes no compartimento em chamas obedeça às curvas padronizadas, viabilizando conhecer a evolução temporal do incêndio.

Os parâmetros relacionados às características locais da edificação e do local onde se encontra, da fonte e da queima do material foram inseridos no código HotSpot, que, como mencionado, apresenta um modelo conservativo para estimar a dose e a concentração de radionuclídeos como resultado da liberação de materiais radioativos (SHIN and

KIM 2009; THIESSEN et al, 2009) [6].

Com o objetivo de aproximar um cenário realístico em uma situação de incêndio, compatível com as curvas observadas em um incêndio-padrão para materiais celulósicos, predominante nos mobiliários e nas divisórias, foi adotado o tempo de 15 minutos, onde se observam em tais curvas, temperaturas superiores a 700°C e em que a taxa de calor começa a diminuir e então, com base nessas tabelas e gráficos, foram calculados os parâmetros relativos ao incêndio que alimentaram o código [7].

As tabelas extraídas das simulações do HotSpot permitem estabelecer cenários críticos, tanto em relação aos níveis de doses observados, quanto ao número de pessoas afetadas, viabilizando a análise de potenciais consequências e orientação à resposta à emergência, sendo possível, utilizando as equações BEIR V e/ou VII, avaliar as probabilidades do desenvolvimento de câncer na população afetada e permitindo que os órgãos de saúde pública estabeleçam medidas que venham a minimizar essas consequências que podem ter impactos catastróficos na economia local no futuro quando se considera tratamentos e indenizações solicitadas por via judicial [8].

Com isso, foram calculados os excessos de risco relativos (ERR) e as probabilidades de causa (PC) para toda a população afetada e para ambos os sexos, conforme as equações mencionadas para idades da exposição menores que vinte anos e tempos de exposição abaixo de quinze anos, entre quinze e vinte cinco anos, e acima de vinte e cinco anos, e para idades de exposição superiores a vinte anos, e tempos de exposição menores que vinte e cinco anos, entre vinte e cinco anos e trinta anos, e acima de trinta anos.

DADOS SIMULAÇÃO HOTSPOT																			
MATERIAL	MEIA VIDA	ATIVIDADE	TEMPO	TAXA DE CALOR	CALOR ESPECÍFICO	VOLUME	TEMPERATURA DO AR	VELOCIDADE	DENS. DEM. Z. NORTE (Hab/Km ²)										
Cs137	30 ANOS	4,4E+14Bq	15MIN	2,6E+7Cal/s	4062 Cal/g	2710 gal	23°C	0,5m/s	10.185										
COMPARATIVO DE ALTURA																			
ALTURA	m	DMD (Km)	Max Dete (Sv)	INTERNA			MÉDIA			EXTERNA									
				DMD (Km)	ÁREA (Km ²)	Habitantes	DMD (Km)	ÁREA (Km ²)	Habitantes	DMD (Km)	ÁREA (Km ²)	Habitantes							
10	0,01	674,00	0,56	0,058	590,73	0,71	0,09	916,65	5,10	2,30	23425,50								
20	0,07	8,80	0,9	0,12	1222,20	1,2	0,2	2037,00	6,80	4,20	42777,00								
30	0,15	2,50	1,1	0,16	1629,60	1,5	0,29	2953,65	9,50	7,50	76387,50								
40	0,23	1,20	1,2	0,18	1833,30	1,7	0,35	3564,75	12,00	11,00	112035,00								
50	0,30	0,65	1,3	0,18	1833,30	1,8	0,38	3870,30	15,00	15,00	152775,00								
60	0,37	0,38	1,3	0,17	1731,45	1,9	0,39	3972,15	17,00	18,00	183330,00								
70	0,47	0,25	1,3	0,14	1425,90	1,9	0,37	3768,45	18,00	21,00	213885,00								
80	0,57	0,17	1,2	0,096	977,76	1,9	0,33	3361,05	20,00	24,00	244440,00								
90	0,69	0,12	1,1	0,042	427,77	1,8	0,27	2749,95	21,00	26,00	264810,00								
100	0,81	0,09	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	.....	1,7	0,2	2037,00	23,00	28,00	285180,00							
120	1,00	0,06	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	.....	1,4	0,09	397,22	25,00	31,00	315735,00							
150	1,40	0,03	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	.....	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	.....	27,00	34,00	346290,00						
750	8,20	1,59E-03	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	.....	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	.....	21,00	12,00	122220,00						
1000	9,90	1,21E-03	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	.....	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	.....	17,00	5,30	53980,50						
LEGENDA	Sv	Ref.: Norma CNEN-NN-3.01.																	
INTERNA	0,10	Área de controle operacional cujo limite de dose em situações de emergência para executar ações de prevenção de situações catastróficas é atingido.																	
MÉDIA	0,05	Área de controle operacional cujo nível de ação para evacuação de população em situações de emergência é atingido.																	
EXTERNA	0,001	Área de controle operacional cujo limite anual para público em situação em operação normal é atingido.																	
DMD	DISTÂNCIA DA MÁXIMA DOSE - Distância em que se observa a maior dose.																		
MAX.DETE	MÁXIMA DOSE EQUIVALENTE TOTAL EFETIVA.																		
NÃO EXCEDIDO	Indica que os limites de dose definidos para as condições de contorno não foram atingidos.																		

Fig 2: Distribuição da dose em função da altura da dispersão atmosférica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A população afetada nas áreas de controle operacional definidas à partir da Norma CNEN 3.01. [9] apresentou a mesma característica para as três condições de contorno, porém com valores distintos, sendo os números máximos de habitantes afetados encontrados nas áreas relativas às alturas de dispersão atmosféricas de 50, 60 e 150m para as áreas interna, média e externa respectivamente, conforme Fig. 2.

A partir das informações da tabela, foi possível verificar as tendências de distribuição das doses de radiação em função das alturas de dispersão atmosférica, onde se pode observar que as máximas distâncias de dose tendem a aumentar com a altura, conforme gráficos da Fig. 3.

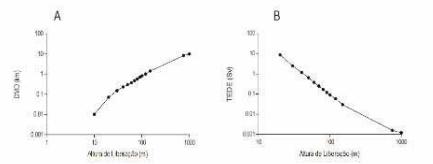
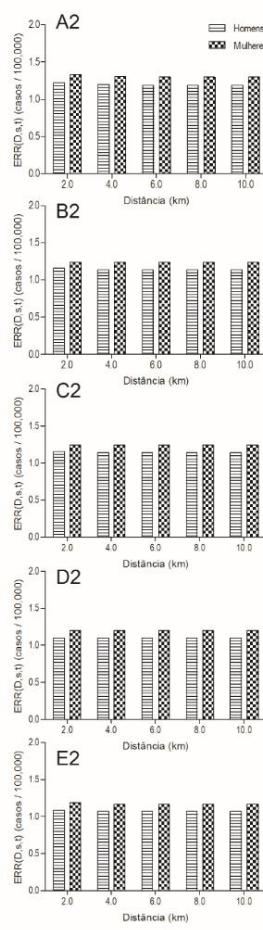
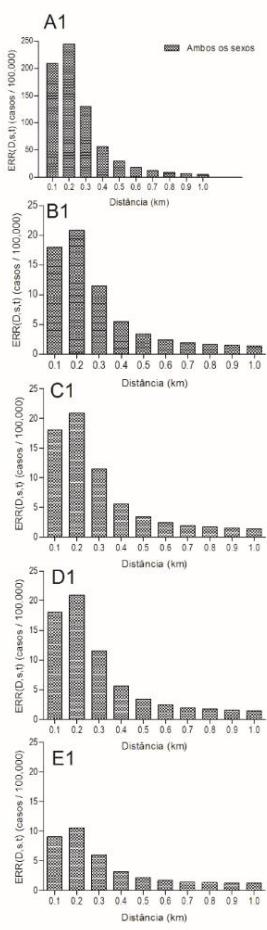


Fig. 3. (a) Máxima distância de dose em função da altura da dispersão atmosférica, (b) Dose equivalente total efetiva em função da altura da dispersão atmosférica e (c) Indivíduos afetados nas áreas de controle operacional interna, média e externa em função da altura da dispersão atmosférica.

Então, de posse desses dados, foi possível verificar, por meio do uso das equações do BEIR, os excessos de risco relativos, conforme Fig. 4.

FIG. 4. Relação entre o excesso de risco relativo e a distância de máxima dose para homens e mulheres, tomando por base as variáveis $a =$ Idade na exposição, $T =$ tempo desde a exposição e para a radiação gama do Césio 137 e análise através do BEIR V ou VII: (A1) $a \leq 20$, $T \leq 15$ e BEIR V, (A2) $a \leq 20$, $T \leq 15$ e BEIR VII, (B1) $a \leq 20$, $15 < T \leq 25$ e BEIR V, (B2) $a \geq 20$, $15 < T \leq 25$ e BEIR VII, (C1) $a \leq 20$, $T > 25$ e BEIR V, (C2) $a \leq 20$, $T > 25$ e BEIR VII, (D1) $a > 20$, $T \leq 25$ e BEIR V, (D2) $a > 20$, $T \leq 25$ e BEIR VII, (E1) $a > 20$, $25 < T \leq 30$ e BEIR V, (E2) $a > 20$, $25 < T \leq 30$ e BEIR VII.

- Uma vez conhecidos os possíveis cenários desencadeados por um acidente e suas consequências, estimáveis a partir das tabelas e figuras até aqui apresentadas, pode-se, após a ocorrência de um acidente real, estimar os danos relacionados às máximas doses, máximas distâncias de dose, áreas atingidas por cada condição de contorno e a população afetada, podendo se identificar informações relevantes para tomadas de decisão, tais como:
 - Alcance da pluma com dose de 1mSv em até 27Km, podendo chegar a expor mais 346.000 indivíduos ao limite de doses para público em situação operacional normal;
- Aproximadamente 3.900 indivíduos afetados por doses superiores a 50mSv, considerado o nível de ação para evacuação da população em situação de emergência;
- Cerca de 1.800 indivíduos afetados por doses superiores a 100mSv, considerado o limite de dose em situações de emergência para executar ações para prevenir o desenvolvimento de situações catastróficas;
- Excesso de Risco Relativo em até 15 indivíduos a 200m da fonte para doses agudas, mostrando a necessidade de preocupação com a população fixa do prédio e com os respondedores;
- Maior vulnerabilidade para indivíduos que receberem doses com idade inferior a 20 anos para doses agudas, favorecendo a composição de equipes de resposta compostas por indivíduos de idade mais elevada;
- Excesso de Risco Relativo em até 45 indivíduos para baixas doses, isto é, para a população fluminense;

Maior vulnerabilidade para mulheres que receberem baixas doses.

Os gráficos apresentados na FIG. 4. permitem também estudos para a redução de risco absoluto e análises estatísticas de números necessários a tratar, evitando-se o tratamento de toda a população e facilitando a triagem dos afetados além de servir de apoio à tomada de decisão, uma vez que lista possíveis cenários que podem ser comparados em uma situação de emergência real futura, bem como investigações de relação causal das eventuais enfermidades que afetem a população exposta.

4. CONCLUSÃO

Assim, com base no conhecimento dos riscos associados a um possível incêndio em irradiadores de sangue que façam uso de material radioativo, pode-se estimar previamente suas consequências, de modo a permitir o devido planejamento de ações preventivas, preparatórias, mitigadoras e de resposta capazes de reduzir as consequências na população potencialmente afetada.

- Adicionalmente, em caráter de resumo sobre alguns pro-

cedimentos que podem auxiliar a redução de riscos de desastres envolvendo incêndios em materiais radioativos, pode-se listar:

- Conhecimento e identificação prévia dos riscos;
- Controle de acesso à fonte;
- Capacitação específica quanto às medidas preventivas dos profissionais que habitem edificações que possuam irradiadores, mesmo que suas atividades não sejam diretamente relacionadas aos mesmos, ;
- Uso de medidas de orientação de evacuação de público;
- Utilização de dispositivos fixos e portáteis de combate a incêndios para primeira resposta, evitando-se atingir a queima generalizada;
- Revisão de legislação relativa à prevenção e combate a incêndios, tratando especificamente materiais radioativos;
- Criação de Planos Operacionais padrão para operações integradas nas ações de combate a incêndios em materiais radioativos;
- Elaboração de planos de contingências específicos para a ameaça de incêndios em material radioativos; e
- Realização de simulados multiagências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Santos. J. R; Qualharine. E. L.. Proteção contra incêndio em instalações nucleares - fator de integração da segurança. XII SIMPEP - Bauru, SP. 2005.
- [2] Vieira, Suzane de A.. Estudo sobre fatores causais, consequências e ações de resposta no acidente com Césio 137 em Goiânia/GO. Revista emergência. Edição 2/2015, novo Hamburgo-RS, p. 10, fev. 2015. Entrevista concedida a Josué dos Santos.
- [3] Instituto Estadual de Hematologia do Rio de Janeiro – Hemorio. Projeto de adequação do Hemocentro Público. Avaliação pós-ocupação, diagnóstico energético e etiquetagem do nível de eficiência energética. Brasília, 2012.
- [4] International Atomic Energy Agency–IAEA. Categorization of Radioactive Sources. IAEA –TECDOC –1344. 2003.
- [5] Corpo de Bombeiros – Polícia Militar do Estado de São Paulo (CB-PMESP). Controle de fumaça. Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros. IT 15:04. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2004.
- [6] National Atmospheric Release Advisory Center-NARAC. Hotspot Health Physics Codes. Lawrence Livermore national laboratory livermore, CA, USA. 2013.
- [7] COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais. In: V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. Anais. São Paulo: EPUSP, 2003.
- [8] Biological Effects Of Ionizing Radiation V (Beir V). National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Natl Acad. Press. Washington, DC. 1990.
- [9] Comissão Nacional de Energia Nuclear; Ministério da Ciência e Tecnologia. Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Norma CNEN-NN-3.01:2011. Rio de Janeiro: CNEN. Setembro de 2011.

Análise da interação tubo-projétil durante a balística interna de uma munição APFSDS em um canhão 105 mm

Allan A G Ferreira*, Jorge A M de Goisa, Aldélio B Caldeira

Instituto Militar de Engenharia (IME)
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270,
Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
E-mail: *allanfer@gmail.com

RESUMO: A interação tubo-projétil durante a balística interna de uma munição APFSDS em um canhão 105 mm com alma lisa é analisada, empregando um modelo em elementos finitos implementado no software LS-DYNA. O projétil é modelado como rígido com cinta obturadora flexível. Simulações considerando o tubo do armamento rígido e flexível foram realizadas. Projéteis com desbalanceamento de massa também foram estudados. Uma análise estática foi realizada para obter a deformação do tubo devido à gravidade e em seguida a análise dinâmica da interação tubo-projétil foi executada. Os resultados mostram que o desbalanceamento de massa do projétil e as deformações no tubo modificam a dinâmica do projétil durante a balística interna, influenciando o fenômeno de batimento e alterando as condições do projétil na boca da arma. Portanto, a interação tubo-projétil influencia a acurácia e a precisão do tiro.

PALAVRAS-CHAVE: Dinâmica. Corpo flexível. Elementos finitos. Balística.

ABSTRACT: The barrel-projectile interaction during the interior ballistics of an APFSDS ammunition in a 105 mm smoothbore cannon is analyzed by using a finite element model implemented in the LS-DYNA software. The projectile is rigid with flexible obturator. Simulations considering the rigid and flexible tube were performed. Mass unbalanced projectiles were studied. A static analysis was executed to obtain the deformation of the tube due to gravity and then the dynamic analysis of the barrel-projectile interaction was performed. The results show that the projectile mass unbalance and the barrel deformations modify the dynamics of the projectile during the interior ballistics, influencing the balloting phenomenon and changing the projectile conditions at the muzzle of the gun. Therefore, the barrel-projectile interaction influences the accuracy and the precision of the shot.

KEYWORDS: Dynamics. Flexible body. Finite elements. Ballistics.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da balística pode ser classificado em quatro áreas: balística interior, balística intermediária, balística exterior e balística terminal [1, 2].

A balística interior lida com a interação entre arma, projétil e propelente antes do projétil sair pela boca do tubo. Isto inclui o processo de ignição do propelente, a queima do propelente na câmara, a pressurização da câmara, o engraxamento da cinta de forçamento e a obturação da câmara, a dinâmica do projétil no interior do tubo e a dinâmica do tubo durante o ciclo de disparo [1]. Os dois últimos são objetos de estudo deste artigo.

Uma das formas utilizadas para aumentar o alcance e a energia cinética de projéteis consiste em aumentar o comprimento do tubo dos canhões. Porém, é importante observar que tubos longos são mais flexíveis, influenciando a dinâmica do projétil durante a balística interna e, em particular, a posição e a cinemática do projétil na boca da arma. Como consequência o armamento pode apresentar maior dispersão no tiro, bem como perda de precisão [3].

Os movimentos da boca do tubo, induzidos pelo lançamento do projétil, são inevitáveis e difíceis de controlar devido à escala de tempo do percurso percorrido pelo projétil dentro do tubo ser da ordem de milissegundos [3]. Desta forma, a análise da interação tubo-projétil e da rigidez do sistema de armas se torna relevante no projeto de canhões com tubos longos e em canhões, obuseiros e morteiros embarcados em viaturas militares [3].

Durante o deslocamento do projétil no interior do tubo, ocorre o fenômeno conhecido como batimento, o qual consiste em choques sucessivos entre o projétil e o tubo. Estes choques decorrem dos movimentos de deriva e arfagem do projétil no interior do tubo, bem como do deslocamento do

centro de massa do projétil no plano normal ao eixo do tubo, podendo resultar também em um movimento de bamboleio.

O batimento é ocasionado por erros e tolerâncias de fabricação do armamento e da munição. Assim, o batimento é um fenômeno decorrente da interação tubo-projétil [1, 4]. Em munições subcalibre, como a APFSDS, o sabot tem por objetivo diminuir o batimento [1], assim como a cinta de turbinha nas munições tradicionais.

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento dinâmico da interação tubo-projétil durante a balística interna de uma munição APFSDS (munição perfurante, estabilizada por empenas e com cinta descartável) disparada de um canhão calibre 105 mm com alma lisa. Um modelo em elementos finitos é implementado no solver LS-DYNA, permitindo a avaliação do batimento, ao considerar duas configurações (tubo rígido e depois tubo flexível).

1.1 Trabalhos Relacionados

Entre 1998 e 2005 a companhia Next Munitions conduziu estudos para simular a dinâmica de armas por meio de análises computacionais via elementos finitos [5]. Este tipo de simulação foi iniciado contemplando as interações entre o projétil e o tubo da arma, sendo posteriormente aprimorada ao introduzir o modelo completo do sistema de armas [5].

A acurácia de canhões de carros de combate modernos com longos tubos, relativamente finos, é influenciada pela flexibilidade dos tubos, especialmente, quando submetido a carregamento dinâmico. Pequenas deflexões e rotações na boca do canhão podem ser relevantes na acurácia do tiro a longas distâncias [3].

Experimentos de tiro foram realizados utilizando o canhão M256 em carro de combate M1A1 Abrams. Nestes

experimentos foram monitorados o movimento do tubo e dos mecanismos da culatra para uma configuração padrão, chamada de desbalanceada, e um sistema modificado, em que a massa foi adicionada à culatra para que a linha do centro de gravidade dela fosse coincidente com a linha do centro do tubo [6]. Mudanças significativas no comportamento do tubo da arma foram observadas ao se comparar as duas configurações, tanto na forma quanto na magnitude do deslocamento do tubo. Simulações numéricas em elementos finitos destes experimentos foram conduzidas com o auxílio do software DYNA 3D a fim de simular o comportamento dinâmico do sistema inteiro que inclui a culatra, o tubo da arma, o munhão, o mecanismo de recuo e o projétil [6].

Uma metodologia para analisar o comportamento do projétil com cinta descartável foi apresentada, submetendo o projétil a carregamentos laterais e axiais em um canhão calibre de 120 mm [7]. Diferentes tipos de munições foram estudados e resultados experimentais e numéricos foram comparados [7]. Os experimentos foram realizados em escala real para duas munições com arma de calibre 120 mm, o tubo da arma foi levemente fletido e o projétil foi forçado a ter deslocamento lateral produzindo significantes esforços laterais. O deslocamento lateral do sabot dentro do tubo foi medido utilizando uma máquina de raio-X com acurácia de 0,007in (0,01778mm).

As simulações numéricas consideraram três tipos de tubos: um tubo perfeitamente reto, um tubo com precisão próxima do real e um tubo levemente fletido [7]. Boa concordância entre os resultados experimentais e os resultados das simulações numéricas foi encontrada, obtendo valores de tensão e deformação do tubo e do deslocamento do projétil ao longo do tempo.

Um modelo bidimensional foi apresentado [4] para estudar o batimento, considerando o contato entre a cinta de forçamento e o tubo e o contato entre a cinta de turgência e o tubo como molas lineares, enquanto o tubo e o projétil foram considerados rígidos. Nos resultados encontrados neste modelo, encontrou-se batimento muito acentuado ao utilizar como condição inicial a inclinação do projétil, pois a mola passou a ficar tracionada ou comprimida, acumulando energia, que foi transferida ao projétil provocando o batimento. Quanto maior a rigidez do contato, maior será esta influência.

Além disso, alguns resultados, após a colisão do projétil com o tubo, mostram um movimento de zig-zag, pois a mola localizada na cinta de turgência empurra o projétil, que gira e comprime a mola localizada na cinta de forçamento que, por sua vez, empurra o projétil girando o mesmo, e este movimento se repete algumas vezes até que o sistema de molas entre em equilíbrio [4].

O comportamento dinâmico de um carro de combate com torre estabilizada tem-se ao disparar um projétil do tipo APFSDS de um canhão 105 mm raiado foi estudado [8]. O batimento balístico durante a balística interna foi investigado, considerando o tubo do canhão e o projétil como corpos rígidos. O modelo computacional permitiu avaliar os efeitos de diferentes dados de entrada, como a inclinação da munição e a posição do centro de massa do projétil sobre a dinâmica do projétil durante a balística interna [8].

Os efeitos da erosão e da excentricidade no tubo durante o disparo sobre o movimento transversal do projétil em um canhão M831A1 de calibre 120 mm foram avaliados em

experimentos, visando à validação de um código computacional de simulação da dinâmica tubo-projétil. A dificuldade de se comparar a análise experimental de um fenômeno balístico não linear e estocástico foi enfatizada [9].

O efeito da onda de pressão dinâmica sobre a resistência do tubo foi estudado [10], verificando-se a possibilidade de deformação plástica radial do tubo. Simulações das armas comerciais, M256 de 120mm e M68E1 de 105mm, foram conduzidas e dois modelos experimentais com dimensões similares a dos canhões supracitados foram avaliados, adotando, porém, espessuras menores próximo a boca do tubo. O método de elementos finitos foi empregado e verificou-se que não ocorre deformação permanente para os modelos das armas comerciais, porém as falhas encontradas na boca da arma nos modelos experimentais podem ser explicadas pela deformação plástica encontrada na simulação. Conclui-se que somente a análise dinâmica é capaz de verificar se há deformação plástica devido à onda de pressão, sendo a análise estática incapaz de verificar esta falha.

2. MODELO FÍSICO

Durante a balística interna, o projétil foi impelido pela ação dos gases que exercem uma pressão a sua retaguarda. Desta forma, no presente trabalho a pressão na base do projétil, obtida a partir de uma simulação no software PRODAS, é uma função prescrita do tempo. A curva de pressão fornecida pelo PRODAS está ilustrada na Fig. 1. Ademais, a pressão dos gases no interior da arma atuante sobre as paredes do tubo, não é considerada nesta análise.

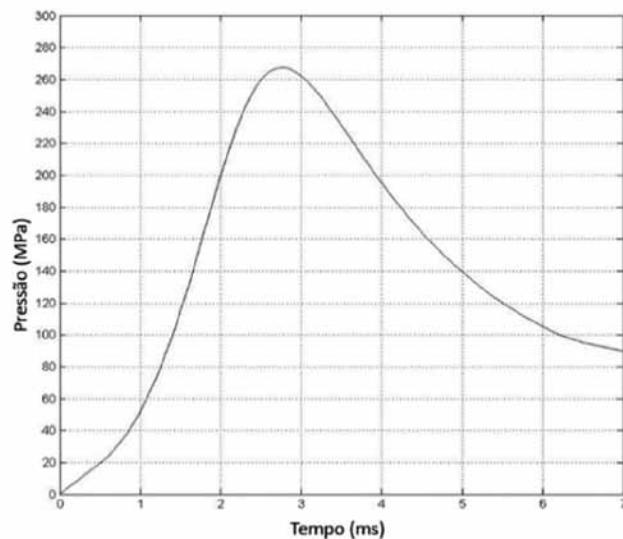


Fig. 1 - Curva de Pressão em função do tempo utilizada na culatra do projétil.

A solução do modelo de dinâmica do projétil fornece os ângulos de arfagem, deriva (ou guinada) e rolagem, bem como a posição espacial do projétil, enquanto a solução do modelo do comportamento do tubo fornece as deformações do tubo ao longo do tempo, permitindo observar que os deslocamentos da boca do tubo.

A simulação da dinâmica de um projétil APFSDS durante a balística interna em um canhão é realizada empregando um modelo 3-D. Os valores apresentados nas Tab. 1 e 2 foram utilizados na modelagem adotada e considerou-se a condição de tiro tenso. Ou seja, o tubo do canhão está na horizontal.

Tabela 1: Parâmetros utilizados no modelo do tubo.

Grandezas	Símbolo	Valor
Massa do tubo	Mt	580 kg
Módulo de elasticidade	E	200 GPa
Massa Específica	ρ	7 g/cm3
Poisson	v	0.3
Tensão de Escoamento		1117 MPa
Momento de Inércia do tubo na direção x	Jxt	3,74 kgm ²
Momento de Inércia do tubo na direção y	Jyt	748 kgm ²
Momento de Inércia do tubo na direção z	Jzt	748 kgm ²

Fonte:[3,6,10].

Tabela 2: Parâmetros utilizados no modelo do projétil APFSDS 105 mm M735.

Grandezas	Símbolo	Valor
Diâmetro da munição	dm	105 mm
Folga entre o tubo e a munição	gap	0,25 x 10-3 m
Massa da munição	Mm	5,67204 kg
Módulo de elasticidade do projétil	E	200 GPa
Massa específica	ρ	7 g/cm3
Poisson	v	0.3
Módulo de Elasticidade da Cinta de Forçamento	ECF	110 GPa
Densidade da Cinta de Forçamento	ρ_{CF}	3,5 g/cm3
Coeficiente de Atrito entre a cinta de forçamento e o tubo	μ	0,13
Momento de Inércia na direção x	Jxm	0,0030909 kgm ²
Momento de Inércia na direção y	Jym	0,0482886 kgm ²
Momento de Inércia na direção z	Jzm	0,0482886 kgm ²

Fonte:[8,7,11].

O modelo geométrico da arma [10] é reportado na Fig. 2, representando um canhão 105 mm com alma lisa e com folga de 0,25 mm [8] entre o projétil e o tubo do canhão.

O tubo é considerado engastado em uma extremidade e livre na outra, não sendo levado em conta o recuo da arma.

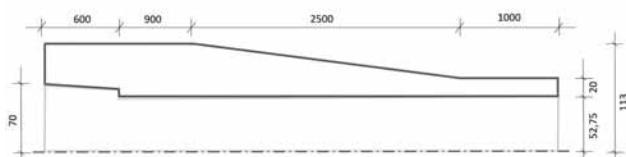


Fig. 2 - Geometria da arma dimensões em milímetros.

