

FREQUENCY ASSESSMENT OF MARITIME ACCIDENTS USING BAYESIAN POPULATION VARIABILITY ANALYSIS

Paulo Gabriel Santos Campos de Siqueira, Márcio das Chagas Moura

Centro de Estudos e Ensaios em Risco e Modelagem Ambiental – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Heitor de Oliveira Duarte

Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

ABSTRACT

Industrial accidents, such as toxic spills, have caused catastrophic environmental damage to animals and plants. The high number of vessels, including oil tankers that circulate the globe and extreme events such as storms and tropical cyclones due to global warming, increase