A geometria utilizada para o modelo do projétil é apresentada na Fig. 3, sendo o raio do projétil 52,5 mm, utilizados no modelo da cinta de turgência e para cinta obturadora, o mesmo raio interno do tubo. Os contatos entre o projétil e a arma foram definidos com uma formulação do tipo penalidade com uma tolerância de penetração de 0,01 mm. É utilizado um coeficiente de atrito dinâmico de 0,13, entre a cinta de obturação e o tubo [11].

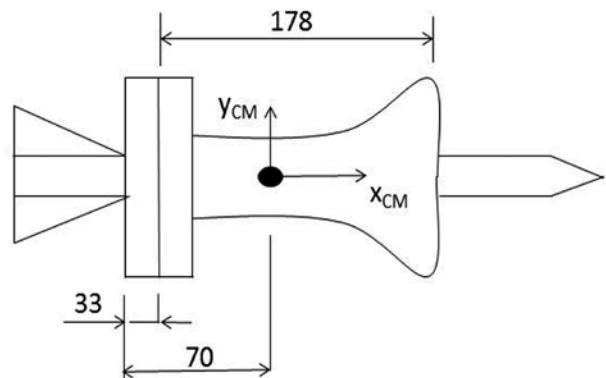


Fig. 3 - Geometria do Projétil. (Dimensões em mm). Fonte:[8].

3. MODELO MATEMÁTICO

Nesta seção é apresentada a formulação matemática para os corpos flexíveis (arma e cinta de forçamento) e para os corpos rígidos (projétil e cinta de turgência), com suas respectivas condições de contorno. Também é apresentado o modelo de contato entre a arma e a cinta de forçamento e entre a arma e a cinta de turgência.

Para os corpos flexíveis (cinta de forçamento e a arma) são utilizadas as Eqs. 1 a 3.

$$\rho \ddot{u}_i = f_i^B + \sigma_{ij,j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{j,i} + u_{i,j}), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)} \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2 \frac{E}{2(1+v)} \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

Onde

f_i^B é o vetor de forças de corpo,

σ é o tensor de tensões,

u_i é o vetor deslocamento,

ε é a matriz de deformações,

E é o módulo de Young,

v é o coeficiente de Poisson.

Sendo $\delta_{ij}=0$ quando $i \neq j$, e $\delta_{ii}=1$ quando $i=j$.

Para arma são utilizadas as condições de contorno apresentadas nas Eqs. 4 a 5, ilustradas pela Fig. 4:



Fig. 4 - Modelo da arma para condições de contorno.

$$u_i(x)=0, \quad x \in S_i; \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

$$\sigma_{ji} n_j = f_i^S = 0, \quad x \in (S_2 \cup S_3); \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (5)$$

A condição de contorno apresentada na Eq. 5, só será utilizada para toda a superfície S_3 quando não houver o contato entre a cinta de turgência e a arma. O mesmo procedimento se aplica à cinta de forçamento e a arma. Quando houver con-

tato nesta região ou em parte dela, estas condições de contorno não serão aplicadas na região de contato em vez disso os esforços devido ao contato serão computados.

As condições de contorno para a cinta de forçamento são apresentadas nas Eqs. 6 e 7 conforme ilustrado na Fig. 5.

$$u_{CF}(x) - u_p(x) = 0, \quad x \in \Gamma_a \quad (6)$$

$$\sigma_{ji} n_j f_i^s = 0, \quad x \in \Gamma_b \text{ e } x \in \Gamma_d; \quad i, j = 1, 2, 3$$

Para a superfície Γ_d , esta equação só é válida quando não houver contato.

$u_{CF}(x)$ é o vetor deslocamento da cinta de forçamento na posição x ,

$u_p(x)$ é o vetor deslocamento do projétil na posição x .

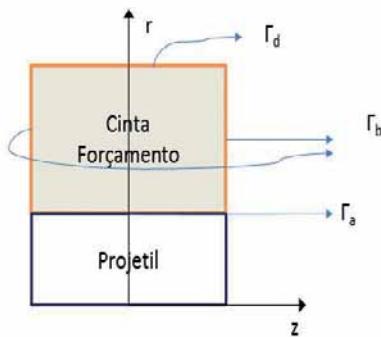


Fig. 5 - Modelo da cinta de forçamento para condições de contorno.

Para formulação do contato normal, é necessário encontrar os pontos de menor distância entre as superfícies que poderão entrar em contato. O caso apresentado na Fig. 6 é entre a arma e a cinta de turgência, embora este conceito seja utilizado em todos os contatos deste trabalho.

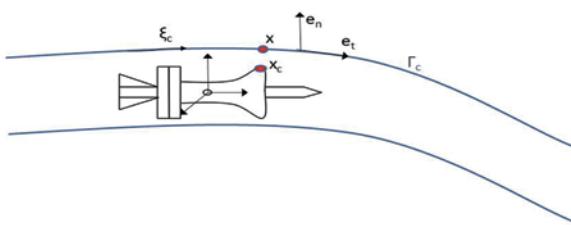


Fig. 6 - Modelo de contato para arma e cinta de turgência.

A Eq. 8 tem como objetivo encontrar o ponto x_c localizado na superfície da cinta de turgência, tal que, ele seja a menor distância do ponto x localizado na superfície da arma.

$$\varphi(\xi_c) = (x - x_c(\xi_c))^T e_t(\xi_c) = 0 \quad (8)$$

φ é a função de busca de contato,

x é o vetor posição de um ponto na superfície da arma, x_c é o vetor posição de um ponto na superfície da cinta de turgência,

e_t é o vetor unitário tangente à superfície da arma,

O contato normal deve satisfazer as seguintes condições [12]:

a) condição de impenetrabilidade,

$$u^T e_n + g_n \geq 0 \quad (9)$$

$$g_n = (x - x_c(\xi_c))^T e_n(\xi_c) \geq 0, \quad x \in \Gamma_c \quad (10)$$

u é o vetor deslocamento,
 g_n é a função de folga normal,
 e_n é o vetor unitário normal a superfície da arma.

b) a tensão devida à força de contato deve ser positiva,

$$\sigma_n \geq 0, \quad x \in \Gamma_c \quad (11)$$

c) a condição de consistência,

$$\sigma_n (u^T e_n + g_n) \geq 0 \quad (12)$$

Esta condição indica que, quando os pontos x e x_c estão em contato, a diferença entre eles é zero. Nesta situação temos $\sigma_n \neq 0$, e, quando eles estão afastados, não há contato, então $\sigma_n = 0$.

A mesma formulação, apresentada nas Eqs. 8 até 12, é utilizada para obter a região de contato utilizando o ponto x na cinta de turgência e o ponto x_c na arma, sendo os eixos normal, e_n , e tangencial, e_t , à superfície da cinta de turgência.

Para o contato entre a arma e a cinta de forçamento também são utilizadas as Eqs. 8 a 12, utilizando a arma como a superfície cuja direção normal ao ponto x é e_n , depois utilizando a superfície da cinta de forçamento como a superfície cuja normal é utilizada para medir a menor distância entre as superfícies de contato.

O contato tangencial, entre a cinta de forçamento e a arma, deve obedecer às seguintes condições consideradas nas Eqs. 13 a 15 [12]:

a) condição de não escorregamento,

$$f_t - \mu f_n < 0, \quad u_{rel} = 0 \quad (13)$$

b) condição de escorregamento,

$$f_t - \mu f_n = 0 \quad u_{rel} > 0 \quad (14)$$

c) condição de consistência,

$$u_{rel} (f_t - \mu f_n) = 0 \quad u_{rel} > 0 \quad (15)$$

Onde

f_n é o vetor de força de contato normal,

f_t é o vetor de força tangencial,

u_{rel} é o deslocamento relativo entre as duas superfícies na direção tangencial,

μ é o coeficiente de atrito entre as superfícies.

A formulação para os corpos rígidos, projétil e cinta de turgência, é apresentada nas Eqs. 16 a 20, e ilustrada na Fig. 7.

$$\sum_{j=1}^3 F_j = \frac{d}{dt} (m_I a^*) \quad (16)$$

F_j é o vetor de forças no sistema de referência inercial nas direções $j=1, 2, 3$,

m_I é a matriz de massa,

a^* é a aceleração do centro de massa do projétil no sistema inercial.

$$\sum_{j=1}^3 F_j = m_A (a_A + \dot{\omega} \times r_{AB} + \omega \times \dot{\omega} \times r_{AB} + 2\omega \times v_{rel} + a_{rel}) \quad (17)$$

$\dot{\omega}$ é a velocidade angular do projétil no sistema inercial, r_{AB} é a distância entre os pontos A e B medida no sistema inercial, \dot{v}_{rel} é a velocidade relativa entre os pontos A e B no sistema inercial,

\ddot{a}_{rel} é a aceleração relativa entre A e B no sistema inercial.

Como o corpo é rígido e não há variação da distância entre os pontos A e B, os dois últimos termos da equação são nulos.

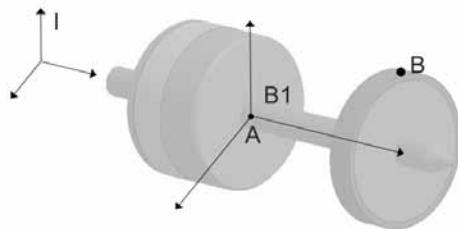


Fig. 7- Modelo para equacionamento do Projétil.

$$\sum_{j=1}^3 F_j = m_I(a_A + \dot{\omega} \times r_{AB} + \dot{\omega} \times \dot{\omega} \times r_{AB}) \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^3 F_j = F_p + F_B + F_{reação} + F_{cont} \quad (19)$$

F_p é o vetor de força devido à pressão,

F_B é o vetor de força devido à gravidade,

$F_{reação}$ vetor de força de reação entre o projétil e a cinta de forçamento,

F_{cont} é o vetor de força de contato entre o tubo e a cinta de turgência.

Segundo a equação de variação da quantidade de movimento angular, temos:

$$\sum_{j=1}^3 B_n M_{Aj} = B_n I_A \frac{d}{dt}(B_n \omega) + B_n \Omega \times (B_n I_A \times B_n \omega) + m_{Bn} \rho_A^* \times B_n a_A \quad (20)$$

M_{Aj} momentos provocados pelas forças externas e de reação,

I_A é o tensor de inércia do corpo, calculado em relação ao ponto A no sistema móvel Bn ,

$\frac{d}{dt}(B_n \omega)$ é a derivada do vetor velocidade angular absoluta do corpo no sistema móvel Bn ,

Ω é o vetor aceleração angular absoluta na base Bn , m é a massa total do corpo,

ρ_A^* é o vetor posição do ponto A até o centro de massa do corpo,

a_A é a aceleração linear absoluta do ponto A na base móvel Bn .

4. SOLUÇÃO NUMÉRICA

Aplicando o princípio dos trabalhos virtuais na equação de equilíbrio estático, Eq. 21, e utilizando o teorema do divergente, obtemos a Eq. 22 [12].

$$f_i^B + \sigma_{ij,j=0} = 0 \quad (21)$$

$$\int_V \delta \epsilon_{ij}^T \sigma_{ij} dV = \int_V \delta d^T f_i^B dV + \int_S \delta d^T f_i^S dS \quad (22)$$

f_i^B são as forças de volume na direção i,

f_i^S são as forças de superfície na direção i, $\delta d_s, \delta d_i$ são os vetores de deslocamentos virtuais, $\delta \epsilon$ é o vetor de deformações virtuais.

Aplicando o princípio de D'Alambert pode-se generalizar a Eq. 22 para a análise dinâmica, considerando os efeitos de inércia como forças de volume adicionais, Eq. 23. Pode-se obter a equação de equilíbrio dinâmico, considerando também os esforços localizados, Eq. 24.

$$f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (23)$$

Sendo ρ a massa específica e \ddot{u} a aceleração.

$$\int_V \delta \epsilon^T \sigma dV = \int_V \delta d^T f_v dV + \int_S \delta d^T f_s dS - \int_V \delta d^T \rho \ddot{u} dV + \sum \delta d^T F_i \quad (24)$$

Aplicando o método de elementos finitos, dentro de cada elemento, a solução será aproximada na forma de polinômio, conforme Eq. 25.

$$u(x, y, z) = \sum_{I=1}^n h_I(x, y, z) U_I \quad (25)$$

Tal que:

u é o deslocamento em qualquer ponto do elemento,

U é o vetor de três componentes de deslocamentos nodais, U_I, V_I, W_I , de nós da malha de elementos,

$h_I(r)$ é a função de interpolação de deslocamento do nó I,

n é o número de nós do elemento.

A função de interpolação para o elemento tridimensional é apresentada nas Eqs. 26 e 27.

$$h_I(x, y, z) = l_I(\xi) l_I(\eta) l_I(\zeta) \quad (26)$$

$$l_I(r) = \frac{(r - r_0)(r - r_1) \dots (r - r_{j-1})(r - r_{j+1}) \dots (r - r_n)}{(r_j - r_0)(r_j - r_1) \dots (r_j - r_{j-1})(r_j - r_{j+1}) \dots (r_j - r_n)} \quad (27)$$

$l_I(r)$ é o polinômio de Lagrange da variável r , utilizado para obter a função de interpolação do nó I de um elemento,

ξ, η e ζ são as coordenadas naturais do sistema parametrizado.

A matriz H do elemento pode ser obtida através da Eq. 28.

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & h_2 & 0 & 0 & \dots & h_n & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & 0 & h_2 & 0 & \dots & 0 & h_n & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & 0 & 0 & h_2 & \dots & 0 & 0 & h_n \end{bmatrix} \quad (28)$$

A relação de deformação e deslocamento é obtida pela Eq. 29 que relaciona o deslocamento nodal com a deformação do elemento através da matriz B.

$$\epsilon(x, y, z) = \sum_{I=1}^n B_I(x, y, z) U_I \quad (29)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & \dots & h_n & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & \dots & 0 & h_n & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & \dots & 0 & 0 & h_n \end{bmatrix} \quad (30)$$

Onde B é a matriz de deslocamento-deformação obtida pela derivada da matriz H conforme apresentado na Eq. 30.

As tensões são relacionadas com as deformações através da Eq. 31.

$$\sigma = C \varepsilon + \sigma^{l(m)} \quad (31)$$

σ é o tensor de tensões do elemento,

C é a matriz de elasticidade,

$\sigma^{l(m)}$ é a tensão inicial no elemento m.

Considerando que a Eq. 22 é válida dentro de cada elemento, pode-se obter a equação para todos os elementos por meio do somatório das equações de equilíbrio para cada elemento conforme apresentado na Eq. 34. Considerando que os deslocamentos e deformações virtuais assumem as mesmas aproximações que as Eqs. 25 e 29, temos:

$$\delta d = \sum_{i=1}^n h_i(x, y, z) \delta U_i \quad (32)$$

$$\delta \varepsilon(x, y, z) = \sum_{i=1}^n B_i(x, y, z) \delta U_i \quad (33)$$

Substituindo as Eqs. 25, 29, 32 e 33 na Eq. 24, temos:

$$\begin{aligned} \delta U^T \left[\sum_v H^T \rho H dV \right] \ddot{U}_i + \delta U^T \left[\sum_v B^T C B dV \right] U = \\ + \delta U^T \left[\sum_v \delta H^T f_v dV + \sum_s H^T f_s dS \right. \\ \left. + \sum_v B^T \sigma^l dV + \sum_i \delta d_i^T F_i \right] \end{aligned} \quad (34)$$

Simplificando obtem-se a seguinte forma:

$$M U'' + K U = R \quad (35)$$

$$R = R_B + R_S + R_I + R_C \quad (36)$$

$$M = \sum_v H^T \rho H dV \quad (37a)$$

$$K = \sum_v B^T C B dV \quad (37b)$$

$$R_B = \sum_v H^T f_v dV \quad (37c)$$

$$R_S = \sum_s H^T f_s dS \quad (37d)$$

$$R_I = \sum_v B^T \sigma^l dV \quad (37e)$$

$$R_C = \sum \delta d_i^T F_i \quad (37f)$$

M é a matriz de massa do sistema global,
K é a matriz de rigidez do sistema global,
RB é o vetor de força de corpo do sistema global,
RS é o vetor de força de superfície do sistema global,
R_I é o vetor de força correspondente as tensões iniciais,
R_C é a força nodal concentrada.

As integrais obtidas nas equações acima são resolvidas empregando um método de integração numérica, e neste trabalho é utilizado o método de quadratura de Gauss para um sistema parametrizado transformando estas integrais em um somatório, através de pesos e pontos de integração. A aproximação da integral no caso tridimensional já parametrizada é apresentada na Eq. 38.

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta = \sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1}^{NG} \sum_{k=1}^{NG} \omega_i \omega_j \omega_k f(\xi_i, \eta_j, \zeta_k) \quad (38)$$

Tal que:

ξ_i , η_j e ζ_k , são os valores dos pontos de integração nas direções i, j e k,

ω_i , ω_j e ω_k são os pesos nas direções i, j e k.

NG é a quantidade de pontos de Gauss para cada direção.

4.1 Análise estática

Esta análise é utilizada para obter a deformação do tubo antes do disparo, conforme apresentado na Eq. 22. Utilizando as Eqs. 25 e 29, obtemos a Eq. 39, onde R e K são dados pelas Eqs. 36 e 37.

$$K U = R \quad (39)$$

4.2 Integração no tempo

Face às escalas temporais associadas aos fenômenos de balística interna, um esquema explícito de integração no tempo foi adotado. Ademais, para que o problema possa ser resolvido de forma desacoplada, ele deve satisfazer às seguintes condições: a matriz de amortecimento do sistema deve ser negligenciada; e a matriz de massa deve ser diagonal.

Desta forma, são obtidos os coeficientes da matriz de massa consistente do elemento, M_{ii} e, em seguida, é calculada a massa do elemento, M_e.

$$M_{ii} = \sum_v H_i^T \rho H_i dV \quad (40)$$

$$M_e = \sum_v \rho dV \quad (41)$$

Com isso são obtidos os valores de m_{ii} que são os coeficientes da diagonal principal da matriz de massa diagonalizada.

$$m_{ii} = M_e \frac{M_{ii}}{\sum_i M_{ii}} \quad (42)$$

O método de diferenças centradas é apresentado nas Eqs.

43 e 44, sendo o erro de aproximação da ordem de Δt^2 [12].

$$\dot{U}^t = \frac{U^{t-\Delta t} - 2U^t + U^{t+\Delta t}}{\Delta t^2} \quad (43)$$

$$\ddot{U}^t = \frac{U^{t+\Delta t} - U^{t-\Delta t}}{2\Delta t} \quad (44)$$

Considerando a Eq. 35 no tempo t tem-se:

$$M\ddot{U}^t + KU^t = R^t \quad (45)$$

Para determinação de $U^{t+\Delta t}$ é necessário ter os valores de U^t e $U^{t-\Delta t}$. Para $t=0$ o valor de U^0 e \dot{U}^0 são conhecidos e \ddot{U}^0 pode ser calculado pela Eq. 45.

Para calcular $U^{t-\Delta t}$ deve-se utilizar a Eq. 47.

$$\frac{M}{\Delta t^2} U^{t+\Delta t} = R^t + \left[2 \frac{M}{\Delta t^2} - K \right] U^t - \frac{M}{\Delta t^2} U^{t-\Delta t} \quad (46)$$

$$U^{t-\Delta t} = U^0 - \Delta t \dot{U}^0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{U}^0 \quad (47)$$

Com os deslocamentos calculados, podem-se obter as acelerações e velocidades por meio das Eqs. 43 e 44.

4.3 Estabilidade da solução

Para garantir estabilidade e precisão da solução, o tamanho do passo de tempo utilizado na integração explícita no tempo é limitado pela condição de Courant-Friedrichs-Levy. [12].

Então, o critério de passo de tempo para que a solução seja estável é apresentado na Eq. 48.

$$\Delta t \leq f \left[\frac{L_e}{c} \right]_{\min} \quad (48)$$

Onde Δt é o incremento de tempo, f é o fator de estabilidade do passo de tempo, L_e é a dimensão característica de um elemento e c é a velocidade do som local no material em um elemento.

$$L_e = \frac{v_e}{A_{e\max}} \quad (49)$$

Tal que, v_e é o volume do elemento e A é a área do maior lado do elemento e a velocidade do som pode ser expressa por

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (50)$$

Na Eq. 50, E é o módulo de Young, ν é a razão de Poisson e ρ a massa específica.

4.4 Escolha do material

Ao utilizar o material rígido para o projétil ou para o tubo são desconsideradas as deformações dos elementos da sua malha, isto é, não há deslocamento relativo entre os nós dos elementos. Todos os graus de liberdade dos nós no corpo são acoplados com o centro de massa do corpo. Consequentemente,

eles têm somente seis graus de liberdade desconsiderando o número de nós que o definem. As propriedades, tais como, massa, e a inércia do projétil são definidas no centro de massa do corpo.

O elemento que recebe o material rígido não é utilizado para o cálculo do passo de tempo, porém para o cálculo da rigidez do contato suas propriedades serão utilizadas caso haja contato.

O material flexível é utilizado para o tubo e para a cinta de forçamento; neste caso os graus de liberdade dependerão do elemento escolhido, obtendo a quantidade total através dos nós da malha.

4.5 Escolha do elemento e estudo da malha

Neste trabalho todos os elementos são sólidos, hexaédricos ou tetraédricos. Para os corpos rígidos, tubo e cinta de turgência, considerou-se elemento sólido tipo 1, hexaédrico linear com um ponto de integração. Para o projétil é considerado o elemento tipo 13, tetraédrico, também linear, devido ao carregamento de pressão.

Para os corpos considerados flexíveis, é utilizado o elemento sólido tipo 3 que tem polinômio interpolador quadrático e cada nó com graus de liberdade de translação e rotação.

A convergência da malha de elementos finitos é apresentada na Fig. 8. Isto é feito para que o modelo possa ser capaz de simular o comportamento dinâmico da estrutura com precisão satisfatória e o menor tempo computacional possível.

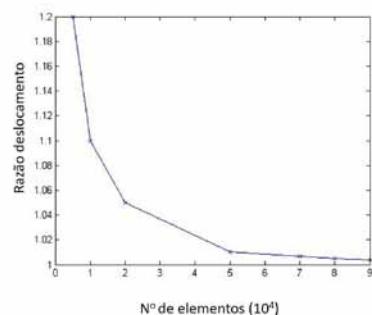


Fig. 8 - Análise de convergência da malha.

O refinamento da malha se deve ao pequeno deslocamento do projétil nas direções lateral e vertical devido à folga entre o tubo e o projétil. Para obter o tamanho do elemento, foi considerado o passo de tempo utilizado no cálculo de cada iteração. Além disso, também foi considerada uma malha compatível com a geometria dos corpos, sendo possível detectar a penetração, que deve ser considerada pequena comparada à folga.

No caso mais simples, onde a deformação pode ser desprezada, utiliza-se o elemento menos custoso computacionalmente, com interpolação linear.

Optou-se por utilizar funções de interpolação quadrática, para obter um modelo com menos elementos para os corpos flexíveis (tubo e cinta de forçamento).

4.5 Tipos de contato

Os contatos podem ser na direção normal e/ou tangencial. O contato normal é utilizado para avaliar quando ocorre penetração entre dois corpos e o contato tangencial é utilizado quando ocorre atrito entre os corpos. Não é objeto de estudo

deste trabalho obter o comportamento e esforços no início do disparo. Logo, será levado em conta apenas o atrito dinâmico entre os corpos.

O método de penalidade é o algoritmo de contato mais utilizado e consiste na verificação da penetração do nó do corpo 1 através de uma superfície, corpo 2. Se o nó do corpo 1 não penetrar, nada é feito. Se o nó penetrar uma força de interface é aplicada entre o nó do corpo 1 e o seu ponto de contato. A magnitude desta força é proporcional à profundidade de penetração e a rigidez do contato, sendo o mesmo princípio de uma mola sobre pressão. A Fig. 9 ilustra este comportamento [12, 13].

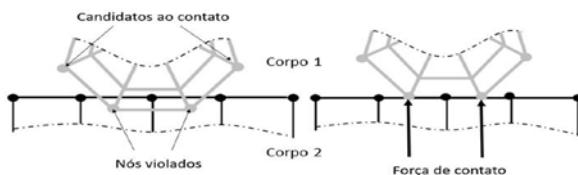


Fig. 9 - Ilustração do contato quando uma superfície penetra em outra e gera uma força de repulsão.

Neste trabalho, o elemento utilizado é o elemento sólido. A sua formulação de contato utilizada pelo LS-DYNA [13,14] é o

$$k = lsfac \cdot sf \cdot K \cdot \frac{A^2}{V} \quad (49)$$

Onde $lsfac$ é o fator de escala global, sf é o fator de escala local, K é o módulo volumétrico ou “bulk modulus”, A é o segmento de área e V é o volume do elemento.

5. RESULTADOS

As condições iniciais e o material são apresentados na TAB. 3. Nesta tabela, a letra A considera o tubo rígido e a letra B o tubo flexível enquanto os números 1 e 2 identificam a ocorrência ou não de desvios do centro de massa.

Tabela 3: Estudo de casos e condições iniciais.

CASOS	1A	1B	2A	2B
Tubo	rígido	flexível	rígido	flexível
Desvio de CM vertical (mm)	0	0	-0,26	-0,26

5.1 Caso 1

Na Fig. 10 é apresentado o deslocamento do centro de massa (CM) do projétil com tubo rígido (caso 1A, indicado na Tab. 3) e com tubo flexível (caso 1B, indicado na Tab.3), ambos com projétil sem desvio do centro de massa.

Com o tubo rígido, o centro de massa do projétil se desloca para baixo até o projétil entrar em contato com o tubo e ter sua trajetória modificada. Observa-se apenas uma colisão do projétil com o tubo. Por outro lado, com o tubo flexível, o projétil passa a ter uma trajetória curvilínea onde é gerada uma força centrípeta que o impulsiona para fora da curva, causando assim o batimento na parte superior interna do tubo. Neste caso projétil colidiu com o tubo duas vezes, em 4,6 ms e 5,9 ms.

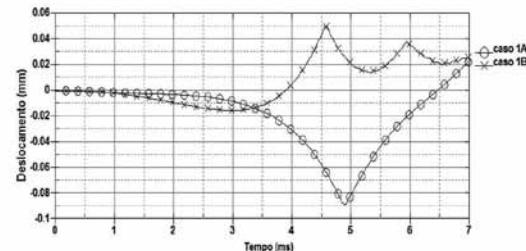


Figura 10 - Deslocamento do CM do projétil direção Y.

A Fig. 11 apresenta o deslocamento do CM do projétil na direção z. Observa-se um maior desvio na direção z para o tubo flexível em comparação com o tubo rígido.

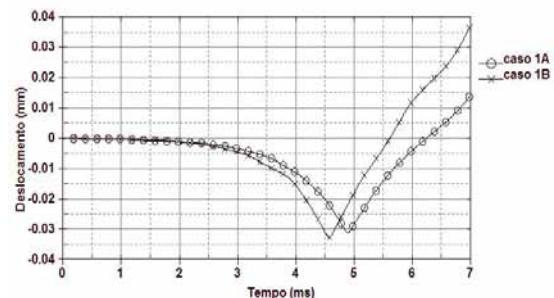


Fig. 11 - Deslocamento do CM do projétil na direção Z.

As Figs. 12 e 13 mostram como variam os ângulos de arfagem e deriva que revelam a orientação do projétil ao longo do tempo e em especial o ângulo que o projétil faz com a linha de centro do tubo ao final da balística interna.

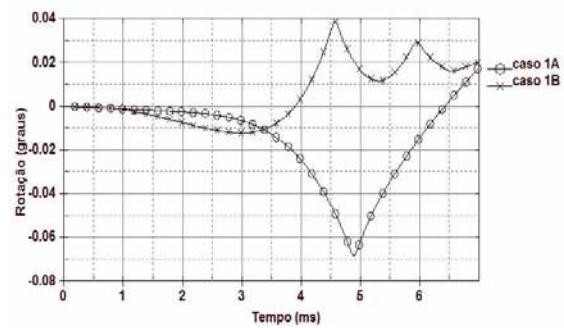


Fig. 12 - Arfagem do projétil.

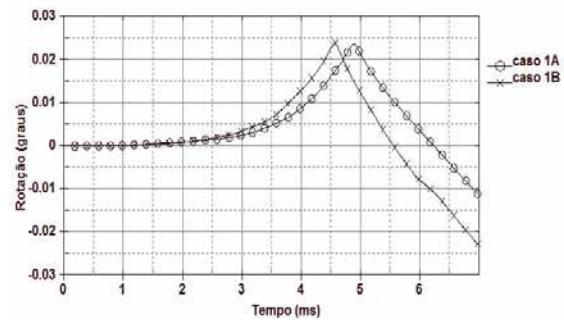


Fig. 13 - Deriva do projétil.

5.2 Caso 2

Na Fig. 14 observa-se que ao deslocar o CM do projétil, na condição inicial, ele passa a entrar em contato mais rapidamente com o tubo e tem sua frequência de batimento aumentada. Isto se deve ao momento provocado pela força, que

é originada da pressão dos gases. Esta força está localizada no centro geométrico da parte traseira do projétil. Como o momento é dependente da distância entre o centro geométrico e o centro de massa, um pequeno desvio causará um momento capaz de modificar a trajetória do projétil. Por esta mesma razão, o primeiro contato é obtido em 1,93 ms e no primeiro caso, onde o projétil não tem o seu centro de massa deslocado, o primeiro contato se dá em 4,8 ms. A amplitude e período de batimento aumentam devido à aceleração do projétil. A frequência de batimento não é constante ao longo do tubo e varia de 1333 Hz a 1000 Hz.

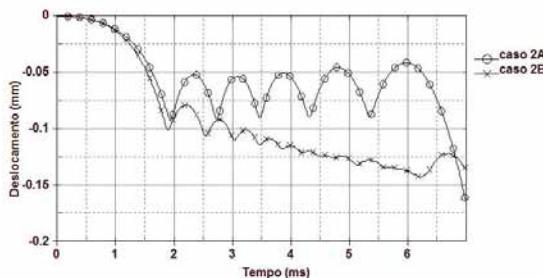


Fig. 14 - Deslocamento do CM do projétil na direção Y.

Ao compararmos o tubo flexível com o rígido verificamos que o batimento sofre um decréscimo na sua amplitude caracterizando um tipo de amortecimento, isto é parte da energia transmitida no impacto é absorvida pelo tubo, através da sua deformação a cada impacto.

É importante observar que o projétil passa a ter um aumento da amplitude de deslocamento quando está próximo da boca do tubo em aproximadamente 6,2 ms. Isto se deve ao movimento da boca do tubo, interagindo com o projétil que se movimenta em direção oposta. Sendo assim, parte desta energia é transferida para projétil, movimentando ele para cima.

Embora a amplitude seja muito pequena, podendo ser desprezível, o deslocamento na direção z nos informa que o projétil colide com a parte interna do tubo tanto na região negativa, em aproximadamente 2 ms, quanto que na positiva, nos pontos de picos, conforme apresentado na Fig. 15.

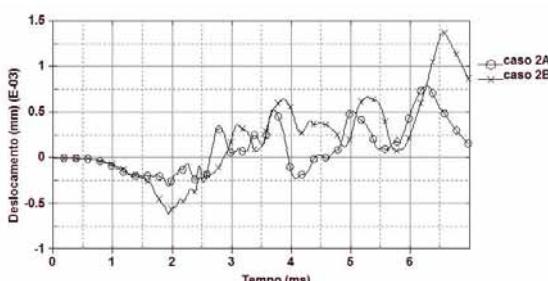


Fig. 15 - Deslocamento do C.M do projétil na direção Z.

As Figs. 16 e 17 apresentam como os ângulos de arfagem

e deriva variam até sair do tubo. Eles são importantes para verificação da posição do projétil ao sair do tubo.

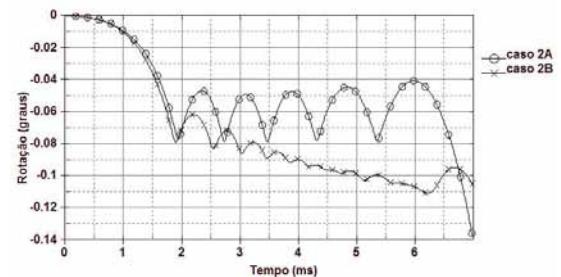


Fig. 16 - Rotação do projétil na direção Z.

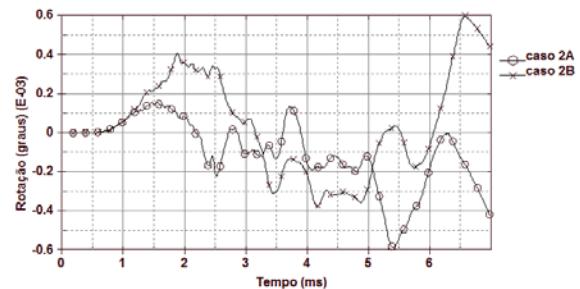


Fig. 17 - Rotação do projétil na direção Y.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho se dedica a dinâmica da iteração tubo-projétil, investigando os efeitos da flexibilidade do tubo da arma; o deslocamento da boca do tubo e o deslocamento do centro de massa do projétil.

Os resultados indicam que a flexibilidade do tubo aumenta a frequência do batimento, porém diminui a amplitude do deslocamento do centro de massa do projétil, bem como sua rotação. O tubo flexível dissipava a energia do choque entre o projétil e o tubo, atuando como um amortecedor do movimento do projétil.

O deslocamento da boca do tubo interfere na condição de lançamento do projétil, sendo relevante para o início da balística externa. Portanto, o batimento e o deslocamento da boca do tubo estão associados à precisão e à acurácia do tiro.

O desbalanceamento de massa do projétil na direção vertical provocou um aumento na frequência de batimento, promovendo um movimento vertical predominante, sendo desprezíveis os movimentos laterais. Ademais, o desbalanceamento de massa resultou ainda na diminuição do ângulo de guinada. O aumento da frequência de batimento pode provocar deslocamentos significativos na boca do tubo que podem causar alterações da trajetória próxima à boca do tubo.

Conclui-se finalmente que a simulação numérica da iteração tubo-projétil é uma ferramenta relevante para a compreensão dos fenômenos da iteração tubo-projétil durante a balística interna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carlucci D. E., Jacobson S. S. Ballistics: theory and design of guns and ammunition, Taylor & Francis Group, LLC, ISBN-13: 978-1-4200-6618-0, 2008. 501 p.
- [2] Farrar C.L., Leeming D. W. Military Ballistics - A basic manual, Pergamon Press Inc., 1983.
- [3] Sneck Henry J. Main battle tank flexible gun tube disturbance model: three-segment model, US Army Armament Research Development and Engineering Center, 2002, 22p.
- [4] Ansari K. A., Bauch J. W. Jr. Dynamics of a balloting projectile in a moving gun tube, US Army Ballistic Research Laboratory, AMSRL-WT-PD, Aberdeen Providing Ground, MD 21005-5066, 1988, 91 p.
- [5] Eches N. Modelling of the dynamics of a 40 mm gun and ammunition system during firing, 7th European LS-DYNA Conference, 2009, 14 p.
- [6] Wilkerson S. A., Hopkins, D. A. Analysis of a Balanced Breech System for the M1A1 Main Gun System Using Finite Element Techniques, Army Research Laboratory, AMSRL-WT-PD, Aberdeen Providing Ground, MD 21005-5066, 1994, 35 p.
- [7] Rabern, D. A. Axially accelerated saboted rods subjected to lateral forces, Thesis PhD Degree, The University of Arizona, 1988.
- [8] Leite T. M. Jr Modelagem da dinâmica de um canhão de carro de combate durante o tiro, Dissertação de Mestrado, INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 2015.
- [9] Soenksen K. P., Newill J. F., Garner J. M., And Plostins P. Comparison of the 120-mm M831A1 projectiles experimental launch dynamic data with hydrocode gun-projectile dynamic simulations, 10th U.S. Army Gun Dynamics Symposium, April 23-26, 2001, Austin, Texas, p. 200-212.
- [10] Hasenbein R., Hyland E. Dynamic Strain Waves and Permanent Bore Enlargement, Proceedings of the seventh U.S. army symposium on gun dynamics, NEWPORT, RHODE ISLAND, 1993, 504 p.
- [11] Langlet, A. Chevalier O. Sanseigner L. F., Mecanique et Interactions en Dynamique Rapide Sous Chargements Variables . Assessment of the Lifetime of Gun Barrels Under High-Speed Moving Loads, Sciences de l'ingenieur [physics]. UNIVERSITE D'ORLEANS, 2015
- [12] Bathe K.J. Finite Element Procedures, Prentice-Hall, 1996.
- [13] Kim Nam-Ho, Introduction to nonlinear finite element analysis, Springer, 2015.
- [14] LS-DYNA®, Livermore Software Technology Corporation, Theory manual, 2014.
- [15] LS-DYNA®, Livermore Software Technology Corporation, Keyword user's manual, vo.1, 2014.
- [16] LS-DYNA®, Livermore Software Technology Corporation, Keyword user's manual, vo.2, 2014.
- [17] Newill J.F., Guidos B. J., And Livecchia, comparison between the M256 120-mm tank cannon jump test experiments and ARL's gun dynamics simulation codes for prototype KE, , 10th U.S. Army Gun Dynamics Symposium, April 23-26, 2001, Austin, Texas, p. 160-175.
- [18] Chen, M.M. Projectile balloting attributable to gun tube curvature, Shock and Vibration 17, 2010, 39-53.
- [19] United States Army, Elements of Armament Engineering, Part Two, Ballistics, Army Materiel Command Engineering Design

Comparativo de desempenho de algoritmos de localização de emissores de RF baseados apenas em medidas de marcação

Edilson C dos Santos, José A. Apolinário Jr. e José C A dos Santos

Instituto Militar de Engenharia (IME)
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270,
Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RESUMO: Neste artigo o problema de localização de alvos baseados apenas em marcações é investigado para o caso no qual se presume que as posições dos observadores são conhecidas, exatamente ou sujeitas a erros de posicionamento. Os desempenhos dos algoritmos de localização de emissores eletromagnéticos são comparados em alguns cenários táticos navais. Com o intuito de estimar a posição do alvo, são utilizadas apenas as medidas de ângulo de chegada, ou marcação, do sinal transmitido do alvo para o observador. Presume-se que não apenas as medidas de marcação são corrompidas por ruído mas também a posição exata do observador pode não ser conhecida, os erros de posicionamento sendo modelados como ruído aditivo branco. As simulações, com a finalidade de estimar a posição de um alvo fixo no mar, são realizadas com a utilização dos algoritmos Mínimos Quadrados (Least Squares - LS), Mínimos Quadrados Total (Total Least Squares - TLS), Transformada de Hough Generalizada (Generalized Hough Transform - GHT), Filtro de Kalman Sem Rasto (Unscented Kalman Filter - UKF) e Minimax. Considera-se que as medidas de ângulos de chegada são feitas por aeronaves tripuladas ou não tripuladas em missões de patrulha. Adicionalmente, este artigo apresenta uma interpretação geométrica para alguns desses algoritmos.

PALAVRAS-CHAVE: Localização de emissores. Ângulos de chegada. Least squares. Generalized Hough Transform. Filtro de Kalman.

ABSTRACT: In this paper the problem of bearing-only target localization is investigated for the case where observer positions are assumed known, exactly or subject to positioning errors. The performances of electromagnetic emitter location algorithms are compared in a few given specific naval tactical scenarios. In order to estimate the target position, only angle of arrival measurements, or bearings, of the transmitted signal from the target to the observers, are used. It is assumed that not only bearing measurements are corrupted by noise but also that the exact position of the observer may not be known, with positioning errors being modeled as additive white noise. The simulations, with the purpose of estimating the position of a fixed target at sea, are carried out using algorithms Least Squares (LS), Total Least Squares (TLS), Generalized Hough Transform (GHT), Unscented Kalman Filter (UKF) and Minimax. Angle of arrival measurements are assumedly obtained by manned or unmanned aircrafts on patrol missions. Additionally, this paper presents a geometric interpretation for some of the algorithms.

KEYWORDS: Target location. Angle of arrival. Least squares. Generalized Hough Transform. Kalman Filter.

1. INTRODUÇÃO

A localização de fontes de RF é de extrema importância em aplicações tanto civis quanto militares, como por exemplo, em comunicações, guerra eletrônica, vigilância, localização e supressão de interferências. Devido ao interesse cada vez maior dos pesquisadores por esta área, há diversos trabalhos na literatura sobre este tema [1].

Com o auxílio do método de triangulação, a estimativa da localização de alvos é obtida pelo ponto de intersecção das linhas de marcação medidas pelo observador em diferentes posições. Na ausência de erros nas medidas, a intersecção das linhas ocorre em um único ponto; na presença de erros nas medidas de marcação e posição do observador, uma solução ótima para a triangulação é obtida através de métodos estatísticos [2].

Uma grande parte dos trabalhos científicos presentes na literatura é baseada na assunção de que a posição exata do observador está disponível, como em um dos primeiros trabalhos realizados para a localização de alvos em [3], onde o autor apresentou o estimador weighted least squares (WLS). Em [4] foi proposto o algoritmo total least squares (TLS). Os estimadores maximum likelihood (ML), least squares e weighted least squares foram comparados em [5]. Uma publicação onde o filtro de Kalman é utilizado com o propósito de localizar alvos está em [6]. Outro algoritmo de localização de emissores foi apresentado em [7]-[10], o qual é baseado na transformada de Hough e permite que tipos diferentes de dados, tais como, ângulo de chegada, diferença do tempo de chegada e diferença da frequência de chegada, possam

ser fundidos, melhorando a precisão da localização do alvo. Uma análise da acurácia na localização de um radiotransmissor em um ambiente urbano foi proposto em [11]. Há estudos que levam em consideração as incertezas na posição do observador, como em [2] onde os algoritmos TLS e ML tiveram seus desempenhos comparados. Erros na posição do observador foram também levados em consideração na comparação dos algoritmos ML, LS, TLS e weighted total least squares (WTLS) em [12].

Neste trabalho, os desempenhos dos algoritmos Mínimos Quadrados (Least Squares - LS), Mínimos Quadrados Total (Total Least Squares - TLS), do algoritmo baseado na Transformada de Hough Generalizada (Generalized Hough Transform - GHT), Filtro de Kalman Sem Rasto (Unscented Kalman Filter - UKF) e do algoritmo aqui designado Minimax são analisados. Estes algoritmos utilizam as medidas de marcação do sinal transmitido do alvo para o observador para estimar a posição do alvo. Esses parâmetros foram escolhidos porque os equipamentos de guerra eletrônica utilizados na Marinha do Brasil, como o equipamento MAGE (Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica), fornecem tais medidas. Os cenários consistem de um alvo fixo no mar; as medidas de marcação são feitas por navios ou aeronaves tripuladas ou não. É assumido que as medidas de marcação do alvo e da posição do observador são corrompidas com ruído. Adicionalmente, este trabalho apresenta uma interpretação geométrica para alguns destes algoritmos, assim como uma nova função custo para o algoritmo LS que não necessita de nenhum tipo de aproximação para encontrar sua expressão final.

2. GEOMETRIA DO PROBLEMA

A geometria de localização do alvo em duas dimensões é apresentada na Fig. 1. Assume-se neste trabalho que apenas medidas de marcação são utilizadas na localização de um alvo. Seja $a = [a_x, a_y]^T$ as coordenadas a serem estimadas do alvo estacionário. O observador coleta as medidas de marcação em L pontos distintos, cujas coordenadas são representadas por $p_i = [p_{x_i}, p_{y_i}]^T$.

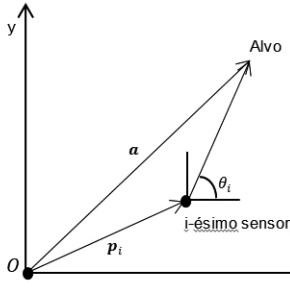


Fig. 1: Geometria da localização de alvos em duas dimensões.

A relação entre o ângulo de marcação, a posição do alvo e as posições do observador na ausência de ruído é dada pela equação não linear a seguir:

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{a_y - p_{y_i}}{a_x - p_{x_i}} \right) \quad (1)$$

É assumido neste trabalho que as medidas de marcação possuem erros modelados por ruído aditivo

$$\tilde{\theta}_i = \theta_i + n_i, \quad n_i \sim N(0, \sigma_i^2) \quad (2)$$

onde n_i é uma variável aleatória Gaussiana com média zero e variância σ_i^2 .

Assume-se que as medidas das posições do observador também estão sujeitas a ruído:

$$p_i = p_i^* + n_i, \quad n_i \sim N(0, C) \quad (3)$$

onde C é matriz de covariância e os erros nas coordenadas x e y são independentes.

3. ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO

Nesta seção, são apresentados algoritmos que utilizam somente medidas de marcação para localizar emissores.

3.1 Algoritmo LS

Também conhecido como estimador de Stansfield [3], este algoritmo minimiza uma função objetivo que é a soma dos quadrados das distâncias entre um ponto no plano e as retas representativas das marcações medidas pelo observador. Nas referências [2] e [5], a função custo deste algoritmo é apresentada como soma dos quadrados dos erros das medidas dos ângulos de marcação, que requer uma aproximação do tipo $\tilde{\theta}_i - \theta_i \approx \sin(\tilde{\theta}_i - \theta_i)$. A interpretação geométrica proposta em [13] é precisa por não necessitar de tal aproximação. A Fig. 2. ilustra o cenário onde medidas de marcação são realizadas.

O módulo da distância entre a localização a ser estimada e cada reta representando uma dada marcação pode ser ex-

pressa por:

$$|d_i| = \frac{|(a - p_i) \times u_i|}{|u_i|}$$

onde $u_i = [\cos\theta_i, \sin\theta_i]^T$ é um vetor unitário na reta r_i , ou seja, $|u_i| = 1$. O vetor $a = [a_x, a_y]^T$ possui as coordenadas a serem estimadas do alvo estacionário, $p_i = [p_{x_i}, p_{y_i}]^T$ é um vetor com as coordenadas do observador em $i = 1, 2, \dots, L$ pontos distintos “x” e indica produto vetorial. Sendo assim, tem-se:

$$\begin{aligned} |d_i| &= |(a - p_i) \sin\theta_i - (a_y - p_{y_i}) \cos\theta_i| \\ d_i &= (a_x - p_{x_i}) \sin\theta_i - (a_y - p_{y_i}) \cos\theta_i \\ d_i &= [(a_x - p_{x_i}), (a_y - p_{y_i})] [\sin\theta_i, -\cos\theta_i]^T \end{aligned}$$

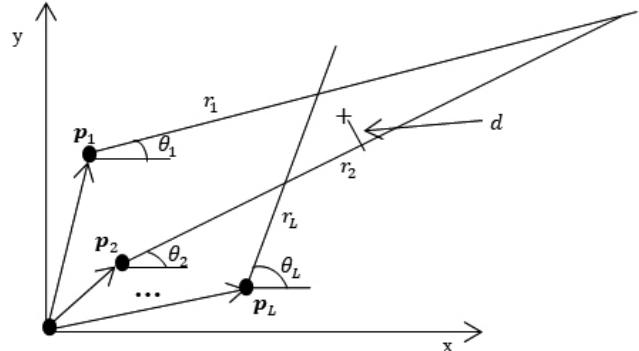


Figura 2: Localização do emissor utilizando medidas de marcação.

Considerando que $\bar{u}_i = [\sin\theta_i, -\cos\theta_i]^T$, tem-se:

$$\begin{aligned} d_i &= (a - p_i)^T \bar{u}_i \\ d_i &= \bar{u}_i^T (a - p_i) \end{aligned}$$

Logo, o vetor distância $[d_1, d_2, \dots, d_L]^T$ é dado por:

$$d = \bar{u}a - \bar{p}^T \quad (5)$$

sendo que,

$$\bar{U} = [\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_L] \text{ e } \bar{p} = [\bar{u}_1^T p_1, \bar{u}_2^T p_2, \dots, \bar{u}_L^T p_L]$$

A função objetivo “ ζ ”, ou custo, de acordo com [13] é representada pela soma dos quadrados das distâncias entre o ponto a ser estimado e as retas que representam as marcações medidas pelo observador, sendo dada pela equação:

$$\zeta = \sum_{i=1}^L d_i^2 = \|d\|^2 \quad (6)$$

Considerando a Equação (6), tem-se que:

$$\zeta = d^T d = (\bar{U}a - \bar{p})^T (\bar{U}a - \bar{p})$$

Em seguida, calculando o gradiente da função custo em relação ao vetor a e igualando o resultado ao vetor nulo, $\nabla_a \zeta = 0$, encontra-se a solução LS:

$$\hat{a}_{LS} = (\bar{U}^T \bar{U})^{-1} \bar{U}^T \bar{p} \quad (7)$$

3.2 ALGORITMO TLS

Em [4], o algoritmo TLS foi proposto com o objetivo de estimar a posição de emissores eletromagnéticos. Ele teve seu desempenho comparado ao ML em [2], inclusive levando-se em consideração os erros nas posições dos observadores. Como também, erros nas posições dos observadores

foram considerados na comparação dos algoritmos ML, LS, TLS e WTLS em [12]. O TLS realizou a localização de emissores utilizando medidas de TDOA em [14].

De acordo com [15], o TLS considera que os erros das medidas de marcação, assim como, da posição do observador afetam a matriz A e o vetor b apresentados abaixo. A solução TLS para o problema de localização do emissor é dada por:

$$\hat{a}_{TLS} = (A^T A - \sigma_s^2 I)^{-1} A^T b \quad (8)$$

onde σ_s^2 é o menor valor singular da matriz $[A, b]$

$$A = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 \\ \vdots & \vdots \\ \sin\theta_L & -\cos\theta_L \end{bmatrix} \text{ e } b = \begin{bmatrix} p_{x_1}\sin\theta_1 - p_{y_1}\cos\theta_1 \\ \vdots \\ p_{x_L}\sin\theta_L - p_{y_L}\cos\theta_L \end{bmatrix}.$$

3.3 ALGORITMO GHT

A estimativa da posição do emissor pode ser obtida através de um algoritmo baseado na transformada de Hough [16]. A GHT é uma transformação matemática que mapeia pontos do espaço de características (*Feature Space* - FS), ou entrada, em curvas no espaço de parâmetros (*Parameter Space* - PS). O algoritmo calcula a posição estimada realizando os seguintes passos [7]-[10]:

- 1) Cria-se uma tabela fixa, ou grade, com os parâmetros (x,y) que precisam ser estimados.
- 2) Em cada ponto da tabela a probabilidade condicional é avaliada, $p(x,y|\beta_l)$, dada a medida β_l . O resultado é acumulado na matriz A:

$$A(x,y) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L p(x,y|\beta_l)$$

onde β_l é a l-ésima medida de um total de L.

- 3) A estimativa é tomada como a posição da tabela correspondente ao pico da probabilidade acumulada. A aplicação deste algoritmo com medidas de ângulos de chegada, e assumindo que os erros nas medidas dos mesmos são Gaussianos, a matriz acumulada é dada por:

$$A(x,y) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{e^{-\frac{-(\theta_{c_l}-\theta_l)^2}{\sigma_{\theta_l}^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\theta_l}} \quad (9)$$

onde θ_i é ângulo medido pelo i-ésimo receptor, $\theta_{c_i} = \tan^{-1}\left(\frac{y-y_i}{x-x_i}\right)$ é o ângulo calculado pelo i-ésimo receptor no ponto (x_i, y_i) ao ponto (x, y) e σ_{θ_l} é o desvio padrão dos erros das medidas dos ângulos para cada receptor.

O espaço de busca é dividido em uma grade regular e (x,y) é restrito a estar em um destes pontos; a probabilidade condicional é avaliada em cada um destes pontos da grade.

3.4 ALGORITMO MINIMAX

Em [13] foi apresentado o algoritmo que estima a posição do alvo minimizando-se as distâncias máximas entre os possíveis pontos de localização do alvo e as retas que representam as marcações medidas pelo observador, desta forma, é encontrada a solução minimax. Uma abordagem mais aprofundada sobre a solução minimax pode ser encontrada em

[17]-[21]. Para o desenvolvimento deste algoritmo, utiliza-se a rotina “fminimax” do software MATLAB®.

Uma interpretação geométrica para este algoritmo pode ser obtida para o caso em que três medidas de marcação estão disponíveis. A posição do alvo estimada, neste caso, é o incentro do triângulo formado pelas três medidas. O incentro é o ponto em que as três bissetrizes do triângulo se cruzam, e fica à mesma distância de todos os lados do mesmo, conforme representado na Fig. 3.

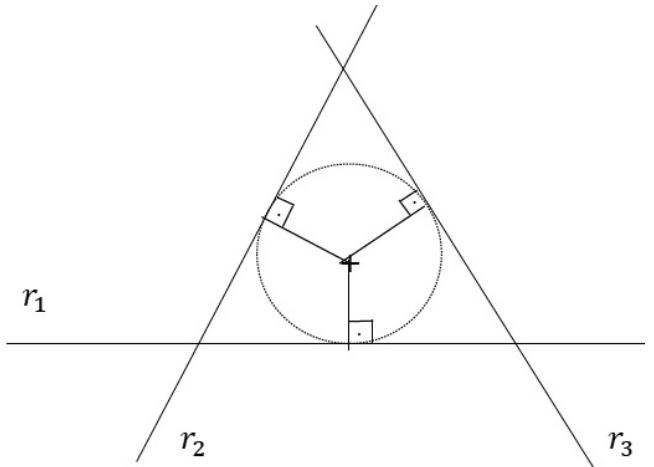


Fig. 3: Interpretação geométrica para o algoritmo Minimax.

3.5 ALGORITMO UKF

A localização do emissor pode ser estimada também através de um algoritmo recursivo como o UKF, que foi primeiro proposto por [22]. Este algoritmo de estimativa de estado foi projetado para aplicações não lineares. A ideia básica dele consiste em gerar um número fixo de pontos de teste, ou pontos sigma, de tal modo que a sua distribuição tenha média e covariância iguais à estimativa do estado atual. Em seguida, estes pontos são propagados através da função não linear e uma nova média e covariância são calculadas deste conjunto de pontos transformados [23].

Para o caso onde o ruído do processo e das medidas são aditivos, tem-se:

$$\begin{aligned} X_k &= f(x_{k-1}) + q_{k-1} \\ Z_k &= h(x_k) + r_k \end{aligned} \quad (10)$$

onde $X_k = [x_k \ y_k]^T \in \mathbb{R}^2$ é o vetor de estado representando as coordenadas do emissor, $Z_k \in \mathbb{R}^L$ é o vetor de medidas, $q_{k-1} \sim N(0, Q_{k-1})$ é o vetor ruído do processo e $r_k \sim N(0, R_k)$ é o vetor ruído das medidas. O algoritmo calcula a posição estimada conforme descrito a seguir.

No tempo k, gera-se $2n+1$ pontos sigma, n é dimensão do vetor de estado, usando as estimativas *a priori* do vetor de estado, $\hat{X}_0 = E(X_0) = m$, e da matriz de covariância do erro de estimativa, $\hat{P}_0 = E((X_0 - \hat{X}_0)(X_0 - \hat{X}_0)^T)$. Cada ponto sigma possui a mesma dimensão do vetor de estado e um peso associado.

$$X^{(0)} = \overline{m} \quad (11)$$

$$\hat{X}^{(i)} = m + [\sqrt{(n+\lambda)P}]_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (12)$$

$$\hat{X}^{(i)} = m - [\sqrt{(n+\lambda)P}]_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (13)$$

O subscrito no lado direito indica a -ésima coluna da raiz quadrada da matriz. Os pesos associados aos pontos são:

$$W_m^{(0)} = \frac{\lambda}{n + \lambda} \quad (14)$$

$$W_m^{(i)} = \frac{1}{2(n + \lambda)}, \quad i = 1, \dots, 2n \quad (15)$$

$$W_c^{(0)} = \frac{\lambda}{n + \lambda} + 1 - \alpha^2 + \beta \quad (16)$$

$$W_c^{(i)} = \frac{1}{2(n + \lambda)}, \quad i = 1, \dots, 2n \quad (17)$$

onde $\lambda = \alpha^2(n + \kappa) - n$ é um parâmetro de escala, $\alpha = 10^{-3}$, que determina o espalhamento dos pontos sigma ao redor de m , $k = 0$ é um parâmetro de escala secundário e β é utilizado para incorporar o conhecimento a priori da distribuição de x , $\beta = 2$ para distribuição Gaussiana.

No tempo $k + 1$, calcula-se a média e covariância preditivas a partir de:

$$\hat{X}(k + 1|k) = \sum_{i=0}^{2n} W_m^{(i)} X^{(i)} \quad (18)$$

$$P(k + 1|k) = \sum_{i=0}^{2n} W_c^{(i)} [X^{(i)} - \hat{X}] [X^{(i)} - \hat{X}]^T + Q \quad (19)$$

Nota-se que, como a posição do alvo (estado) é estacionária, tem-se $\hat{X}(k+1|k)=\hat{X}(k)$.

Em seguida, propaga-se cada ponto sigma através da função das medidas não lineares e calcula-se a média \hat{z} e covariância das medidas s e a covariância cruzada Σ_{xz} entre x e z :

$$Z^{(i)} = h(X^{(i)}) \quad (20)$$

$$\hat{Z}(k + 1|k) = \sum_{i=0}^{2n} W_m^{(i)} Z^{(i)} \quad (21)$$

$$S = \sum_{i=0}^{2n} W_c^{(i)} [Z^{(i)} - \hat{Z}] [Z^{(i)} - \hat{Z}]^T + R \quad (22)$$

$$\Sigma_{xz} = \sum_{i=0}^{2n} W_c^{(i)} [X^{(i)} - \hat{X}] [Z^{(i)} - \hat{Z}]^T \quad (23)$$

Deve-se notar que, para o problema de localização de emissores através de medidas de marcação, a função das medidas é dada por:

$$h(X^{(i)}) = \tan^{-1} \left(\frac{y^{(i)} - y_j}{x^{(i)} - x_j} \right) \quad (24)$$

onde (x_j, y_j) são as coordenadas do receptor durante a j-ésima medida de marcação e $h(X^{(i)}) = (x^{(i)}, y^{(i)})$ é o i-ésimo ponto sigma.

Finalmente, depois de recebido o vetor de medidas de marcação no tempo $k + 1$, atualiza-se a média e covariância do estado como a seguir:

$$v_{k+1} = Z(k + 1) - \hat{Z}(k + 1|k) \quad (25)$$

$$K_{k+1} = \Sigma_{xz} S^{-1} \quad (26)$$

$$\hat{X}(k + 1|k + 1) = \hat{X}(k + 1|k) + K_{k+1} v_{k+1} \quad (27)$$

$$P(k + 1|k + 1) = P(k + 1|k) - K_{k+1} S K_{k+1}^T \quad (28)$$

4. RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

Com o intuito de avaliar o desempenho dos algoritmos, realizou-se simulações em quatro cenários comuns a todos os algoritmos:

Cenário 1: Dois receptores móveis e um emissor fixo;

Cenário 2: Um receptor móvel e um emissor fixo;

Cenário 3: Posições dos receptores mais espaçadas entre si; e

Cenário 4: Dois receptores móveis e um emissor móvel.

Nos cenários são consideradas distâncias máximas entre o alvo e o observador de até 100 km. Os observadores/receptores estão localizados em plataformas áreas se movendo a 400 m/s e são capazes de medir as marcações de um alvo no mar a cada segundo.

4.1 Cenário 1: Dois receptores móveis e um emissor fixo

No cenário apresentado na Fig. 4, duas plataformas aéreas estão se movendo: o receptor/plataforma 1 segue no sentido norte e o receptor/plataforma 2 segue no sentido leste. Elas são capazes de medir as marcações de um alvo estacionário no mar na posição (40 km; 70 km). Considera-se inicialmente que as posições exatas das aeronaves são conhecidas e que cada uma delas obteve 10 medidas de marcação e o desvio padrão dos erros das medidas é 0,02 radiano (rd). Para a inicialização do UKF foi utilizado $\hat{X}_0 = (45; 75)$ km e $\hat{P}_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$ km².

A Tab. 1 apresenta a média aritmética dos erros RMS (do inglês *Root Mean Square Error*) das estimativas da posição do alvo e das posições estimadas para 1000 rodadas independentes, em quilômetros. O erro RMS da i-ésima rodada é calculado da seguinte forma:

$$\text{RMSE}_i = \sqrt{\frac{(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2}{2}} \quad (29)$$

onde (\hat{x}, \hat{y}) é a posição estimada e (x, y) é a posição verdadeira

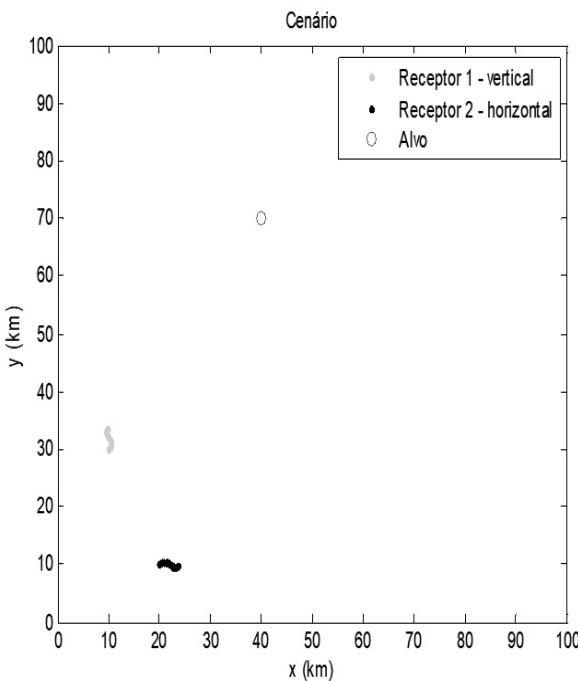


Fig. 4: Cenário para localização de um alvo com medidas de marcação.

Tab. 1: Média dos erros RMS e das posições estimadas para 1000 simulações

	Erro RMS (km)	Posição Estimada (km, km)
TLS	0,8200	(39,9806; 68,8405)
UKF	0,8458	(40,1530; 68,8137)
LS	0,8513	(39,7970; 68,8133)
Minimax	2,3388	(39,7067; 66,7055)
GHT	2,8726	(40,0670; 65,9381)

O algoritmo TLS apresentou um resultado mais preciso que os outros quatro. O algoritmo UKF, por sua vez, apresentou um desempenho superior em relação aos algoritmos LS, Minimax e GHT; os algoritmos Minimax e GHT apresentaram resultados muito próximos, porém com uma pequena vantagem para o Minimax. No entanto, os algoritmos TLS, UKF e LS são comparáveis em termos de resultados, pois os erros de estimativas deles estão muito próximos e na prática o comprimento dos alvos como navios por exemplo, que muitas vezes são maiores que 100 m, é muito maior que a diferença apresentada pelo erro RMS dos mesmos.

Deve ser notado que a precisão da posição estimada pelo UKF é influenciada pela posição inicial. Se a estimativa inicial da posição do alvo for ruim, a posição estimada pelo UKF não será precisa, conforme pode ser observado na Tab. 2.

Tab 2: Erro RMS das estimativas do UKF - 1000 simulações

\hat{X}_0 (km)	Erro RMS (km)
(40,5; 70,5)	0,7668
(41; 71)	0,7774
(42; 72)	0,7933
(43; 73)	0,7790
(50; 80)	0,8746
(20; 20)	16,8306
(0; 0)	98,4547

A Fig. 5 apresenta as estimativas da posição do alvo obtidas pelo algoritmo TLS para 50 simulações. De maneira

semelhante, da Fig. 6 à Fig. 9 estão representadas as estimativas dos algoritmos UKF, LS, Minimax e GHT, respectivamente.

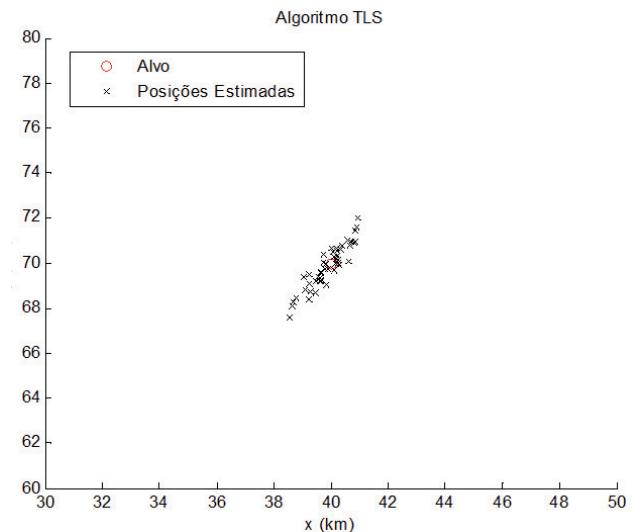


Fig. 5: Estimativas obtidas pelo algoritmo TLS para 50 simulações.

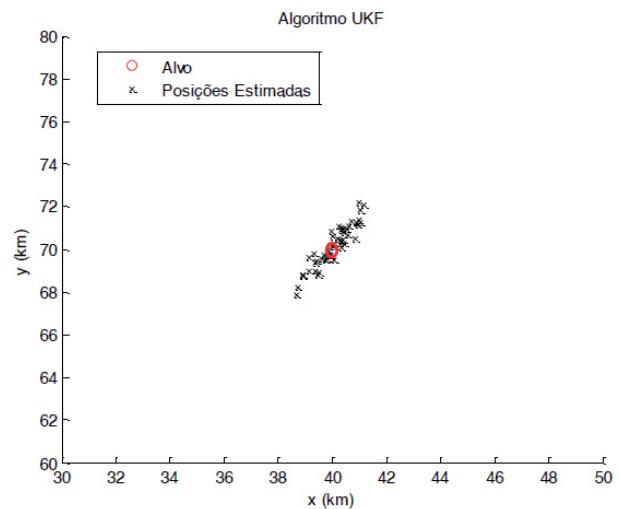


Fig 6: Estimativas obtidas pelo algoritmo UKF para 50 simulações.

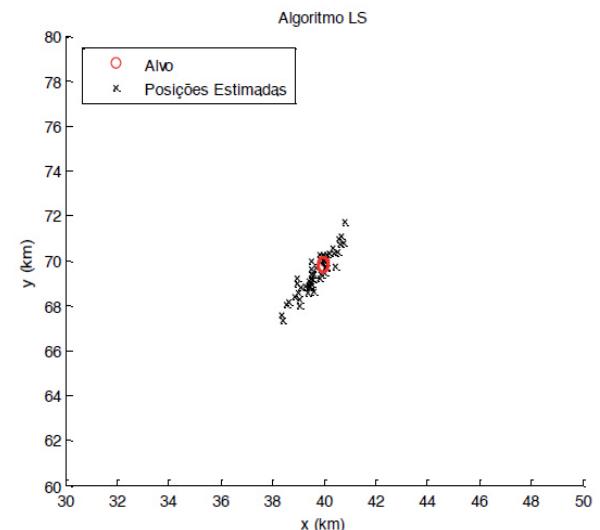


Fig 7: Estimativas obtidas pelo algoritmo LS para 50 simulações.

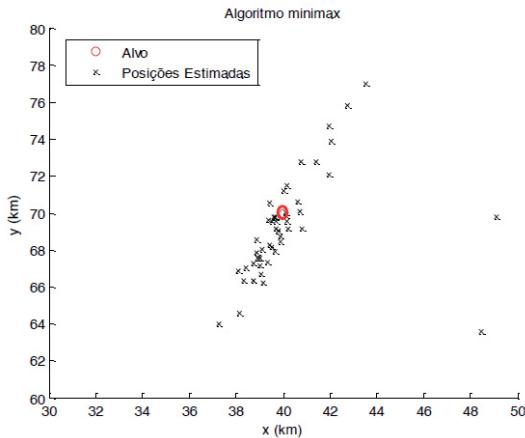


Fig 8: Estimativas obtidas pelo Minimax para 50 simulações.

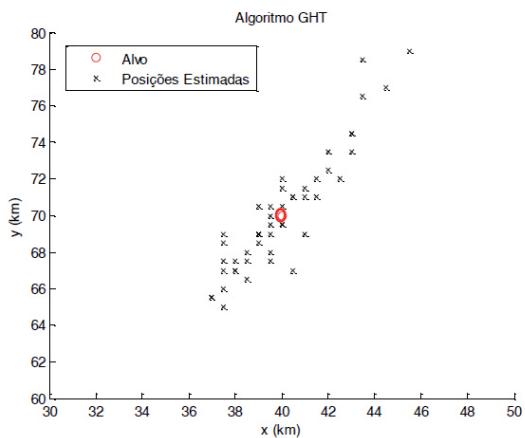


Fig 9: Estimativas obtidas pelo algoritmo GHT para 50 simulações.

Na Fig. 10, compara-se o RMSE (*Root Mean Square Error*) dos algoritmos propostos em função do ruído na posição do observador. As mesmas condições são mantidas, ou seja, um total de 20 medidas de marcação são utilizadas e o desvio padrão dos erros das medidas é 0,02 rd. Para a inicialização do UKF foi utilizado km e km^2 . Observa-se que o RMSE de todos os algoritmos aumentou quando o ruído na posição do observador é incrementado, degradando o desempenho dos mesmos. O TLS apresentou um melhor desempenho em relação aos demais algoritmos, sendo seguido pelos algoritmos UKF e LS que apresentaram resultados semelhantes até um erro de posição de 0,4 km, a partir deste ponto o algoritmo LS superou o UKF. Em seguida, aparece o Minimax que tem um desempenho superior em relação ao GHT.

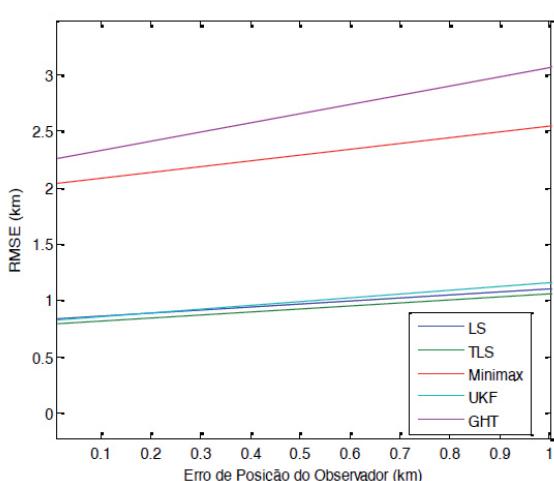


Fig 10: Variação do RMSE em função da incerteza na posição do observador.

Incertezas ainda maiores na posição do observador foram utilizadas e a variação do RMSE dos algoritmos em função do ruído na posição do observador está na Fig. 11. Contudo, sendo as posições obtidas por meio de GPS, os valores de erro nas mesmas não seriam tão elevados em aplicações reais, sendo da ordem de 5 a 15 metros, ou até menos. O algoritmo LS superou o algoritmo TLS a partir do erro de posição de 1,5 km, apresentando um melhor desempenho em relação aos demais. O Minimax foi superior ao UKF a partir do erro de posição de 3,5 km e o GHT apresentou um pior resultado em relação aos algoritmos testados. Na figura é possível observar que o formato das curvas dos algoritmos TLS e UKF são bastante semelhantes, com mudanças de inclinações em pontos próximos.

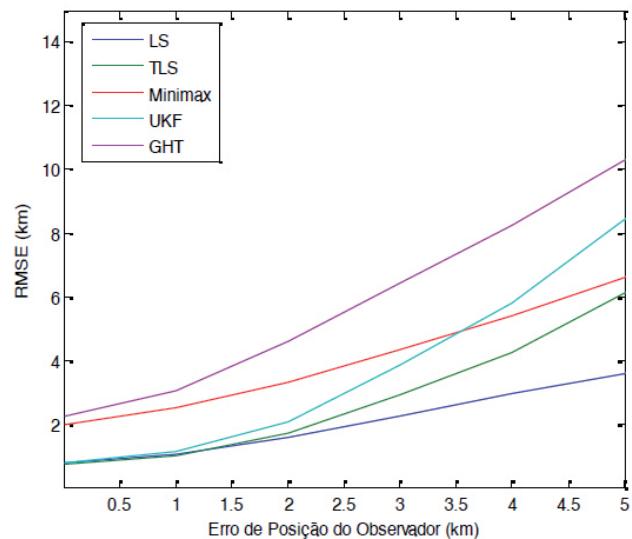


Fig 11: Incremento da incerteza na posição do observador.

4.2 Cenário 2: Um receptor móvel e um emissor fixo

No cenário apresentado na Fig. 12, apenas uma plataforma aérea está se movendo seguindo no sentido norte. Ela faz medidas das marcações de um alvo estacionário no mar na posição (40 km; 70 km). Considera-se que as posições exatas da aeronave são conhecidas e que ela obteve 20 medidas de marcação e o desvio padrão dos erros das medidas é 0,02 rd. Para a inicialização do UKF foi utilizado

$$\hat{\mathbf{X}}_0 = (45; 75) \text{ km} \text{ e } \hat{\mathbf{P}}_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \text{ km}^2, \text{ como no cenário anterior.}$$

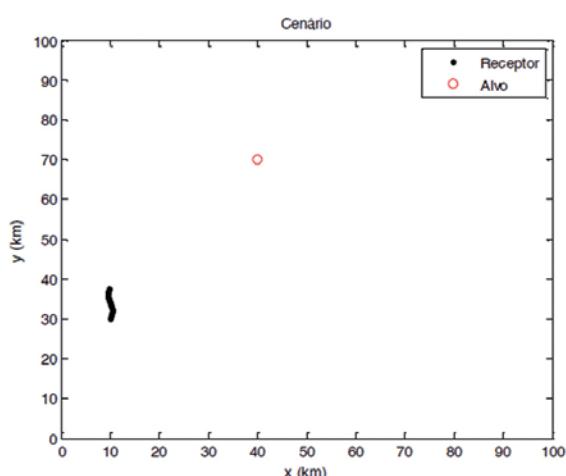


Fig 12: Cenário com apenas um receptor móvel e um emissor fixo.

A Tab. 3 apresenta a média aritmética dos erros RMS das estimativas da posição do alvo e das posições estimadas para 1000 rodadas independentes, em quilômetros. Os resultados apresentados são menos precisos em relação ao cenário anterior. Isso se deve ao fato de todas as medidas de marcação estarem muito próximas, causando uma área de incerteza maior quando da realização da triangulação com as medidas de marcação do alvo. O algoritmo UKF apresentou um resultado mais preciso que os outros quatro. O algoritmo TLS, por sua vez, apresentou um desempenho superior em relação aos algoritmos LS, Minimax e GHT; os algoritmos Minimax e GHT apresentaram resultados muito próximos, porém com uma pequena vantagem para o Minimax.

Tab 3: Média dos erros RMS e das posições estimadas para 1000 simulações

	Erro RMS (km)	Posição Estimada (km, km)
TLS	4,2794	(37,1349; 64,6692)
UKF	3,4680	(42,5789; 65,8283)
LS	7,3361	(33,4554; 61,9498)
Minimax	11,6097	(30,6525; 56,5021)
GHT	11,6166	(43,4660; 53,9414)

A Fig. 13 apresenta as estimativas da posição do alvo obtidas pelo algoritmo UKF para 50 simulações. De maneira semelhante, da Fig. 14 à Fig. 17 estão representadas as estimativas dos algoritmos TLS, LS, Minimax e GHT, respectivamente.

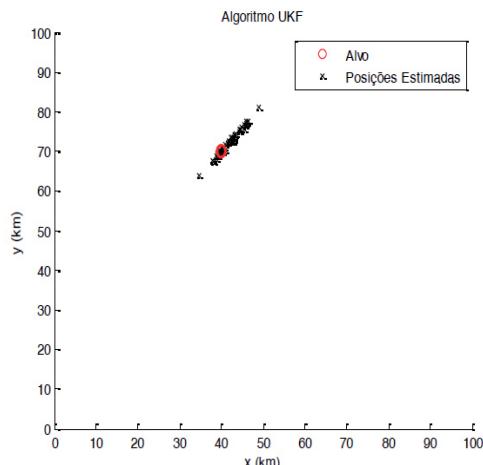


Fig 13: Estimativas obtidas pelo algoritmo UKF para 50 simulações.

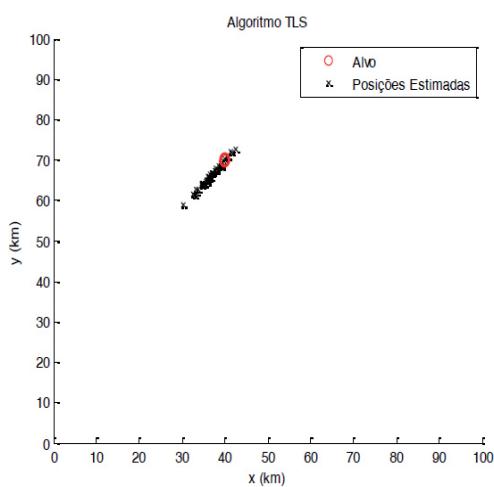


Fig 14: Estimativas obtidas pelo algoritmo TLS para 50 simulações.

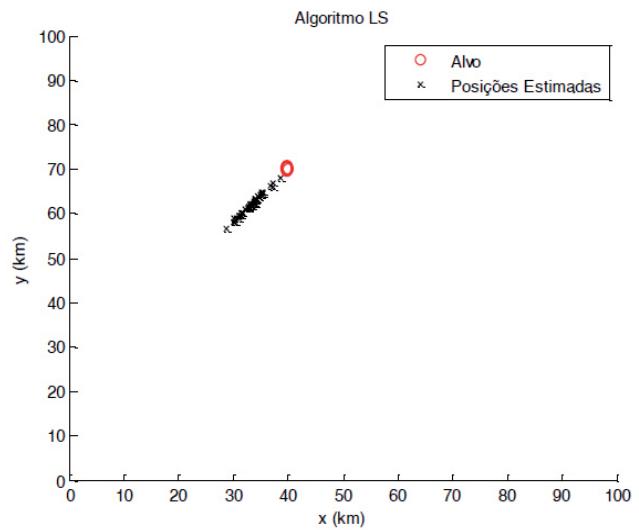


Fig 15: Estimativas obtidas pelo algoritmo LS para 50 simulações.

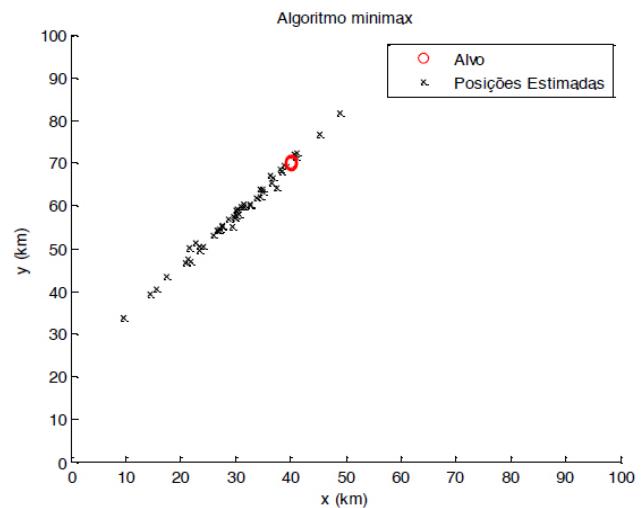


Fig 16: Estimativas obtidas pelo minimax para 50 simulações.

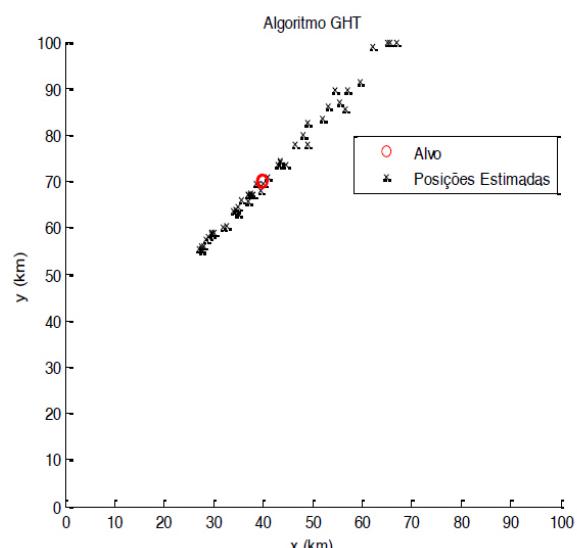


Fig 17: Estimativas obtidas pelo algoritmo GHT para 50 simulações.

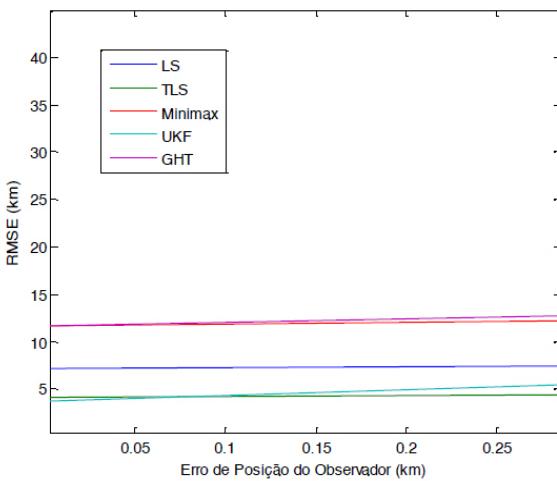


Fig 18: Variação do RMSE em função da incerteza na posição do observador.

Na Fig. 18, compara-se o RMSE dos algoritmos propostos em função do ruído na posição do observador. As mesmas condições iniciais foram mantidas, ou seja, um total de 20 medidas de marcação são utilizadas e o desvio padrão dos erros das medidas é 0,02 rd. Para a inicialização do UKF foi utilizado $\hat{X}_0 = (45; 75) \text{ km}$ e $\hat{P}_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \text{ km}^2$. Observa-se que o RMSE de todos os algoritmos aumentou quando o ruído na posição do observador é incrementada, degradando o desempenho dos mesmos. O UKF apresentou um desempenho superior em relação aos demais algoritmos até o erro de posição de 0,1 km. A partir deste ponto o algoritmo TLS superou o UKF. Em seguida, aparece o LS que tem um desempenho superior em relação ao Minimax e GHT, que apresentaram desempenhos semelhantes com pequena vantagem para o algoritmo Minimax.

Incertezas ainda maiores na posição do observador foram utilizadas e a variação do RMSE dos algoritmos em função do ruído na posição do observador está na Fig. 19. O LS superou TLS a partir do erro de posição de 1,2 km, apresentando um melhor desempenho em relação aos demais. O Minimax foi superior aos demais algoritmos a partir do erro de posição de 1,8 km, seguido pelo GHT. Os algoritmos TLS e o UKF apresentaram os maiores erros RMS a partir do erro de posição de 2 km e o formato de suas curvas são bastante semelhantes, com mudanças de inclinações em pontos próximos.

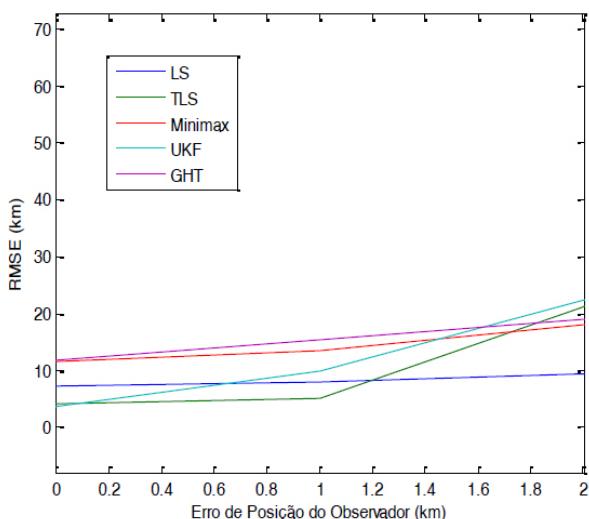


Fig 19: Incremento da incerteza na posição do observador.

4.3 Cenário 3: Posições dos receptores mais espaçadas entre si

No cenário apresentado na Fig. 20, os receptores realizaram medidas de marcação de um alvo estacionário no mar, na posição (40 km; 70 km), em posições mais espaçadas entre si, quando comparadas em relação aos cenários anteriores. Considera-se que as posições exatas dos receptores são conhecidas e que foram obtidas 20 medidas de marcação e o desvio padrão dos erros das medidas é 0,02 rd. Para a inicialização do UKF foi utilizado $\hat{X}_0 = (45; 75) \text{ km}$ e $\hat{P}_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \text{ km}^2$, como nos cenários anteriores.

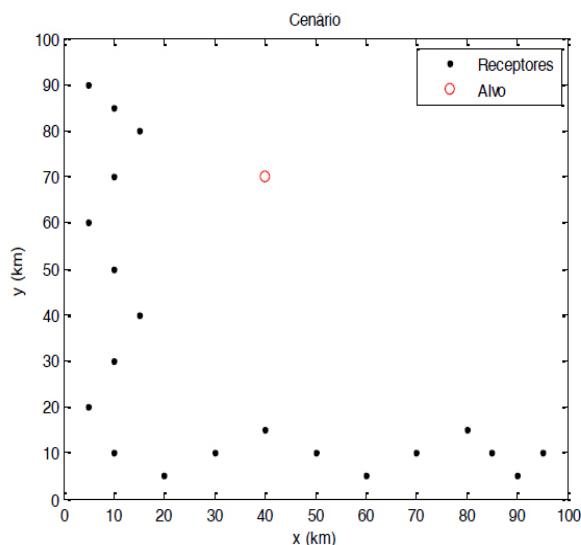


Fig 20: Cenário com grande espaçamento entre as posições dos receptores.

A Tab. 4 apresenta a média aritmética dos erros RMS das estimativas da posição do alvo e das posições estimadas para 1000 rodadas independentes, em quilômetros.

Tab 4: Média dos erros RMS e das posições estimadas para 1000 simulações

	Erro RMS (km)	Posição Estimada (km, km)
TLS	0,3144	(40,0178; 69,5557)
UKF	0,2625	(39,9940; 69,6288)
LS	0,3147	(40,0076; 69,5550)
Minimax	0,7196	(40,0451; 68,9833)
GHT	2,5012	(39,7965; 66,4686)

Os resultados apresentados são mais precisos em relação aos cenários anteriores. Isso se deve ao fato de todas as medidas de marcação estarem muito afastadas, causando uma área de incerteza menor quando da realização da triangulação com as medidas de marcação do alvo. O algoritmo UKF apresentou um resultado mais preciso que os outros quatro. Os algoritmos TLS e LS apresentaram resultados muito próximos, porém com uma pequena vantagem para o TLS. Eles foram seguidos pelo Minimax, que teve um desempenho superior ao GHT. Novamente, os algoritmos TLS, UKF e LS são comparáveis em termos de resultados, pois os erros de estimativas deles estão muito próximos e na prática o comprimento dos alvos considerados, que são maiores do que 100m, é muito maior que a diferença apresentada pelo erro RMS dos mesmos.

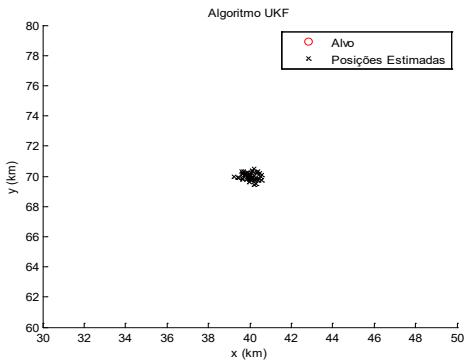


Fig 21: Estimativas obtidas pelo algoritmo UKF para 50 simulações

A Fig. 21 apresenta as estimativas da posição do alvo obtidas pelo algoritmo UKF para 50 simulações. De maneira semelhante, da Fig. 22 à Fig. 25 estão representadas as estimativas dos algoritmos TLS, LS, Minimax e GHT, respectivamente.

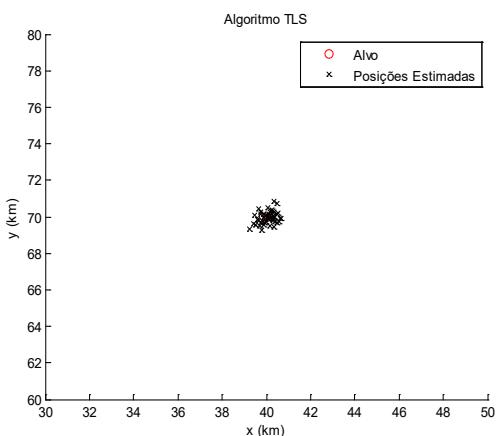


Fig 22: Estimativas obtidas pelo algoritmo TLS para 50 simulações.

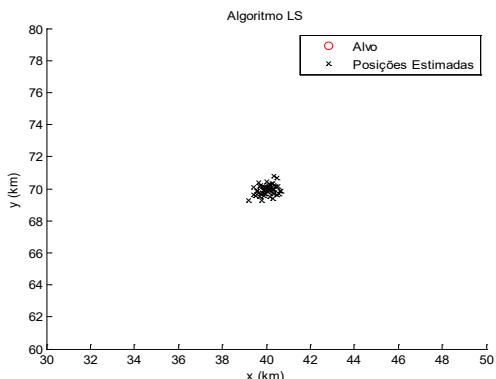


Fig 23: Estimativas obtidas pelo algoritmo LS para 50 simulações.

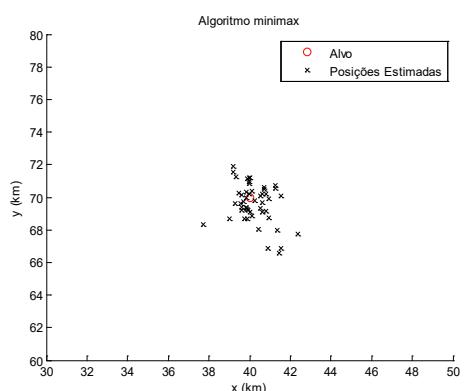


Fig 24: Estimativas obtidas pelo minimax para 50 simulações.

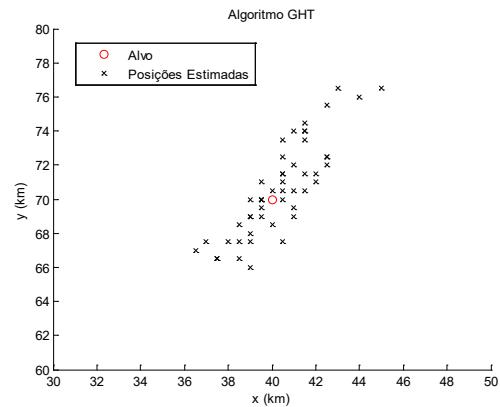


Fig. 25: Estimativas obtidas pelo algoritmo GHT para 50 simulações.

Na Fig. 26, compara-se o RMSE dos algoritmos propostos em função do ruído na posição do observador. As mesmas condições iniciais foram mantidas, ou seja, um total de 20 medidas de marcação são utilizadas e o desvio padrão dos erros das medidas é 0,02 rd. Para a inicialização do UKF foi utilizado $\hat{x}_0 = (45; 75)$ e $\hat{P}_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \text{ km}^2$. Observa-se que o RMSE de todos os algoritmos aumentou quando o ruído na posição do observador é incrementada, degradando o desempenho dos mesmos. O TLS e o LS apresentaram desempenhos semelhantes e mais precisos que os demais algoritmos. Sendo seguidos pelos algoritmos UKF, Minimax e GHT, respectivamente.

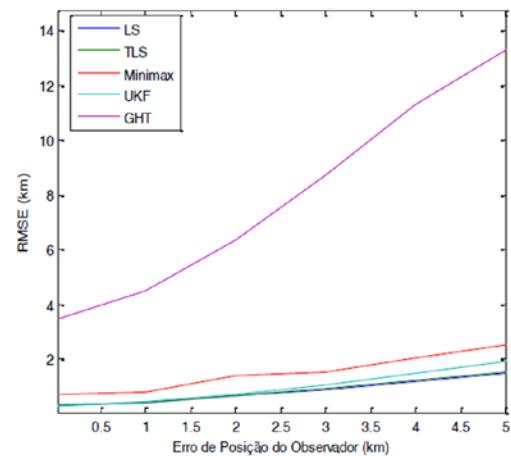


Fig. 26: Variação do RMSE em função da incerteza na posição do observador.

4.4 Cenário 4: Dois receptores móveis e um emissor móvel

No cenário apresentado na Fig. 27, duas plataformas aéreas estão se movendo: o receptor/plataforma 1 segue no sentido norte e o receptor/plataforma 2 segue no sentido leste, elas são capazes de medir as marcações de um alvo móvel no mar. Considera-se que as posições exatas dos receptores são conhecidas e que cada um deles obteve 10 medidas de marcação, sendo uma marcação por segundo, o desvio padrão dos erros das medidas é 0,02 rd. É considerado um emissor móvel representado por uma aeronave com velocidade de 400 m/s. Para a inicialização do UKF foi utilizado $\hat{x}_0 = (45; 75)$ e $\hat{P}_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \text{ km}^2$.

A Tab. 5 apresenta a média aritmética dos erros RMS das estimativas da posição do alvo para 1000 rodadas independentes, em quilômetros. Pode-se observar que o algoritmo UKF apresentou um resultado mais preciso que os outros quatro algoritmos. O algoritmo TLS, por sua vez, apresentou um desempenho superior em relação aos algoritmos LS, Minimax e GHT;

os algoritmos Minimax e GHT apresentaram resultados muito próximos, porém com uma pequena vantagem para o GHT.

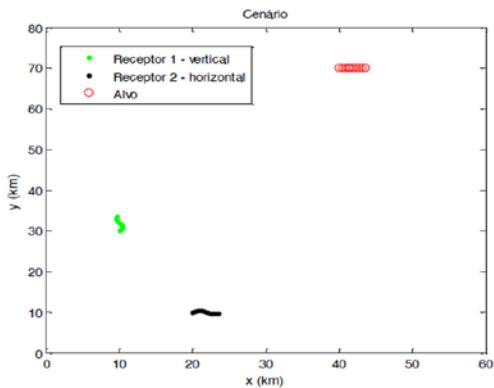


Fig. 27: Cenário com emissor móvel representado por uma aeronave.

Tab. 5: Média dos erros RMS e das posições estimadas para 1000 simulações

	Erro RMS (km)
TLS	4,0523
UKF	3,7996
LS	4,3182
Minimax	4,9438
GHT	4,7009

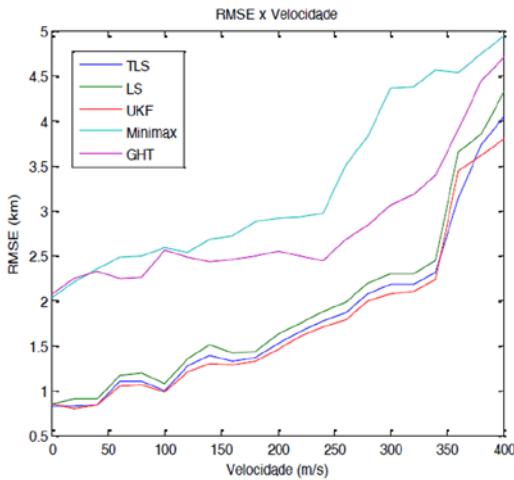


Fig. 28: Variação dos erros RMS em função da velocidade do alvo.

5. CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo realizar uma análise comparativa do desempenho de algoritmos de estimativa da posição de uma fonte de RF em cenários táticos navais específicos. Estes algoritmos utilizaram as medidas de AOA, ou marcações, do sinal transmitido do alvo para o observador para estimar a posição do alvo. Foi considerado que não apenas as medidas de marcação foram corrompidas por ruído mas também a posição exata do observador não era conhecida, estando sujeita a erros. Além disso, foram apresentadas interpretações geométricas para alguns algoritmos.

Os algoritmos LS, UKF e principalmente o TLS, que apresentaram melhores desempenhos, podem ser indicados para missões que exijam maior precisão, como por exemplo, para o lançamento de um míssil. Observou-se que o algoritmo UKF é muito dependente de uma estimativa inicial da posição, para compensar esta limitação, ele pode ser utilizado em conjunto com outro algoritmo que não possui uma precisão tão boa quanto a sua, como é o caso do Minimax e GHT. O UKF apresenta bons resultados quando utilizado para estimar trajetórias de alvos. O ruído das medidas

possuindo uma distribuição gaussiana tendeu a favorecer algoritmos baseados em mínimos quadrados, como o LS, TLS e UKF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. A. POISEL, "Electronic Warfare Target Location Methods", Artech House Inc, Norwood MA, 2012.
- [2] K. Dogançay, "Bearing-only target localization using Total Least Squares", Signal Processing, vol. 85, pgs 1695-1710, 2005.
- [3] R. G. Stansfield, "Statistical theory of DF fixing", J. IEE 94 (15), pgs 762-770, 1947.
- [4] K. D. Rao e D. C. Reddy, "A new method for finding electromagnetic emitter location", IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, vol. 30, pgs 1081-1085, 1994.
- [5] M. Gavish e A. J. Weiss, "Performance analysis of bearing-only target location algorithms", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 28, pgs 817-828, 1992.
- [6] K. Spingarn, "Passive position location estimation using the extended Kalman filter", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 23, pgs 558-567, 1987.
- [7] A. Mikhalev e R. F. Ormondroyd, "Fusion of sensor data for source localization using the Hough Transform", The 9th International Conference on Information Fusion, 2006.
- [8] A. Mikhalev e R. F. Ormondroyd, "Comparison of Hough Transform and Particle Filter methods of emitter geolocation using fusion of TDOA data", 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2007.
- [9] A. Mikhalev e R. F. Ormondroyd, "Passive Emitter Geolocation using Agent-based data fusion of AOA, TDOA and FDOA measurements", 10th International Conference on Information Fusion, 2007.
- [10] A. Mikhalev, E. J. Hughes e R. F. Ormondroyd, "Comparison of Hough Transform and Particle Filter methods of Passive Emitter Geolocation using Fusion of TDOA and AOA data", 13th International Conference on Information Fusion, 2010.
- [11] A. C. G. Thomé, J. C. A. Santos, A. G. Adami e L. C. S. Zampogno, "Avaliação de Erros de Localização de Emissores em Ambiente Urbano: Um Estudo de Caso no Rio de Janeiro", In: XIV Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa - SIGE, São José dos Campos - SP. Anais do XIV Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, 2012. vol. 1.
- [12] R. M. Vaghefi, M. R. Ghafari e E. G. Strom, "Bearing-only target localization with uncertainties in observer position", IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops - PIMRC Workshops, pgs 238-242, 2010.
- [13] E. C. Santos, J. A. Apolinário e J. A. Araújo, "Avaliação de algoritmos de localização de alvos baseados apenas em medidas de marcação", XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBT, 2016.
- [14] W. YANG, "Source localization using TDOA measurements with sensor location uncertainty", Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, jul. 2011.
- [15] I. Markovsky e S. Huffel, "Overview of total least squares methods", Signal Processing, vol. 87, pgs 2283-2302, 2007.
- [16] P. V. C. HOUGH, "Method and means for recognizing complex patterns", US Patent 3069654, 1962.
- [17] R. Brayton, S. Director, G. Hachtel, e L. Vidigal, "A New Algorithm for Statistical Circuit Design Based on Quasi-Newton Methods and Function Splitting", IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. CAS-26, pgs 784-794, 1979.
- [18] A.C.W. Grace, "Computer-Aided Control System Design Using Optimization Techniques", Ph.D. Thesis, University of Wales, Bangor, Gwynedd, UK, 1989.
- [19] S.P. Han, "A Globally Convergent Method for Nonlinear Programming", Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 22, 1977.
- [20] K. Madsen e H. Schjaer-Jacobsen, "Algorithms for Worst Case Tolerance Optimization", IEEE Trans. of Circuits and Systems, vol. CAS-26, 1979.
- [21] M.J.D. Powell, "A Fast Algorithm for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations", Numerical Analysis, ed. G.A. Watson, Lecture Notes in Mathematics, vol. 630, Springer Verlag, 1978.
- [22] S. J. Julier e J. K. Uhlmann, "A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems", In Proc. of AeroSense: The 11th Int. Symp. on Aerospace/Defence Sensing, Simulation and Controls, 1997.
- [23] C.O. Savage, R.L. Cramer and H.A. Schmitt, "TDOA Geolocation with the Unscented Kalman Filter", Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control - ICNSC, 2006.

Uma abordagem para desvio de obstáculos na assistência ao controle de um quadricóptero em tempo real

Bruno S. Giovaninia, Luis Claudio Batista da Silva^{a,b}, Paulo Fernando Ferreira Rosa^{*a}

^a Instituto Militar de Engenharia (IME)

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

^b Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)

Av. Governador Roberto Silveira, 1900, Prado, Nova Friburgo, RJ, Brasil

^{*}rpaolo@ime.eb.br

RESUMO: O uso de quadricópteros para missões civis e militares vem aumentado e os desafios envolvidos no seu controle, principalmente em ambientes fechados e restritos, atraem a atenção dos pesquisadores. Desta forma, uma abordagem automática para desvio de obstáculos ganha importância, dado os riscos de acidentes envolvidos no seu controle. Este trabalho apresenta uma abordagem para evitar obstáculos automaticamente, assistindo o controle manual de um quadricóptero em ambiente restrito. O método é baseado na constante estimativa da trajetória futura da aeronave, considerando sua dinâmica, status e controle, enquanto uma malha de ocupação, representando seus arredores, é construída a partir das distâncias medidas por sonares embarcados. Estas informações são usadas para determinar colisões iminentes e, em caso positivo, substituir o controle do usuário por um controle automático PID, mantendo sua localização. Três experimentos foram realizados em um simulador, no qual foi possível validar a solução proposta, evitando obstáculos com segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Desvio de obstáculos. Ambientes fechados. Controle PID. Quadricóptero.

ABSTRACT: The use of quadrotors to civilian and military missions has been augmented and the challenges involved on controlling it, mainly in indoors and restricted environments have attracted researchers. Thus, an automatic collision avoidance approach is of utmost importance, given the complexity of control and the risk of accidents involved in their use. This paper presents an approach for automatic obstacle avoidance assisting a manually controlled quadrotor. The method is based on constant estimation of the quadrotor's future path considering its dynamics, status, control while a grid representation of the nearby environment is built from distances measured by on-board sonars. All information is used to determine imminent collisions and, if so, overrides the operator's control by an automatic PID control, keeping its localization. Three experiments were executed on a simulator where the solution was evaluated and showed that the proposed methodology fulfilled its purpose by avoiding obstacles safely.

KEYWORDS: Obstacle avoidance. Indoor Environments. PID control. Quadrotor.

1. INTRODUÇÃO

Aeronaves remotamente pilotadas do tipo asas rotativas (multirotore) tem sido amplamente aplicadas em tarefas de defesa, tais como vigilância, mapeamento, busca e salvamento, reconhecimento, aquisição de alvos, dentre outros. Entretanto, muitos são os desafios relacionados para o uso seguro destes veículos em ambientes com obstáculos, o que tem atraído a atenção de pesquisadores de diversas áreas da robótica.

Para o objetivo deste trabalho, foi empregada uma plataforma de um quadricóptero, cuja configuração é dotada de propulsão por quatro hélices conectadas a quatro motores elétricos controlados eletronicamente. Dentre suas características, destacam-se a habilidade de realizar decolagem e aterrissagem vertical, pairar e executar manobras rápidas em diferentes condições de ambiente. Porém, controlar um quadricóptero não é uma tarefa simples quando se faz necessário voar próximo de obstáculos. Mesmo pilotos treinados podem passar por situações onde é difícil garantir um voo seguro, como, por exemplo, quando há perda de contato visual. Desta forma, um método automático para evitar colisões para assistir a operação desta plataforma é requerido.

O objetivo desse trabalho é implementar o desvio de obstáculos de um quadricóptero de forma automática, permitindo que sua operação mantenha o foco na missão global e evitar, assim, possíveis acidentes. Especificamente, propõe-se um método que consiste em evitar colisões estimando constantemente a trajetória futura do veículo, com base na sua dinâmica, no seu estado atual, no comando de controle corrente enviado pelo operador

e na distância para os obstáculos (medida através de um conjunto de sonares embarcados). Desta forma, facilita-se o controle de voo contribuindo para a segurança na pilotagem da aeronave em ambientes restritos.

A contribuição deste trabalho consiste na elaboração de um algoritmo para assistir a operação do quadricóptero evitando obstáculos baseada em localização e mapeamento simultâneos, do inglês *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), com a localização global do veículo sendo calculada continuamente durante o voo através de seus dados de navegação, enquanto três sonares embarcados, posicionados e apontados para frente do veículo, medem as distâncias relativas para os obstáculos ao seu redor. Um mapeamento do ambiente é realizado através do *Octomap*, uma implementação de uma malha de um mapa de ocupação, do inglês, *Occupancy Grid Mapping* [1]. Simultaneamente, a trajetória futura é estimada baseada na atitude e velocidade atual do quadricóptero. Além disso, o algoritmo constantemente testa se uma colisão contra obstáculos pode ocorrer. Isto é realizado basicamente comparando a trajetória futura com a posição de possíveis obstáculos em um horizonte de tempo previamente definido. Se a colisão é iminente, o comando do operador é substituído por um controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) automático, que tem o objetivo de manter o veículo na sua posição por um segundo e devolver o controle ao operador, em seguida. Caso contrário, o método proposto não substitui o comando do operador. Existem vários passos na implementação do método. Uma visão geral da arquitetura proposta pode ser verificada na Fig. 1.

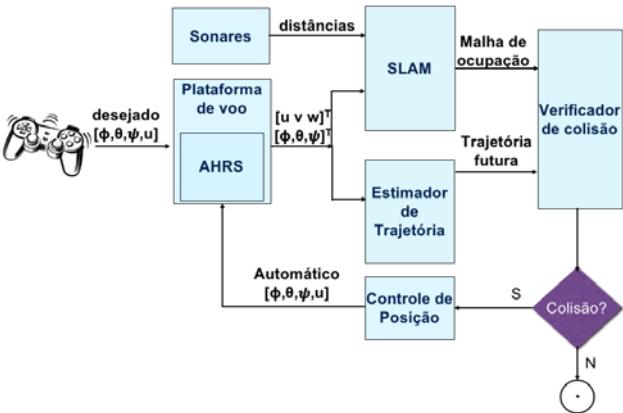


Fig. 1– Uma visão geral da arquitetura proposta.

Primeiramente, o controle desejado pelo operador $[\phi, \theta, \psi, u]$, denotado pela rolagem (ϕ), arfagem (θ), guinada (ψ) e intensidade (u), é enviado ao quadricóptero, o qual fornece sua atitude através do sistema de referência de direção e atitude da aeronave, do inglês, *Attitude and Reference System* (AHRS), e sua velocidade no próprio eixo $[u \ v \ w]^T$, utilizando algoritmos de visão [2]. Tais informações são usadas, tanto pelo estimador de trajetória para calcular a trajetória futura, quanto pelo módulo SLAM, que utiliza estas informações em conjunto com as distâncias obtidas dos sonares para determinar a malha de ocupação que representa o ambiente. A trajetória futura e a malha de ocupação são confrontadas através de um módulo de verificação de colisão, o qual verifica a existência de uma colisão iminente. Se não há colisão iminente, o sistema não interfere e o controle permanece com o operador. Caso contrário, um controlador de posição determina o controle automático PID necessário para manter a posição do quadricóptero e passa para a aeronave, substituindo o controle do operador pelo tempo de 1s, evitando a colisão.

A solução foi concebida e preparada para embarque em um quadricóptero real através de um mini-PC (Raspberry PI®), que são computadores que possuem pequenas dimensões e baixa capacidade de processamento computacional. Além disso ela foi implementada e testada em um simulador chamado *TUM Simulator* [3], um simulador de quadricóptero desenvolvido pela Universidade Técnica de Munique, utilizando o sistema operacional robótico ROS, do inglês *Robot Operating System*, e a plataforma de simulação Gazebo. Em ambiente simulado, a solução obteve sucesso em evitar os obstáculos em três experimentos elaborados, em que o quadricóptero foi pilotado diretamente contra um obstáculo, passou por um corredor que se torna cada vez mais estreito e percorreu um labirinto projetado, cumprindo seu objetivo de forma efetiva.

Este trabalho está dividido, além desta introdução, da seguinte maneira: a seção 2 apresenta os trabalhos acadêmicos de maior relevância para o desenvolvimento deste trabalho. A seção 3 aborda as etapas, metodologia utilizada e o desenvolvimento do trabalho. A seção 4 apresenta os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados no simulador. A última seção traz as conclusões deste artigo.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Nos últimos anos, veículos aéreos não tripulados receberam uma maior atenção da comunidade de robótica. Muitos autores focaram na modelagem e no controle destes veículos

[4], com destaque para os quadricópteros [5].

Nesse contexto, um tutorial foi desenvolvido por [6], realizando estudos abrangentes sobre a configuração da plataforma, metodologias de modelagem, modelagem comprehensiva não linear, os efeitos aerodinâmicos, identificação e simulação de um quadricóptero. O autor cita em seu trabalho que o modelo é a fundação da caracterização do veículo e o primeiro passo para o controle e simulação, definindo as relações entre as entradas e saídas do problema. Porém, por ser considerado um sistema complexo não linear de difícil formulação matemática e grande complexidade, sistemas de identificação, que envolvem a análise de percepções físicas e das entradas e saídas para a derivação do modelo, são bastante utilizados. Além disso, simplificações são normalmente assumidas como razoáveis e essenciais para a modelagem, tais como: (a) a estrutura do veículo sendo supostamente rígida e simétrica e (b) o centro de gravidade e a origem do referencial fixado ao corpo do veículo coincidirem.

Sistemas de identificação foram usados por [7] através da criação de um controlador PID para obter a estabilidade de um quadricóptero baseado em resposta rápida. Por outro lado, [8] propôs uma rede neural adaptativa para estabilizar o quadricóptero levando em consideração erros de modelagem e distúrbios do vento.

A partir de um modelo conhecido, diversas são as aplicações em estudo. Para a maioria, como navegação autônoma, tarefas multiagentes e desvio de obstáculos, a estimativa da localização do veículo é considerada um grande desafio [9]. Quando se trata de ambientes fechados, a visão computacional, que se utiliza de câmeras e processamento de imagem para estimativa, é uma das linhas de pesquisa sobre o problema [10]. Outra linha utiliza-se de sensores exteroceptivos para tal tarefa, como sonares [11] e laser [12]. Já para ambientes externos, torna-se possível a utilização do Sistema de Posicionamento Global (GPS), e alguns trabalhos que utilizam essa tecnologia foram desenvolvidos, como [13] e [14].

Quando se fala especificamente sobre desvio de obstáculos em tempo real, esse campo é bastante explorado em robótica. Para resolver essa questão, várias são as abordagens que vêm sendo adotadas. Dentre elas, os métodos baseados em campos potenciais artificiais, onde sensores de distância são usados e suas medidas tratadas como vetores de repulsão de forças. Utilizando essa abordagem, [15] implementou um método para prevenção de colisão reativa rápida para operação segura nas intermediações de estruturas como prédios e vegetação. Para isso, foram usados sensores lasers 3D e câmeras estéreo para detecção visual de obstáculos. O método de janelas dinâmicas, que incorpora a dinâmica do quadricóptero ao problema através da redução do espaço de busca das possíveis velocidades alcançáveis em um curto período de tempo (janela dinâmica), foi implementado por [16] em um robô de direção diferencial. Em sua abordagem, foram considerados os obstáculos próximos à trajetória utilizando uma representação de histograma para estimar a probabilidade de colisão. Outros métodos também podem ser citados, como o método de obstáculos com velocidade, que define um conjunto de velocidades possíveis que resultaria em uma colisão entre o robô e um obstáculo se movendo em uma certa velocidade [17][18]; o método de estados de colisões inevitáveis, que considera um estado em que uma colisão eventualmente irá ocorrer, independente da trajetória a ser estabelecida, que leva em conta a dinâmica tanto do robô quanto dos obstáculos, fixos ou móveis [19]; dentre outros.

[12] também desenvolveu um quadricóptero totalmente autônomo em ambiente *indoor*, utilizando para o desvio de obstáculos as medidas do sensor de varredura a laser em miniatura Hokuyo-URG® embarcado.

Em [20], foi realizado um trabalho com objetivo similar ao aqui proposto, porém somente com o foco no desvio do obstáculo, considerando o ambiente, a localização relativa do veículo e a posição dos obstáculos já previamente conhecidos. Para determinar o estado do veículo, foi utilizado um Filtro de Kalman, que obtém informações de localização de um equipamento instalado no ambiente para rastreamento do veículo chamado OptiTrack, além de informações de velocidade, atitude e velocidade angular obtidas do próprio quadricóptero. Já [11], por sua vez, também desenvolveu um método para assistir a operação de um quadricóptero com desvio automático de obstáculos. Um mapa dos arredores do veículo é construído usando FastSLAM, uma variação do problema SLAM que utiliza filtro de partículas, em que cada partícula apresenta o estado do problema com seus respectivos pesos definidos a partir da similaridade entre o estado estimado e o estado observado e que necessita de capacidade computacional elevada, tornando-se proibitivo para mini-PCs embarcados.

Diferente das abordagens dos trabalhos previamente mencionados, a contribuição deste trabalho vem da conceção de um algoritmo portável e flexível para o desvio de obstáculos em tempo real embarcado, onde a capacidade computacional limitada de mini-PCs é considerada, além de ser uma solução onde nenhum conhecimento prévio do ambiente é necessário.

3. ABORDAGEM PARA DESVIOS DE OBSTÁCULOS

Considerando um quadricóptero como um robô com uma dinâmica não linear genérica em um espaço arbitrário, $\mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$ sendo seu espaço de estados e $\mathcal{U} \subset \mathbb{R}^m$ o espaço da entrada de controle, em tempo contínuo, a dinâmica do robô é uma função em $f: \mathcal{X} \times \mathcal{U} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$, dada por:

$$\dot{x} = f(x(t), u(t), t) \quad (1)$$

onde t é o tempo, $x(t)$ é o estado do robô em t e $u(t)$ é a entrada de operação no tempo t . Portanto, dado um estado inicial $x_0 = x(0)$ e uma constante de entrada de operação u , o estado do robô em um instante $t > 0$ é dado por:

$$x = g(x, u, t) \quad (2)$$

onde $g \in \mathcal{X} \times \mathcal{U} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{X}$ representa a solução da Eq. 1.

Porém, quando se considera um ambiente repleto de obstáculos, o espaço de estados do robô se restringe às posições não ocupadas por eles. Define-se então $\mathcal{O} \subset \mathbb{R}^3$, como a subárea do espaço de movimentos possíveis do robô ocupada por obstáculos e as regiões que estão escondidas por eles quando vistas pelo estado corrente do robô. Além disso, $\mathcal{A}(x)$ como a subárea ocupada pelo robô no estado $x \in \mathcal{X}$. Assim, o problema passa a ser definido como identificar uma variação necessária $\Delta u \in \mathcal{U}$ sobre o controle de operação u , dado o atual estado x do robô, a fim de que se mantenha a sua posição em qualquer momento até se alcançar um período previamente definido $t \in \mathbb{R}$ conforme a relação:

determinar: Δu

$$\text{Sujeito a: } \forall t \in [0, t], \mathcal{A}(g(x, u + \Delta u, t)) \cap \mathcal{O} = \emptyset \quad (3)$$

É importante notar que, caso a entrada de operação obedeça às restrições da Eq. 3, ou seja, corresponda a um deslocamento seguro, $\Delta u = 0$ e nenhuma alteração do controle será realizada.

Para resolver este problema, uma abordagem é proposta para evitar que o quadricóptero colida. Algumas premissas e simplificações foram consideradas para a concepção deste trabalho:

- Ambiente *indoor* totalmente desconhecido: nenhuma informação prévia ou algum tipo de marcação no ambiente é considerado. Toda e qualquer informação sobre os arredores do veículo é obtida em tempo real durante o sobrevoo. Além disso, a utilização de Sistemas de Posicionamento Global, da sigla em inglês GPS, é proibitiva dada a característica *indoor* do ambiente.
- Natureza estática dos obstáculos: foi definido, como premissa, que os obstáculos presentes no ambiente não se movem e estão ali posicionados desde o início do sobrevoo.
- Quadricóptero modelado como uma esfera: o veículo é considerado uma região esférica quando comparado com a região ocupada pelo obstáculo. Uma modelagem precisa do formato do veículo foi dispensada dada a complexidade gerada na verificação da sobreposição entre a região ocupada pelo veículo e a região ocupada pelo obstáculo.
- Dados de navegação precisos: a utilização de um quadricóptero capaz de fornecer informações de sua velocidade com uma precisão suficiente para que problemas de cálculo de sua localização não prejudiquem o mapeamento do ambiente em tempo real.

Diversas etapas constituem a arquitetura, conforme foi ilustrado na Fig. 1. Os tópicos que suportam estas etapas serão descritos a seguir.

3.1 Medidas de distância: sonares

Nesta etapa, as informações são lidas dos sensores em tempo real e traduzidas para distâncias a serem consumidas pela etapa de SLAM para mapeamento do ambiente. A configuração dos sensores embarcados é mostrada na Fig. 2.

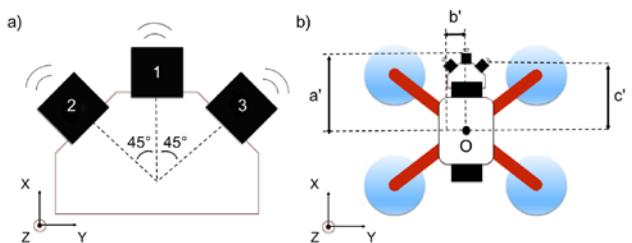


Fig. 2 – Posição relativa dos sensores em relação ao corpo do quadricóptero. (a) Ângulo de rotação em Z. (b) Deslocamento em relação ao centro de massa.

Três sonares foram transladados nos eixos X e Y e rotacionados no eixo Z em graus, apontando para a frente do quadricóptero, conforme pode ser visualizado na Fig. 2, onde “ a ”, “ b ” e “ c ” denotam as distâncias transladas dos sonares em relação ao centro de massa do veículo nos eixos de referência. Também, um filtro de medida máxima, do inglês *maxrange*, é aplicado para eliminar dados espúrios e melhorar a confiança das medidas passadas ao algoritmo.

3.2 Plataforma de voo: quadricóptero

Quadricópteros são veículos aéreos não tripulados (VANT) de pequeno porte, do tipo asa rotativa, classificados como micro-VANT ou mini-VANT, de acordo com seu tamanho e capacidade de carga. Possui capacidade de decolagem e aterrissagem vertical, do inglês *Vertical Take-off and Landing* (VTOL), impulsionado por quatro motores elétricos independentes posicionados em suas extremidades e controlados eletronicamente para estabilização autônoma do voo [22]. Além disso, é considerado um sistema não linear, fortemente acoplado com 6-DOF (sigla do inglês para Graus de Liberdade), onde três movimentos são lineares (x , y , z) e os outros três angulares (ϕ , θ , ψ). Porém, possui apenas quatro atuadores, sendo considerado então um sistema subatulado, com dois movimentos lineares (x , y) dependentes dos movimentos angulares (ϕ , θ). As forças e momentos atuando no quadricóptero são produzidos pelas hélices ligadas aos rotores que, combinados, geram um impulso principal e os torques de rolagem (ϕ), arfagem (θ) e guinada (ψ) [23].

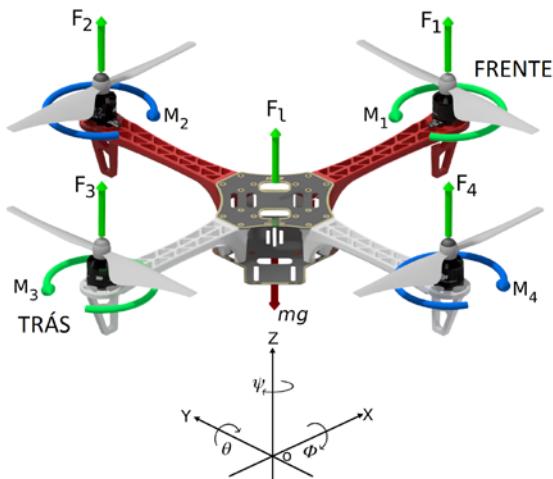


Fig. 3 – Forças F_i e momentos M_i de um quadricóptero.

A Fig. 3 apresenta o esquema com as principais forças e momentos gerados. Os motores M_i produzem as forças F_i (para $i = 1, \dots, 4$). Os motores trabalham em pares de forma que o motor M_1 (frente) e o motor M_3 rodam no sentido anti-horário, enquanto que M_2 e M_4 giram no sentido horário, de forma a balancear o torque total do sistema. F_i representa a soma dos impulsos de cada motor. O referencial inercial é denotado por (x , y , z) e (ϕ , θ , ψ) representam os movimentos de rolagem, arfagem e guinada, respectivamente. A força peso é representada por mg .

3.3 Estimador de trajetória

A dinâmica do quadricóptero é a base para a estimativa de trajetória. Considerando que o quadricóptero utilizado fornece sua velocidade e atitude (rolagem, arfagem e guinada) em tempo real, as fontes destas informações são desprezadas e somente a sua cinemática é considerada. As transformações relacionadas ao estudo da cinemática envolve uma translação e sucessivas rotações desde o referencial inercial \mathcal{F}_i até o referencial fixado ao corpo do quadricóptero \mathcal{F}_b . A Fig. 4 mostra as transformações passo a passo desde \mathcal{F}_i , passando por três referenciais intermediários, incluindo uma translação de \mathcal{F}_i para \mathcal{F}_v e três rotações ϕ , θ , ψ para a sequência $\mathcal{F}_v - \mathcal{F}_{v1} - \mathcal{F}_{v2} - \mathcal{F}_b$ [24].

Dessa forma, sendo $R_v^b(\phi, \theta, \psi) = R_{v2}^b(\phi)R_{v1}^{\psi}(\theta)R_v^{\psi}(\psi)$ a matriz

de rotação que representa a transformação de \mathcal{F}_v para \mathcal{F}_b , a localização corrente x , a velocidade v e a atitude fornecida θ pelo quadricóptero, a trajetória é calculada através da integração no tempo, com as grandezas x e θ usadas como condições iniciais para estabelecimento da trajetória e v é considerada constante durante todo seu cálculo. Esta premissa é razoável, dado que o tempo de predição, que determina o tamanho da trajetória futura, é pequeno com valor próximo de . Um passo da predição da trajetória é mostrado na Eq. 4, onde dt é uma constante representando o intervalo de duração entre dois passos da trajetória, x_o é a condição de localização inicial da trajetória e x_t são os passos calculados.

$$\begin{aligned} x_0 &= x \\ x_{t+1} &= x_t + R_v^b(\theta)v * dt \end{aligned} \quad (4)$$

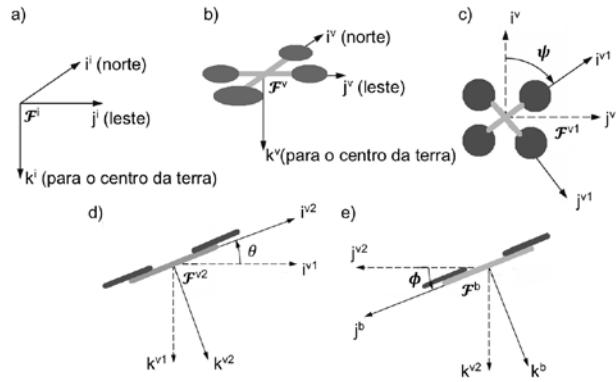


Fig. 4 – Referenciais da cinemática do quadricóptero: (a) eixo referencial inercial; (b) referencial do veículo; (c) referencial rotacionado em ψ ; (d) referencial rotacionado em θ ; e (e) referencial rotacionado em θ .

3.4 Localização e Mapeamento Simultâneos

Nosso enfoque é considerar um ambiente totalmente desconhecido, sob incertezas das medidas de distâncias obtidas através dos sonares. O objetivo do SLAM é estimar a localização de um robô e o mapeamento dos seus arredores simultaneamente utilizando uma abordagem probabilística. Seja $x_{1:t}$ a variável que denota o caminho do veículo e $z_{1:t}$ todas as medidas e $u_{1:t}$ todas as entradas de controle, onde $1:t$ representa o intervalo de tempo do instante até o instante . A propriedade de independência condicional do problema SLAM [1] permite decompor o SLAM em um problema de localização e um problema de mapeamento independentes (Eq. 5).

$$p(x_{1:t}, m | z_{1:t}, u_{1:t}) = p(x_{1:t} | z_{1:t}, u_{1:t})p(m | z_{1:t}, x_{1:t}) \quad (5)$$

Desta forma, tratamos a localização x de forma independente, obtendo-a diretamente a partir da velocidade v e atitude θ adquiridas do quadricóptero conforme pode ser observado na Eq. 6 e, posteriormente, o mapeamento é realizado através de uma abordagem probabilística. Uma malha de ocupação (*occupancy grid map*) foi utilizada para tratar este problema, gerando mapas consistentes a partir de medidas ruidosas e incertas, dada a localização do robô.

$$x = R_v^b(\theta)v * dt \quad (6)$$

Foi adotado o *Octomap* para gerar modelos volumétricos 3D do ambiente, baseado em *Octrees* e estimativa probabilística de ocupação. Como entrada, *Octomap* recebe medidas obtidas dos sonares embarcados e a resolução desejada e re-

torna uma malha de ocupação representando o ambiente dos arredores do quadricóptero durante o sobrevoo. Esta explicitamente representa tanto as áreas ocupadas, como também as áreas livres e desconhecidas. Sua principal propriedade é a atualizar probabilisticamente a malha de ocupação em tempo real, mantendo o consumo de memória baixo [21]. A Fig. 5 apresenta um cenário (a) e o mapeamento gerado pelo *Octomap* (b) após sobrevoo em ambiente simulado.

3.5 Detecção de colisão

Uma possível colisão é verificada baseada na interseção entre a região ocupada pelo obstáculo e pelo quadricóptero. Aqui, a região do quadricóptero é simplificada como uma esfera e a região dos obstáculos inclui áreas desconhecidas e a área acrescida formada a partir do raio da esfera.

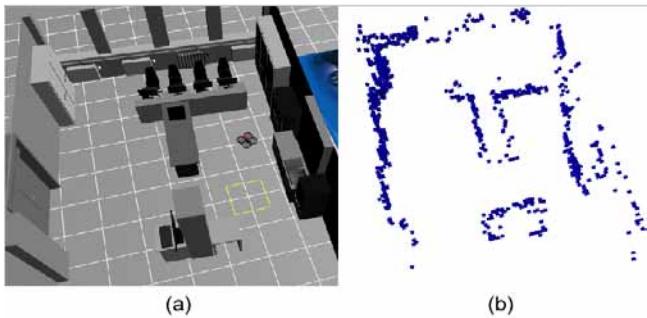


Fig. 5– (a) Ambiente simulado. (b) Mapeamento *Octomap*.

Durante o sobrevoo, uma área de verificação por colisões é delimitada a partir das possíveis posições alcançáveis em um intervalo $t \in [0, \tau]$ enquanto a trajetória futura é constantemente calculada. Ambas são baseadas na dinâmica e estado do quadricóptero, incluindo sua velocidade e localização.

Dada a localização x do quadricóptero, a área de verificação de colisão é delimitada conforme metodologia a seguir. Inicialmente, as distâncias alcançáveis a partir da sua posição x denotada por Δ_x , que é definida por $\Delta_x = v_{\max} * \tau$ onde v_{\max} é um valor fixo configurado representando a velocidade máxima do veículo e τ é o tempo de previsão também configurado. Em seguida, todas as células da malha dentro do intervalo $[x - \frac{\Delta_x}{2}, x + \frac{\Delta_x}{2}]$ são percorridas e, para cada uma, pergunta-se para o *Octomap* se ela está ocupada. Caso ocupada, o processo continua em duas etapas. Primeiramente, evita-se que colisões sejam verificadas contra células que não estão no caminho do quadricóptero. Por exemplo, quando o quadricóptero se movimenta paralelamente a uma parede que, por mais que a célula esteja suficientemente próxima do quadricóptero, não será alcançada. Para isso, dado o vetor distância d_t entre a localização atual do quadricóptero x_t e a posição x_c da célula expresso por $d_t = x_c - x_t$, é verificado se o ângulo α entre d_t e o vetor velocidade do quadricóptero v , está no intervalo $-45 < \alpha < 45$, conforme é mostrado na Eq. 7. Em caso positivo, a abordagem clássica de *C-Obstacles* de Latombe [25] é utilizada, expandindo-se a região ocupada pela célula pela região de possíveis configurações ocupadas pelo quadricóptero que colidem com a célula. Esta área expandida é, então, testada para uma possível interseção com cada passo da trajetória futura calculada. Em caso positivo, uma colisão é iminente e um controle automático será realizado substituindo o controle do operador. Caso contrário, o operador segue controlando normalmente o quadricóptero

sem intervenção do sistema anticolisão.

$$\cos \alpha = \frac{\langle d, v \rangle}{|d||v|} \quad (7)$$

A Fig. 6 representa a verificação de colisão em um cenário de sobrevoo do quadricóptero sendo comandado pelo operador contra um obstáculo.

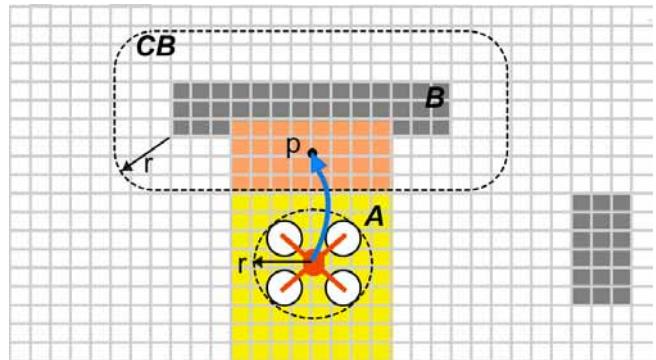


Fig. 6 – Uma ilustração da verificação de colisão durante o voo do quadricóptero. A interseção (em laranja) entre Δ_x e a região de obstáculo (CB) representa as futuras possíveis posições com colisão iminente.

O ambiente é mapeado através de uma malha de ocupação sendo a região ocupada pelo quadricóptero dada por \mathcal{A} e a região ocupada pelo obstáculo \mathcal{B} . \mathcal{A} representa o *C-Obstacle* de Δ_x . A área em amarelo define a área Δ_x e a área em laranja mostra o conjunto de células de Δ_x que intersectam \mathcal{B} . Qualquer trajetória que leve à área laranja, como a trajetória representada pela seta e termina no ponto P indica uma colisão iminente.

3.6 Controle automático

Dada uma colisão iminente, um controle automático é realizado para levar o veículo para a última localização segura conhecida. Este local foi convencionado como exatamente o local em que o veículo se encontra no momento que a trajetória de colisão é calculada. Além disso, a orientação também é mantida para uma melhor experiência do operador e a duração do controle automático é de , podendo ser configurável.

A abordagem utilizada neste passo utiliza-se de quatro controladores PIDs combinados para controlar a localização do quadricóptero (x, y, z) e sua orientação (ψ) como realizado em [26]. O esquema de controle é mostrado na Fig. 7. Os erros ($e_x(t), e_y(t), e_z(t), e_\psi(t)$) são calculados a partir da diferença entre a posição segura desejada e os valores retornados a partir do AHRS do quadricóptero e do estimador de localização global. Então, os erros são mapeados para comandos de controle, restringidos por valores aceitáveis. O controle é calculado na mesma frequência que o quadricóptero envia dados de navegação (aproximadamente 200Hz). As constantes de controle proporcional, integral e derivativa k_p, k_i e k_d , para cada controle, foram estimadas empiricamente

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos através dos experimentos executados para avaliar o algoritmo desenvolvido. Primeiramente, foi analisado o comportamento do Verificador de Colisão, variando-se o tempo de previsão. A seguir, três experimentos completos foram realizados.

zados para avaliar o comportamento da solução em três diferentes situações: (a) o quadricóptero foi pilotado diretamente contra um obstáculo, (b) passou por um corredor que se torna cada vez mais estreito e (c) percorreu um labirinto projetado.

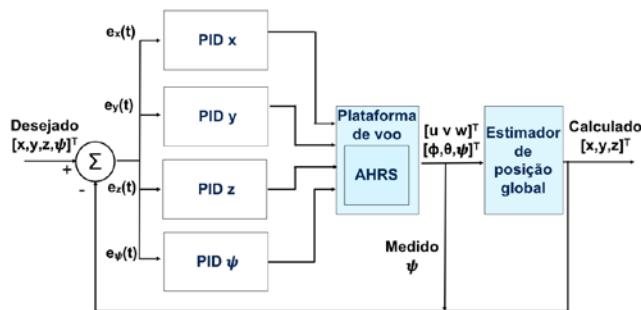


Fig. 7– Esquema do controle PID do controle automático para evitar a colisão.

4.1 Tempo de predição

O tempo de predição τ tem influência no comportamento da solução na determinação da área de verificação de colisão. Quanto menor é τ , menor será a área de verificação de colisão e mais perto do obstáculo o quadricóptero irá parar. A Fig. 8(a-d) ilustra os volumes das áreas de verificações geradas para diferentes valores de τ (0,5s, 1,0s, 1,5s e 2,0s, respectivamente). A partir da velocidade máxima de $v_{max} = 1,5\text{m/s}$, obtida através de testes empíricos no simulador, os lados do volume no plano são definidos a partir da fórmula , enquanto que o lado do eixo z é fixo com valor igual a 1 m. Desta forma, os valores de para os mesmos valores de τ são, 0,75m, 1,5, 2,25m e 3m, respectivamente.

O experimento considera o quadricóptero sendo pilotado contra uma parede conforme ilustrado na Fig. 9. Para cada τ (0,5s, 1,0s, 1,5s e 2,0s), o movimento foi executado e as distâncias mínimas para o obstáculo foram calculadas.

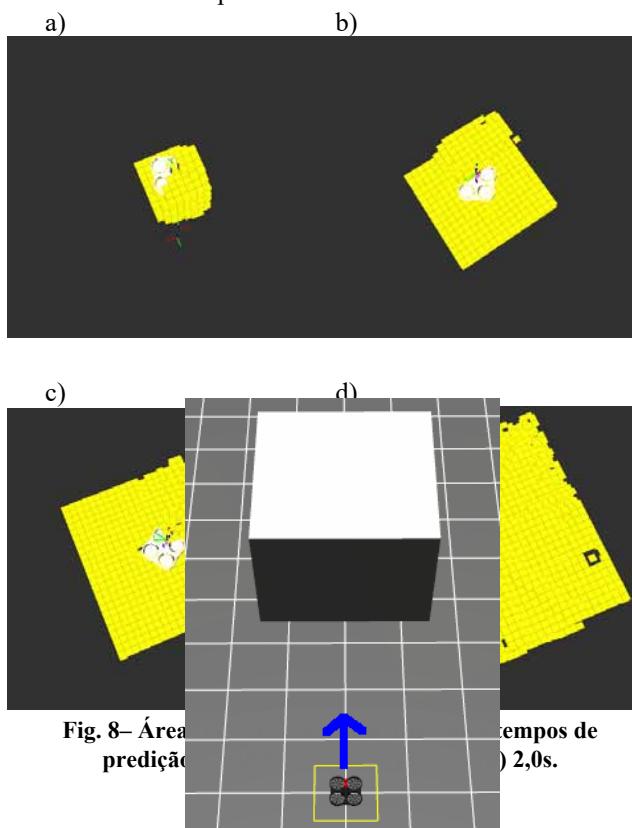


Fig. 9– Cenário do quadricóptero pilotado pelo operador contra uma parede.

Tabela 1: Distância de parada do quadricóptero para o obstáculo considerando diferentes tempos de predição.

(s)	Distância para o obstáculo (m)
0,5	0,163925
1,0	0,493201
1,5	0,768959
2,0	1,223990

Tabela 2: Parâmetros de configuração utilizados para os experimentos completos.

PARÂMETRO	VALOR
Resolução da célula Octomap	0,1 m
Tempo de predição (τ) / Tempo para colisão limite	0,5 s
Raio da esfera que representa o quadricóptero	0,3 m

A Tabela 1 ilustra os resultados do experimento. Foi considerada uma margem de segurança, prevenindo possíveis imprecisões dos sensores. Logo, $\tau = 0,5\text{s}$ apresentou um resultado satisfatório, com o veículo parando a uma distância de 0,16 da parede e foi configurado para utilização nos demais testes.

4.2 Experimentos completos

Nesta seção, serão apresentados três experimentos que avaliam a solução em todas as etapas da arquitetura utilizada. Um resumo dos parâmetros de configuração assumidos para o ambiente simulado é listado na Tabela 2. A resolução da célula na malha de ocupação *Octomap* é de 0,2. O tempo de predição (τ) também determina o tempo para colisão limite. Esse limite vai identificar, baseado na distância para a célula da malha de ocupação e na velocidade do quadricóptero, se existirá ou não uma colisão futura e acionará o controle automático, em caso positivo. Desta forma, ambos os parâmetros são representados pelo mesmo valor de 0,5s. Por último, o raio de 0,3m reflete a distância entre o centro de massa e a extremidade mais distante do quadricóptero modelado no simulador.

4.2.1 Experimento I

Neste experimento, foi utilizado o mesmo movimento realizado no experimento anterior, onde o quadricóptero é pilotado diretamente contra uma parede, conforme ilustrado na Fig. 9. Porém, o intuito aqui é avaliar o acionamento do controle automático quando o veículo se aproxima do obstáculo. A Fig. 10 apresenta três gráficos que ilustram o comportamento do algoritmo durante o tempo da trajetória em questão. É possível verificar o momento em que o controle automático entrou em ação na Fig. 10a. O tempo para colidir é calculado e seu resultado é igual ou superior ao tempo para colisão limite (0,5s) durante quase todo o trajeto. A série em verde (eixo esquerdo) apresenta este comportamento, sendo que só é apresentado um valor diferente do tempo de colisão limite, quando o valor é inferior a este e, nesse momento, o controle automático entra em ação. Desta forma, depois de aproximadamente 26,25s, o tempo para colisão apresenta um valor de 0,11s e o controle automático

é ativado, saindo do valor 0 para o valor 1. Este comportamento é apresentado na série em laranja (eixo direito). O comando automático, por sua vez, permanece ativo durante 1s e retorna o comando para o operador, reassumindo o valor 0, a partir de então.

A Fig. 10b, por sua vez, ilustra a comparação entre a velocidade gerada pelo comando de controle do operador (série em azul) e a velocidade efetiva do quadricóptero (série em vermelho). Os valores apresentados no eixo vertical à esquerda do gráfico são referentes às normas dos respectivos vetores velocidade. No início, o quadricóptero sai do repouso e é acelerado até sua velocidade máxima de 1m/s no instante 25s, a partir do comando de controle do operador. No instante 26,65s, é possível notar que, apesar do comando de controle manter sua intensidade e velocidade gerada, a velocidade efetiva começa a cair, não respondendo aos comandos de controle. Nota-se que, confrontando com o gráfico da Fig. 10a, é o momento em que o controle automático entrou em ação, confirmando que este sobrepujou o comando do operador e provocou a parada do quadricóptero. Por fim, a distância para a parede, durante o trajeto, é mostrada na Fig. 10c. A distância decresce com o tempo até o instante 27,15, quando, a partir de então, a distância permanece constante com um valor de aproximadamente 0,16m.

4.2.2 Experimento II

Um segundo experimento foi realizado, avaliando qual a largura mínima de um corredor para que o quadricóptero passe sem ativar o controle automático. Foi projetado, na ferramenta Google SketchUp®, um ambiente onde a largura do corredor vai diminuindo conforme o quadricóptero se aproxima do seu fim. O quadricóptero foi então diretamente pilotado através deste corredor, a fim de verificar a profundidade atingida pelo quadricóptero até o controle automático ser ativado e, consequentemente, descobrir a largura mínima. A Fig. 11 ilustra o ambiente simulado. O projeto, com as medidas das referidas larguras, é apresentado na Fig. 11a, enquanto que o movimento executado é mostrado, através de uma seta azul, no ambiente simulado na Fig. 11b.

O deslocamento realizado, de uma vista superior, a partir do comando de controle do operador, é mostrado na Fig. 11c em azul. Em vermelho, é mostrado o trecho do trajeto onde o comando de controle foi sobreposto pelo controle automático.

Gráficos similares aos gráficos apresentados no experimento anterior, que confrontam o tempo para colisão e ativação do controle automático e o comando de controle e a velocidade do quadricóptero, são apresentados nas Fig. 11d e Fig. 11e, respectivamente. Na Fig. 11e, é possível observar que o quadricóptero sai do repouso e sofre, na sequência, uma ligeira variação das velocidades entre os instantes 84s e 86,5s. Esta variação é realizada sob controle manual a fim de manobrá-lo para a execução da trajetória desejada. Isto pode ser verificado confrontando o mesmo instante de tempo com a ligeira variação da trajetória na origem do deslocamento, na Fig. 11c.

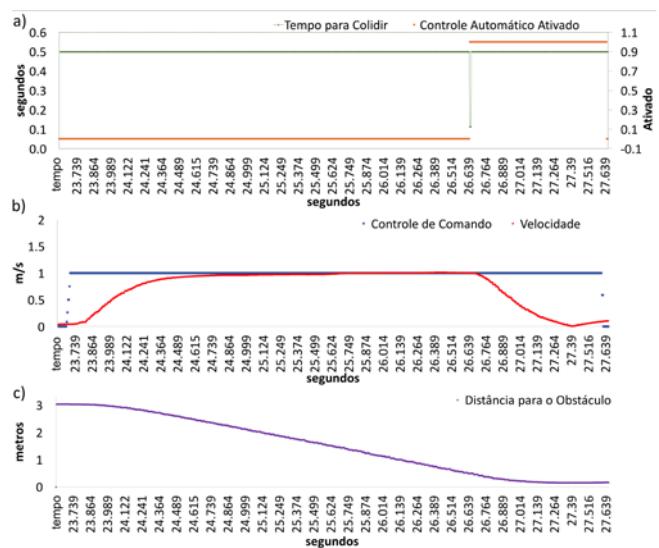


Fig. 10– Comportamento da solução quando o quadricóptero é pilotado diretamente contra uma parede. (a) Tempo para colidir (em verde) e acionamento do controle automático (em laranja) no tempo. (b) Comando de controle (em azul) e velocidade efetiva (em vermelho) no tempo. (c) Distância para o obstáculo.

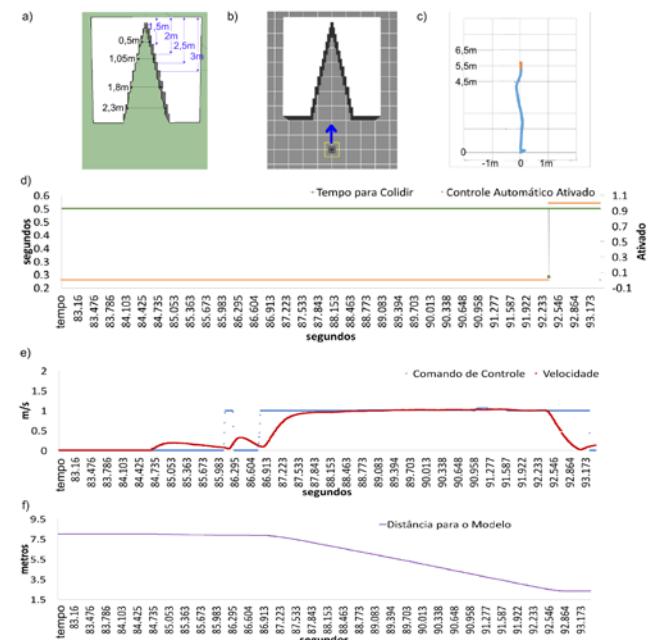


Fig. 11– Comportamento da solução enquanto o quadricóptero entra em um corredor cada vez mais estreito. (a) Medidas do corredor. (b) Caminho executado. (c) Trajetória percorrida. (d) Tempo para colidir (em verde) e acionamento do controle automático (em laranja) no tempo. (e) Comando de controle (em azul) e velocidade efetiva (em vermelho) no tempo. (f) Distância para o fundo do corredor.

Um gráfico de distância também é apresentado na Fig. 11f. Porém, é medida a distância do quadricóptero para o fundo do corredor projetado. As distâncias das partes dos corredores de diferentes larguras para o fundo do corredor podem ser visualizadas em azul na Fig. 11a. Na Fig. 11f, é possível observar o decréscimo da distância durante a trajetória até o momento em que o quadricóptero permanece a uma distância constante de 2,31m do fundo do corredor, com o controle automático entrando em ação no instante 92,29s e parando o quadricóptero no instante .

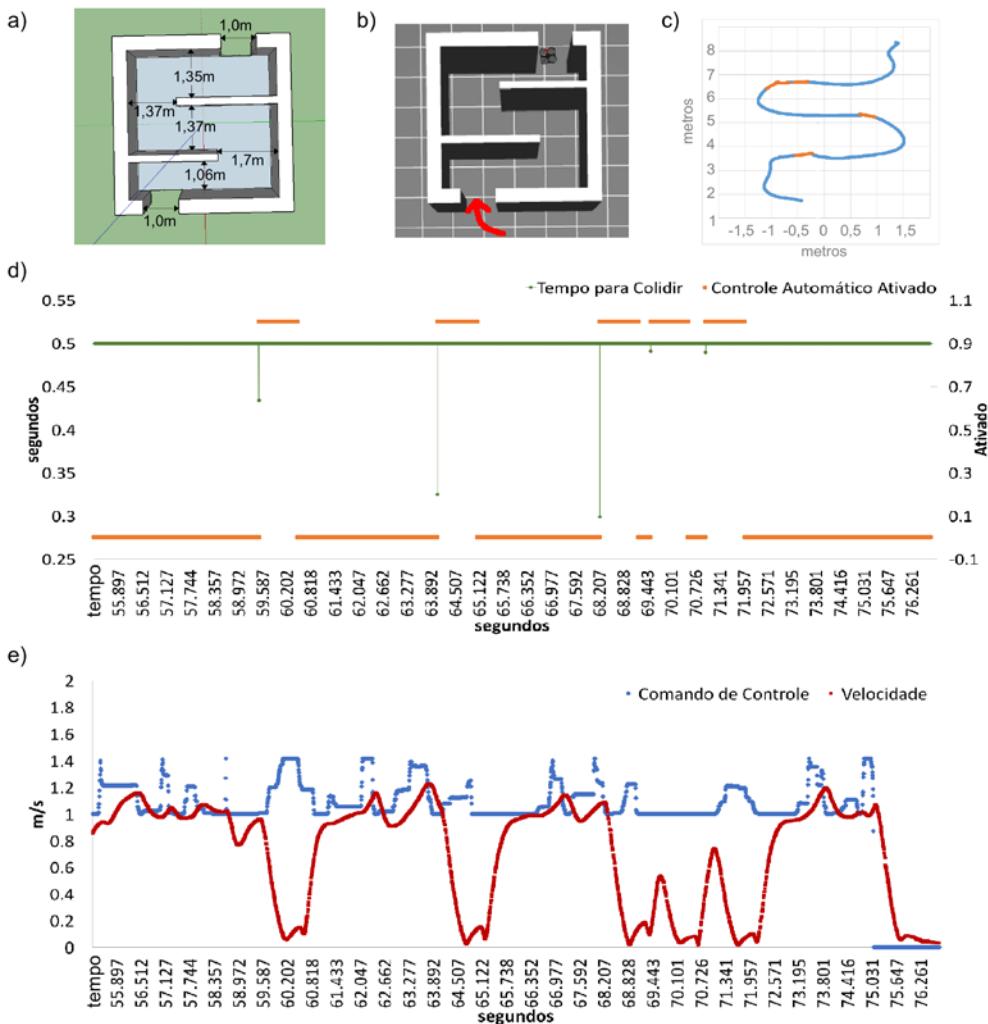


Fig. 12– Estado da solução enquanto o quadricóptero percorre o labirinto. (a) Medidas entre paredes. (b) Caminho executado. (c) Trajetória percorrida. (d) Tempo para colidir (em verde) e acionamento do controle automático (em laranja) no tempo. (e) Comando de controle (em azul) e velocidade efetiva (em vermelho) no tempo.

A partir destes resultados, confrontando a Fig. 11f com a Fig. 11a, é possível concluir que o quadricóptero é capaz de percorrer um corredor de 1,05m de largura sem que o controle automático entre em ação. Considerando que o quadricóptero é representado por uma esfera de 0,3m de raio e que ele passa no centro do corredor, uma margem de 0,225m de cada lado foi necessária.

4.2.3 Experimento III

Um trajeto completo foi testado neste experimento. A ideia básica é avaliar o auxílio do controle automático durante um deslocamento com diversas mudanças de direções onde colisões são possíveis. Um labirinto foi modelado na ferramenta Google SketchUp® e é exibido, em conjunto com as medidas das distâncias entre suas paredes, na Fig. 12a. A Fig. 12b apresenta o labirinto no simulador, com a seta em vermelho representando o início da trajetória que o quadricóptero percorreu. A trajetória realizada, comandada pelo operador, é mostrada em azul na Fig. 12c. Em vermelho, estão os trechos onde controle automático foi ativado.

Neste experimento, também são apresentados gráficos que confrontam o tempo para colisão e ativação do controle automático e o comando de controle e a velocidade do quadricóptero, através das Fig. 5.13d e Fig. 5.13e, respectiva-

mente. O controle automático entrou em ação em cinco diferentes intervalos (59,5s – 60,5s, , 64,1s – 65,1s, 68,2 – 69,2s, 69,6s – 70,6s e 70,9s – 71,9s), como pode ser verificado na série em laranja da Fig. 12d. Isto ocorreu devido às ocorrências de tempos para colisão inferiores à 0,58, fato explicitado na série em verde do mesmo gráfico.

A Fig. 12e, diferente dos outros experimentos, apresenta algumas variações no comando de controle (série em azul), dada a necessidade de mudança das direções durante a trajetória. Além disso, é possível verificar que a velocidade do quadricóptero (em vermelho) decai durante os intervalos , 59,5s – 60,5s, 64,1s – 65,1s, 68,2s – 69,2s, 69,6s – 70,9s, 70,9s – 71,9s independentemente do comando de controle do operador. Este fato confirma o acionamento do controle automático.

Tabela 3: Distância mínima para células nos intervalos em que o controle automático foi ativado.

Intervalo(s)	Distância mínima para o obstáculo (m)
59,5s – 60,5s	0,417316
64,1s – 65,1s	0,341586
68,2s – 69,2s	0,325506
69,6s – 70,6s	0,201657
70,9s – 71,9s	0,335225

Por fim, faltava verificar que o controle automático não permitiu a colisão do quadricóptero durante toda a trajetória. Para isso, a distância para a célula mais próxima foi calculada nos momentos em que o controle automático entrou em ação. Este valor é a distância mínima calculada para determinar o tempo de colisão. A Tabela 3 apresenta os cinco intervalos em que o controle automático estava ativo e suas respectivas distâncias mínimas calculadas. Considerando toda a trajetória, é possível observar que a distância mínima para as paredes do labirinto foi de 0,20m para o intervalo 69,6s – 70,6s, o que confirma a não existência de colisões no percurso.

A análise aqui apresentada demonstra que a solução foi capaz de evitar a colisão enquanto o quadricóptero percorre um labirinto. Observando a Fig. 12c, é possível verificar que os intervalos onde o controle automático foi ativado são instantes de correção de trajetória que, normalmente, são mais propícios a colisões.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi elaborada uma solução embarcada para assistência ao controle manual de um quadricóptero, sendo capaz de impedir a colisão do veículo contra obstáculos em tempo real, considerando um ambiente totalmente desconhecido. Uma arquitetura foi proposta, baseada no cálculo simultâneo da localização e mapeamento dos arredores do quadricóptero (SLAM), durante o sobrevoo. A trajetória futura do veículo é constantemente estimada enquanto a malha de ocupação é construída a partir de três sonares embarcados apontados para a frente do quadricóptero, que obtêm as distâncias para os obstáculos dos seus arredores. O *Octomap* foi utilizado para constituir a malha de ocupação utilizando uma abordagem probabilística, endereçando a incerteza relacionada à imprecisão das medidas obtidas dos sonares. Além disso, o *Octomap* apresenta características que permitem sua utilização em computadores com capacidade de processamento limitada, como permitir diferentes resoluções da *Octree*, compactação de armazenamento e rapidez de atualização. Um controle automático PID foi elaborado para sobrepor o controle do operador pelo intervalo de tempo de e manter a posição do quadricóptero, evitando a colisão iminente.

Os três experimentos realizados mostraram que a arquitetura proposta obteve sucesso em evitar colisão do quadricóptero contra obstáculos em ambiente simulado e em tempo real. A utilização do *Robot Operating System* (ROS) em conjunto com o Gazebo e TUM Simulator provaram uma infraestrutura importante para a construção e validação da solução proposta, através da simulação do quadricóptero e diversos ambientes *indoor*, com diferentes cenários e obstáculos, para navegação do quadricóptero.

O algoritmo desenvolvido é configurável. Através da variação dos parâmetros de configuração ilustrados na Tabela 2, a solução pode ter seu comportamento modificado, permitindo o quadricóptero sobrevoar mais próximo ou distante dos obstáculos, de acordo com o nível de conservadorismo desejado. Além disso, o algoritmo apresenta um tempo para a verificação de colisão menor que 0,005s, valor correspondente a uma frequência de 200Hz, o que afirma sua capacidade de processamento em tempo

real e a baixa necessidade de recursos computacionais. Desta forma, a solução atendeu aos requisitos propostos em simulação, evitando a colisão com os obstáculos.

Como trabalho futuro, a solução será embarcada em um quadricóptero real controlado por um mini-PC (Raspberry PI®) e novos experimentos serão realizados. Também, serão adicionados sensores de medição de distância ópticos (LIDAR, sigla para o termo em inglês *Light Detection and Ranging*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Thrun, S.;Burgard, W.; Fox, D.; Probabilistic robotics, MIT Press, 2005.
- [2] Bristeau, P.-J.; Callou, F.; Vissiere, D.; Petit, N. et al; The navigationandcontroltechnologyinsidetheAr.Drone micro UAV; 18th IFAC World Congress, volume 18, págs. 1477–1484, 2011.
- [3] Sturm, J.;Gazebo Simulator for theParrotAR.Dronequadcopter, 2012. http://wiki.ros.org/tum_simulator,acessado em agosto de 2016.
- [4] Ross, S.; Melik-Barkhudarov, N.; Shankar, K. S.; Wendel, A.; Dey, D.;Bagnell, J. A.;Hebert, M.; Learning monocular reactive UAV control in cluttered natural environments;Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference, págs. 1765–1772, IEEE, 2013.
- [5] Ryll, M.; Bulthoff, H. H.; Giordano, P. R.; A novel overactuatedquadrotorunmannedaerialvehicle: modeling, control, and experimental validation;Control Systems Technology, IEEE Transactionson, 23(2):540–556, 2015.
- [6] Zhang, X.; Li, X.; Wang, K.; Lu, Y; A SurveyofModellingandIdentificationofQuadrotorRobot; Abstract and Applied Analysis, volume 2014,Hindawi Publishing Corporation, 2014.
- [7] Salih, A. L.; Moghavvemi, M.; Mohamed, H. A.;Gaeid, K. S.;Flight PID controller design for a UAV quadrotor;Scientific ResearchandEssays, 5(23): 3660–3667, 2010.
- [8] Nicol, C.;Macnab, C; Ramirez-Serrano; A Robust neural network controlof a quadrotorhelicopter;ProceedingsoftheCanadianConferenceonElectricaland Computer Engineering, págs. 1233–1237, 2008.
- [9] Ito, K.;Han, J;Ohya, A; Localizationusing uniaxial laser rangefinderand IMU for MAV; System Integration (SII), 2014 IEEE/SICE InternationalSymposiumon, págs. 712–717, IEEE, 2014.
- [10] Shen, S.; Mulgaonkar, Y.; Michael, N;Kumar, V.; Vision-basedstateestimation for autonomousrotorcrafMAVs in complexenvironments; Roboticsand Automation (ICRA), 2013 IEEE InternationalConferenceon, págs. 1758–1764, IEEE, 2013.
- [11] Mendes, J.; Ventura, R.; Assistedteleoperationofquadcopters usingobstacleavoidance;Journalof Automation Mobile RoboticsandIntelligent Systems, 7(1):54–58, 2013.
- [12] Grzonka, S.;Grisetti, G;Burgard, W; A fullyautonomous indoor quadrotor;Robotics, IEEE Transactionson, 28(1):90–100, 2012.
- [13] Kerns, A. J.; Shepard, D. P.;Bhatti, J. A.;Humphreys, T. E.; Unmannedaircraft capture andcontrol via GPS spoofing;Journal of Field Robotics, 31 (4):617–636, 2014.
- [14] Roberts, A.;Tayebi, A.; A new position regulationstrategy for VTOL UAVsusing IMU and GPS measurements;Automatica, 49(2):434–440, 2013.
- [15] Nieuwenhuisen, M.;Droeschel, D.; Schneider, J.;Holz, D.;Labe, T.;Behnke, S.; Multimodal obstacle detectionand-collisionavoidance for micro aerialvehicles; Mobile Robots (ECMR), 2013 EuropeanConferenceon, págs. 7–12. IEEE, 2013.
- [16] Saranrittichai, P.;Niparnan, N.;Sudsang, A.; Robust local obstacleavoidance for mobile robotbasedonDynamicWindow approach;ElectricalEngineering/Electronics, Computer, TelecommunicationsandInformation Technology (ECTI-CON), 2013 10th InternationalConferenceon, págs. 1–4, IEEE, 2013.
- [17] Claes, D.;Hennes, D.;Tuyls, K.;Meeussen, W.; Collisionavoidanceunderboundedlocalizationuncertainty;IntelligentRobots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ InternationalConferenceon, págs. 1192–1198. IEEE, 2012.

- [18] Van Den Berg, J.;Wilkie, D.; Guy, S. J.;Niethammer, M.;Manocha, D.; LQG-obstacles: feedback controlwithcollisionavoidance for mobile robotswithmotionandsensinguncertainty;Roboticsand Automation (ICRA), 2012 IEEE InternationalConferenceon, págs. 346–353, IEEE, 2012.
- [19] Fraichard, T.;Asama, H.; Inevitablecollisionstates - a step towardssafeerobots?;AdvancedRobotics, 18(10):1001–1024, 2004.
- [20] Israelsen, J.;Beall, M.;Bareiss, D.; Stuart, D.;Keeney, E.; Van Den Berg, J.;Automaticcollisionavoidance for manuallytele-operatedunmannedaerialvehicles;Roboticsand Automation (ICRA), 2014 IEEE InternationalConferenceon, págs. 6638–6643, 2014.
- [21] Hornung, A.;Wurm, K. M.;Bennewitz, M.;Stachniss, C.;Burgard, W.;OctoMap: anefficientprobabilistic 3D mapping framework basedonoctrees;AutonomousRobots, 34(3):189–206, 2013.
- [22] Salih, A. L.;Moghavvemi, M.; Mohamed, H. A.;Gaeid, K. S.; Flight PID controller design for a UAV quadrotor;ScientificResearchandEssays, 5(23): 3660–3667, 2010.
- [23] Carrillo, L. R. G.; López, A. E. D.; Lozano, R.;Pégard, C.; Quadrotorcraftcontrol: vision-basedhoveringandnavigation; Springer Science & Business Media, 2012.
- [24] Beard, R. W.;McLain, T. W.; Smallunmannedaircraft: theory-andpractice; Princeton University Press, Princeton, 2012.
- [25] Latombe, J.-C.; Robotmotionplanning, volume 124, Springer Science & Business Media, 1991.
- [26] Lugo, J. J.;Zell, A.; Framework for autonomous on-board navigationwiththe AR. Drone;JournalofIntelligent& Robotic Systems, 73(1-4):401–412, 2014.

Modelagem da propagação da variância em processos multivariados correlacionados em estágios

Josiane Da S Jesus, Paulo H C Maranhão*, D.Sc.

Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.

* maranhao@ime.eb.br

RESUMO: A maioria dos processos produtivos consiste de um número significativo de estágios. Assim, modelar a variação das características de qualidade de produtos é uma estratégia fundamental para reduzir variação na produção e, por conseguinte, reduzir os custos das empresas responsáveis pelo processo. A ideia do estudo da transmissão da variação em processos com múltiplos estágios é identificar as fontes de variação em cada estágio no intuito de agir preventivamente em casos de erros no processo, ou seja, dado que o processo apresentou problemas, busca-se identificar exatamente em qual estágio ocorreu. Nesse sentido, este trabalho propõe um modelo para avaliar a propagação da variância em processos multivariados correlacionados em estágios. O estudo foi realizado por meio de simulações.

PALAVRAS-CHAVE: Processos multivariados correlacionados, propagação da variância, estágios.

ABSTRACT: Most industrial processes consist of a significant number of stages. Thus, modeling and monitoring the variation of the quality characteristics of products is a key to reducing variation in production and therefore reduce the costs of company responsible for the strategy process. The idea of studying the propagation of variation in multi-stage process is to identify the sources of variation in each stage in order to take preventive action in cases of errors in the process, e.g., since the case presented problems, how to identify exactly which stage occurred. In this sense, this work proposes a model to evaluate the propagation of variance in multivariate correlated processes in stages. The study was carried out through simulations.

KEYWORDS: Correlated multivariate processes, propagation of variance, stages.

1. INTRODUÇÃO

O mundo atual, competitivo e globalizado, provoca uma busca constante por qualidade, eficiência, diminuição de custos e maior retorno financeiro em toda e qualquer organização. Esse conjunto de objetivos se transformou em necessidade básica para a sobrevivência de empresas e indústrias.

Um produto ou serviço pode ser afetado negativamente pela variabilidade durante o seu processo de fabricação ou execução. Qualquer diferença entre o produto obtido e o produto desejado é denominada de desvio e uma medida bastante utilizada para mensurar essa diferença é a variância. Além disso, grande parte dos processos produtivos é composta por dois ou mais estágios. Em geral, observa-se que a variabilidade de um processo em uma etapa posterior ao primeiro estágio divide-se em duas partes: a primeira, adicionada pela própria etapa e, a segunda, transmitida pela etapa anterior. Sendo assim, o estudo da contribuição de cada etapa para a variância final é de suma importância para a melhoria do processo. Assim, o desenvolvimento de estudos sobre a propagação de erros surge como uma ferramenta imprescindível para qualquer organização, já que uma vantagem imediata do monitoramento da variabilidade é a redução do custo.

Geralmente, a avaliação de um processo leva em consideração mais de uma variável de interesse. Porém, não é raro ocorrer casos em que as variáveis de interesse mensuradas em cada estágio também tenham um grau elevado de correlação e nesse caso, técnicas multivariadas são necessárias para o desenvolvimento de modelos estatísticos que consigam avaliar a propagação da variabilidade.

Dessa forma, o principal objetivo deste trabalho é propor um modelo que consiga avaliar e mensurar a propagação de erros em processos multivariados em estágios, cujas características de qualidade de interesse estejam correlacionadas. Assim, o artigo proposto encontra-se organizado em 8 seções. Na seção 2, são tratados os principais trabalhos relacio-

nados. Nas seções 3, 4 e 5, são abordados o modelo autoregressivo de propagação, o método de análise de componentes principais e o modelo autoregressivo nas componentes principais, respectivamente. A seção 6 descreve a metodologia aplicada nas simulações. A sétima seção apresenta a análise de resultados. Por fim, a oitava seção contém a conclusão do trabalho.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Os primeiros estudos sobre a transmissão da variância foram realizados em meados dos anos noventa. Dessa forma, em 1998 foi realizado um estudo da variabilidade em um sistema flexível de montagem de portas de veículos através de layout fornecido pelo programa CAD. Nesse trabalho, os padrões de variação dos componentes pré-montados e a capacidade de compensação do sistema de montagem são modelados usando uma geometria de layout do localizador (dados CAD) e por meio de uma abordagem obtida da estatística multivariada, conhecida como a Análise de Componentes Principais [1].

Em 1999, foi proposto um modelo autoregressivo de ordem 1 (AR1) para estimar a propagação da variação em estágios de um processo produtivo em relação a uma única variável de interesse, identificando qual etapa produtiva contribuía significativamente para a variabilidade do processo [2]. Em 2002, foi desenvolvido um método para avaliar a propagação da variação em um processo de usinagem por meio de um modelo de estado-espacó, baseado nas informações do projeto do produto e processo. Também foi utilizado o conceito virtual de operação para isolar as falhas e determinar as causas das mesmas [3].

Posteriormente, foi empregado um algoritmo de otimização que combina elementos finitos e programação não linear para determinar a melhor posição na fixação de componentes em um processo de montagem, de forma a minimizar a va-

riabilidade do mesmo. Com os elementos finitos foi possível construir a matriz de sensibilidade que estabelece relação linear entre os desvios de entrada com os de saída [4]. Em outro trabalho a metodologia Seis Sigma foi empregada em um processo produtivo de veículos, em especial, na Chaparia e Montagem da porta traseira, através da análise da folga, com o intuito de reduzir os desvios nas etapas produtivas [5].

Em 2007, foi apresentada uma metodologia do fluxo de variação baseada na descrição do projeto (CAD) e do processo. Essa metodologia utiliza a modelagem de espaço-estado linear que estabelece a relação entre os erros e suas causas, faz uma análise de sensibilidade para verificar o grau de impacto dos desvios na qualidade de cilindros automotivos e desenvolve a otimização do processo a fim de minimizá-lo [6].

Mais recentemente, alguns autores afirmaram que o controle de um processo é feito, otimizando cada fase do mesmo, ou seja, minimizando a transferência de desvios entre os diferentes estágios de fabricação. Para isso, foi necessária uma coordenação eficaz, capaz de dividir a produção em lotes com características semelhantes [7].

Ao longo dos últimos anos, percebe-se um aumento de trabalhos sobre a variabilidade em processos produtivos, já que o acúmulo de desvios ao longo dos diferentes estágios de fabricação pode ser extremamente prejudicial ao produto ou peça final. Assim, constatou-se um fato comum a todos esses trabalhos apresentados aqui: a existência de propagação da variância ao longo dos diferentes processos. Portanto, estudar o processo da transmissão da variabilidade ainda é um tema atual e relevante.

3. MODELO AUTOREGRESSIVO DE PROPAGAÇÃO

Em 1999, foi proposto um modelo autorregressivo (AR(1)) para estudar a transmissão da variação em processos de múltiplos estágios [2]. A escolha deste modelo é justificada visto que se desejava estudar a influência da variância entre etapas subsequentes. Dessa forma, a equação a seguir ilustra o modelo AR(1):

$$Y_i = \alpha_i + \beta_i Y_{i-1} + \varepsilon_i \quad i = 2, \dots, k \quad (1)$$

em que Y_i é a variável que representa a medida observada na etapa i e Y_{i-1} é a medida observada na etapa imediatamente anterior, onde é suposto que Y_i segue uma distribuição normal com média μ_i e variância σ_i^2 , os termos α_i e β_i representam respectivamente, os coeficientes linear e angular do modelo. Os ε_i 's representam os erros aleatórios do modelo e também seguem uma distribuição normal com média zero e variância constante σ_ε^2 . Além disso, supõe-se que os erros aleatórios e Y_i têm covariância igual à zero, ou seja, são independentes.

O principal atributo dos modelos AR (1) é que o valor atual está fortemente relacionado com o imediatamente anterior, isto é, há uma correlação na primeira defasagem entre Y_i e $Y_{(i-1)}$. Isso contribui para que os erros possam ser obtidos em cada defasagem considerada.

Assim, o AR (1) é bastante utilizado na identificação de falhas devido a sua característica preditora, ou seja, é possível comparar os valores encontrados pelo modelo com os dados reais.

Dessa maneira, a variabilidade transmitida entre dois estágios é estabelecida pela equação a seguir:

$$\sigma_i^2 = \beta_i^2 \sigma_{i-1}^2 + \sigma_{i,A}^2 \quad (2)$$

onde σ_i^2 é a variância total da etapa i ; $\sigma_{i,A}^2$ é a variância adicionada na etapa atual; σ_{i-1}^2 é a variância na etapa anterior; β_i^2 é o coeficiente responsável pela transmissão da variabilidade entre os dois estágios.

A Eq. 2 pode ainda ser generalizada pela seguinte expressão:

$$\sigma_k^2 = \beta_k^2 \sigma_{k-1,A}^2 + \dots + \beta_k^2 \beta_{k-1}^2 \dots \beta_2^2 \sigma_1^2 + \sigma_{k,A}^2 \quad (3)$$

4. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica multivariada, em que um número de variáveis relacionadas é transformado em um conjunto menor de variáveis não correlacionadas, chamadas de Componentes Principais (CP). Cada CP é uma combinação linear das variáveis originais. Assim, nesse método são geradas tantas componentes quanto variáveis, mas a grande vantagem da técnica é que, em geral, poucas componentes explicam a maior parte da variabilidade do conjunto de variáveis originais. Dessa forma, se p componentes representam a variabilidade total de um conjunto de p variáveis originais, a maior parte desta variabilidade pode ser explicada por k componentes ($k < p$). Então, k componentes podem substituir as p variáveis iniciais, reduzindo a dimensão do conjunto de dados.

Seja X um vetor aleatório com vetor de médias μ e matriz de covariâncias ou de correlação, $\Sigma_{p \times p}$, com λ_i autovalores e e_i os autovetores (normalizados) que obedecem às condições: $e_i^T e_j = 0$ ($i \neq j$); $e_i^T e_i = 1$ (para todo i) e $\Sigma_{p \times p} e_i = \lambda_i e_i$ (para todo i). A j -ésima componente principal é dada pela Eq. 4.

$$Y_j = e_j^T X = e_{j1} X_1 + e_{j2} X_2 + \dots + e_{jp} X_p \quad (4)$$

A Fig.1 retrata um esquema de como funciona o método.



Fig. 1 – Resumo do Método ACP. Fonte: [próprios autores].

Dessa forma, como grande parte da variabilidade das variáveis originais é explicada por poucas componentes principais, pode-se dizer que, se mais de 80% da variância total pode ser explicada por duas ou três componentes, então estas componentes podem substituir as variáveis originais sem perda de informação [8].

5. MODELO AUTOREGRESSIVO NAS COMPONENTES PRINCIPAIS

O modelo autoregressivo de ordem um, descrito na seção anterior, servirá de base para o modelo autoregressivo nas componentes principais. Dessa forma, a componente principal do estágio i pode ser modelada em função da componente

principal da etapa anterior, conforme pode ser visto na Eq. 5 a seguir:

$$CP_i = \alpha_i + \beta_i CP_{i-1} + \varepsilon_i \quad (5)$$

Aplicando a variância na i-ésima componente principal, tem-se:

$$\sigma_{CP_i}^2 = \beta_i^2 \sigma_{CP_{i-1}}^2 + \sigma_{\varepsilon_i}^2 \quad (6)$$

Por analogia, todas as suposições e definições aplicadas ao modelo autorregressivo dado pela Eq. 1 continuam válidas para a Eq. 5. Assim, os termos α_i e β_i representam também os coeficientes linear e angular do modelo e ε_i representa o i-ésimo erro aleatório, também conhecido por resíduo. Considera-se que os resíduos e as CP's sejam independentes.

Na prática, as equações 5 e 6 podem ser estimadas por meio das equações de 7 a 11, que representam respectivamente os estimadores da covariância das CP's entre os estágios, da variância das CP's, dos coeficientes angular e linear e da variância adicionada no próprio estágio.

$$S_{i-1,i} = \frac{\sum_{j=1}^n (CP_{j,i-1} - \bar{CP}_{i-1})(CP_{j,i} - \bar{CP}_i)}{n} \quad (7)$$

$$S_{ii} = \frac{\sum_{j=1}^n (CP_{j,i} - \bar{CP}_i)^2}{n} \quad (8)$$

$$\beta_i = \frac{S_{i-1,i}}{S_{i-1,i-1}} \quad (9)$$

$$\alpha_i = \bar{CP}_i - \beta_i \bar{CP}_{i-1} \quad i=2,\dots,k \quad (10)$$

$$\sigma_{\varepsilon_i}^2 = S_{ii} - \beta_i(S_{i-1,i}) \quad i=2,\dots,k \quad (11)$$

6. METODOLOGIA

Neste tópico, apresenta-se a metodologia utilizada nas simulações. Dessa forma, a ideia é simular um processo produtivo formado por dois estágios, em que cada estágio é composto por quatro variáveis conforme a Fig. 2, em que as mesmas são correlacionadas em diferentes níveis. Assim, para cada estágio foram geradas 100 amostras dessas quatro variáveis, todas seguindo uma distribuição normal com média zero e variância um.

Considerou-se ainda, três tipos de correlação entre as variáveis de cada estágio, a saber: forte, moderada e fraca, e mais três tipos de relacionamento entre os estágios, conforme pode ser visto na Fig. 3. Assim, para a primeira simulação, considera-se que as variáveis em cada estágio são fortemente correlacionadas entre si, considerando ainda três tipos de correlação entre os estágios. Para a segunda e terceira simulação foram estabelecido respectivamente relações moderadas e fracas entre as variáveis e ainda foram levadas em conta as referidas correlações entre os estágios.

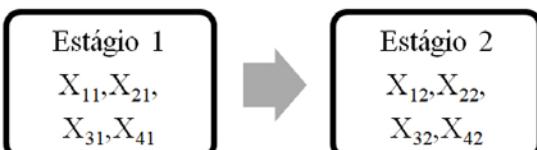


Fig. 2 – Representação de variáveis nos estágios. Fonte: [próprios autores].

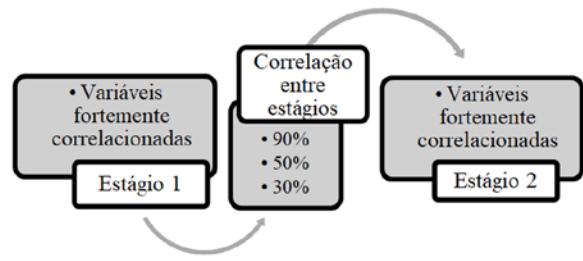


Fig. 3 – Esquema dos casos simulados considerando variáveis em cada estágio fortemente correlacionadas. Fonte: [próprios autores].

A partir de cada grupo de variáveis em cada estágio foram obtidas as componentes principais, selecionando a componente que mais explica a variabilidade das variáveis originais. Em seguida, é aplicado o modelo proposto entre as componentes selecionadas de cada estágio, isto é, a componente do segundo estágio é regredida em função da componente do primeiro estágio, conforme Fig. 4.

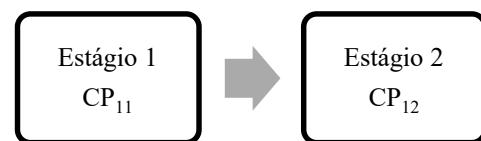


Fig. 4 – Representação de componentes principais nos estágios. Fonte: [próprios autores].

Embora sejam obtidas tantas componentes como variáveis, pela teoria da ACP, as primeiras componentes serão sempre responsáveis pela maior explicação da variabilidade das variáveis originais. Assim, o modelo proposto utilizará apenas as primeiras componentes principais de cada estágio.

7. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados referentes à metodologia descrita na seção anterior.

7.1 Resultados da simulação 1

Depois de geradas as variáveis fortemente correlacionadas em cada estágio de acordo com a metodologia, foram obtidas as componentes principais para o primeiro e o segundo estágios, considerando as três relações entre os estágios. Pela Tab. 1, observa-se que 95,80% da variância total, referente às quatro variáveis do estágio 1, é explicada quase totalmente por uma única componente principal, ou seja, a estrutura de variância e covariância das quatro variáveis originalmente simuladas pode ser representada por apenas uma componente principal, sem perda significativa de informação. A Tab. 1 apresenta o percentual de variância explicada por cada componente.

Tabela 1: Percentual total da variância explicada pelas CP's
Simulação 1 Estágio 1.

% CP1	% CP2	% CP3	% CP4
95.8%	4.20%	0.00%	0.00%

Para o estágio 2, conforme descrito na metodologia, foram considerados três casos de relacionamento entre os estágios. Assim, de acordo com a Tab. 2. Para uma correlação de 90%, a primeira componente representa 83,10% do

total da variância explicada. No caso 2, a CP1 responde por 46,40% das variações presentes no estágio 2. Enquanto que, no caso 3, esse valor cai para 39,10%, devido principalmente a menor correlação entre os estágios.

Tabela 2: Percentual total da variância explicada pelas CP's Simulação 1 Estágio 2.

Caso	% CP1	% CP2	% CP3	%CP4
1 (90%)	83.10%	8.70%	5.00%	3.20%
2 (50%)	46.40%	24.20%	17.90%	11.50%
3 (30%)	39.10%	26.50%	21.00%	13.40%

Analizando as tabelas 1 e 2, observa-se que quando as variáveis originalmente geradas são fortemente correlacionadas, as primeiras componentes principais de cada estágio se tornam responsáveis por quase a totalidade da variabilidade das variáveis originais, principalmente no estágio 1. Dessa forma, aplicou-se o modelo proposto, considerando as primeiras componentes em cada estágio. As figuras 5, 6 e 7 revelam como se propaga a variância entre estágios.

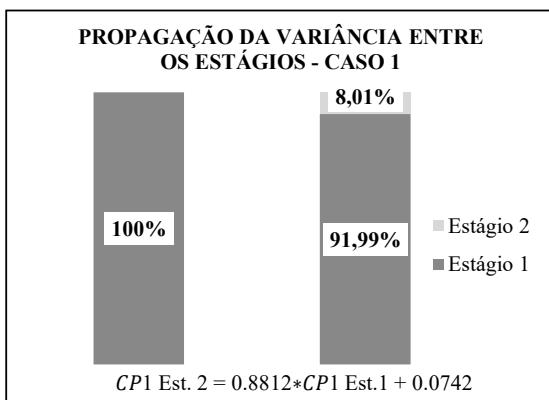


Fig. 5 – Variabilidade entre estágios - Simulação 1 caso 1.

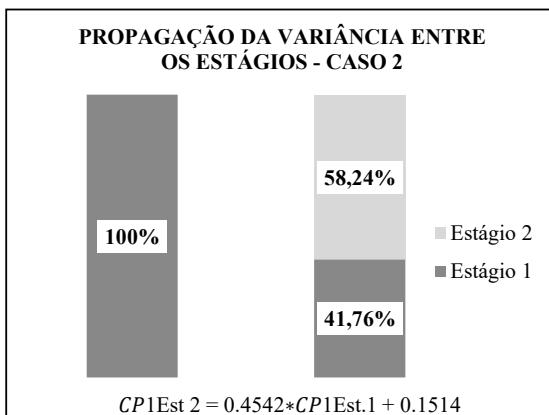


Fig. 6 – Variabilidade entre estágios - Simulação 1 caso 2.

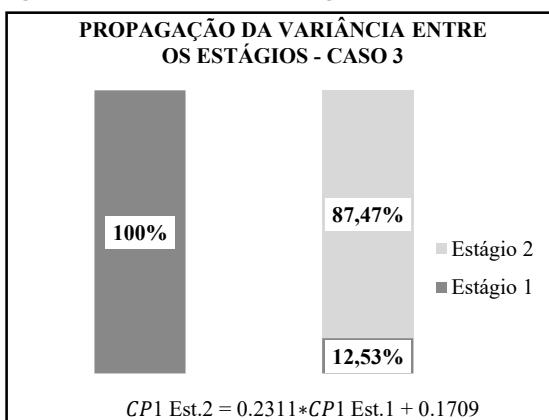


Fig. 7 – Variabilidade entre estágios - Simulação 1 caso 3.

A Fig. 5 apresenta que 91,99% da variabilidade presente no estágio 2 foi originada no estágio anterior. Isso significa que um erro no estágio anterior é quase totalmente propagado para a etapa seguinte. É possível ainda notar por meio das figuras 6 e 7 que, conforme a relação entre os estágios diminui, cai também a transmissão do erro.

7.2 Resultados da simulação 2

As variâncias explicadas pelas componentes principais no estágio 1 para a simulação 2 são apresentadas na Tab. 3. Já a Tab. 4 apresenta os valores das variâncias explicadas no estágio 2 de acordo com cada nível de correlação entre os estágios. Assim, analisando a Tab. 3, verifica-se que a primeira componente principal representa 78,60% da variabilidade do conjunto das quatro variáveis, o que indica que as quatro variáveis originais podem ser representadas por uma única componente principal.

Tab 3: Percentual total da variância explicada pelas CP's Simulação 2 Estágio 1.

% CP1	% CP2	% CP3	%CP4
78.60%	21.40%	0.00%	0.00%

Além disso, observando a Tab. 4, é possível afirmar que no primeiro caso, a CP1 corresponde a 68,10% da variância total, enquanto que a CP1 do segundo caso, explica somente 34,60% e para o terceiro caso, tem-se que apenas 31% do sistema pode ser representado por uma única CP. No entanto, as primeiras CP's de cada caso serão adotadas para simulação do modelo proposto, visto que, no primeiro estágio, foi utilizada apenas uma componente.

Tabela 4: Percentual total da Variância explicada pelas CP's simulação 2 Estágio 2.

Caso	% CP1	% CP2	% CP3	%CP4
1 (90%)	68.10%	22.30%	5.40%	4.20%
2 (50%)	34.60%	28.00%	21.60%	15.80%
3 (30%)	31.00%	26.00%	24.60%	18.40%

Observe que, embora as variáveis nos estágios estejam moderadamente correlacionadas, as primeiras componentes principais ainda conseguem um alto grau de explicação no primeiro estágio, especialmente quando existe um forte relacionamento entre os estágios. As figuras 8, 9 e 10 retratam a propagação da variância entre os dois estágios em relação à primeira componente principal, visto que a mesma representa a maior parte da variabilidade das variáveis.

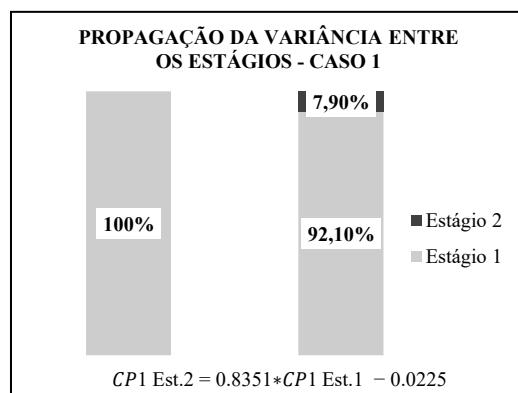


Fig. 8 – Variabilidade entre estágios - Simulação 2 caso 1.

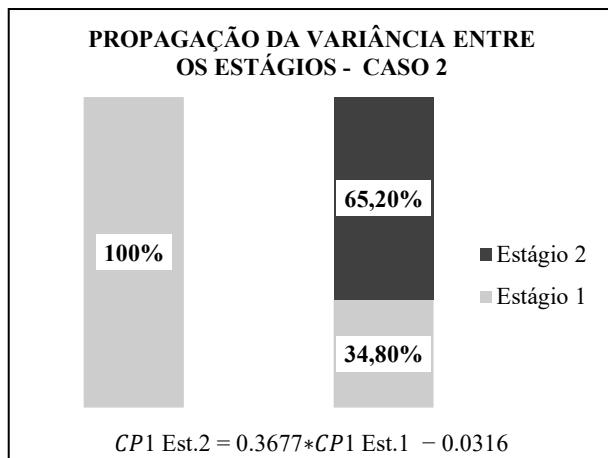


Fig. 9 – Variabilidade entre estágios - Simulação 2 caso 2.

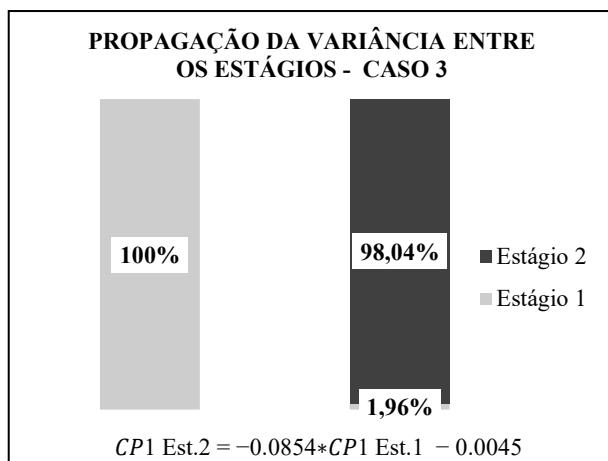


Fig. 10 – Variabilidade entre estágios - Simulação 2 caso 3.

Pela Fig. 8, observa-se que a propagação da variabilidade entre estágios foi de 92,10% para o caso 1 da simulação 2. Já pela Fig. 9, tem-se que a transmissão da variação foi de 34,80% no caso 2. Por fim, a Fig. 10 mostra que, no segundo estágio, apenas 1,96% da variância foi proveniente do estágio anterior e que 98,04% dos erros foram gerados no próprio estágio.

7.3 Resultados da simulação 3

Conforme a Tab. 5. Percebe-se, que na simulação 3, tal como foi observado nas simulações anteriores, também se pode utilizar uma única CP, visto que a mesma representa mais de 70% da variância total das variáveis originais no primeiro estágio.

Tab 5: Percentual total da variância explicada pelas CP's Simulação 3 Estágio 1.

% CP1	% CP2	% CP3	% CP4
75.10%	24.90%	0.00%	0.00%

A Tab. 6 apresenta os valores da variabilidade total explicada por cada componente principal no estágio 2 para cada tipo de correlação especificada. Nesse caso, ainda serão utilizadas apenas as primeiras CP's.

Tabela 6: Percentual total da variância explicada pelas CP's Simulação 3 Estágio 2.

Caso	% CP1	% CP2	% CP3	% CP4
1 (90%)	62.50%	25.60%	6.70%	5.20%
2 (50%)	31.90%	28.00%	22.40%	17.70%
3 (30%)	29.10%	26.10%	24.60%	20.20%

Analizando a Fig. 11, observa-se que a propagação de erros entre os estágios foi de 91,28%.

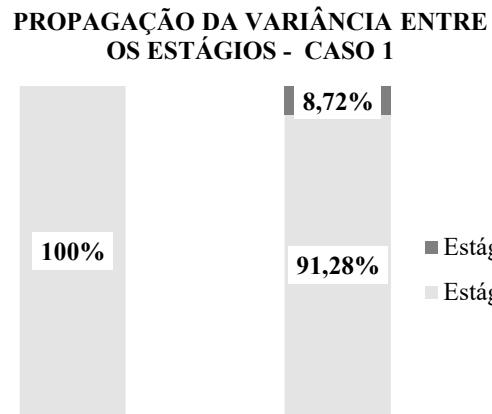


Fig. 11 – Variabilidade entre estágios - Simulação 3 caso 1.

A Fig. 12 mostra que a variância transmitida entre os estágios foi de 38,95% para a primeira componente no caso 2 da simulação 3 e, no caso 3 (Fig. 13), a propagação de desvios foi somente de 0,5%, conforme era esperado, na medida que a correlação entre as variáveis era de apenas 30% e a relação entre os estágios era fraca.

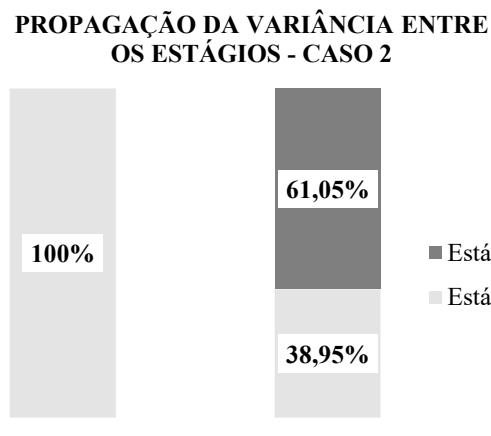


Fig. 12 – Variabilidade entre estágios - Simulação 3 caso 2.

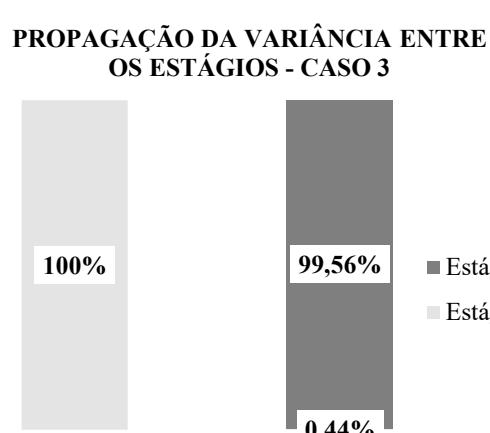


Fig. 13 – Variabilidade entre estágios - Simulação 3 caso 3.

8. CONCLUSÃO

Após analisar os casos simulados, conclui-se que o modelo autoregressivo nas Componentes Principais foi capaz de captar a variação vinda do estágio anterior, mostrando-se promissor para aplicação em casos reais. Além disso, observou-se que quanto maior for a correlação entre as variáveis de interesse, maior será a capacidade da técnica de Análise de Componentes Principais em reduzir o número de variáveis, devido ao elevado percentual da variância explicada pelas componentes, em especial pela primeira componente. Em consequência, maior será a captação da propagação dos desvios entre as etapas.

Em resumo, pode-se afirmar que os modelos autoregressivos nas componentes principais são válidos para avaliar o comportamento da propagação da variância em processos multivariados em estágios. Por meio deles, é possível identificar qual a etapa é responsável pela maior variabilidade do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ceglarek, D.J. Multivariate Analysis and Evaluation of Adaptive Sheet Metal Assembly Systems. The University of Michigan. 1998.
- [2] Lawless, J.F., Mackay, R.J., Robinson, J.A. Analysis of variation transmission in manufacturing processes – Part 1. Journal of Quality Technology, v.31, n.2, 1999.
- [3] Huang, Q., Zhou, S., Shi, J. Diagnosis of multi-operational machining processes through variation propagation analysis. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 18, p.233-239, 2002.
- [4] Camilio, J. A., Hu S. J., Ceglarek, D. Impact of Fixture Design on Sheet Metal Assembly Variation. Journal of Manufacturing Systems, v.23, n.3, 2004.
- [5] Gaio, A. P.C., Sá, F.C. O Uso da Metodologia Seis Sigma em um Processo da Indústria Automotiva por Meio de um Estudo de Caso. Trabalho Graduação em Engenharia de Produção. UERJ. Resende. 2004.
- [6] Zhang, M., Djurdjanovic, D., Ni, J. Diagnosibility and sensitivity analysis for multi-station machining processes. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, p.646-657, 2007.
- [7] Han, K., Wang, K. Coordination and control of batch-based multistage processes. Journal of Manufacturing Systems 32, p.372-381, 2013.
- [8] Johnson, R.A., Wichern, D.W. Applied Multivariate Statistical Analysis. 6^a ed. Pearson Prentice Hall. 2007



BIBLIOTECA
EXERCITO

Missão

Contribuir para o provimento, a edição e a difusão de meios bibliográficos e informações necessárias ao desenvolvimento e ao aperfeiçoamento da cultura profissional-militar e geral dos públicos interno e externo.

Visão do futuro

Ser referência nacional e internacional pela excelência na publicação de acervos bibliográficos que sejam instrumentos de promoção de cultura e de cidadania para públicos interno e externo

Princípios, crenças e valores

Culto aos valores e às tradições militares;
Competência técnico-profissional;
Confiabilidade; Planejamento.

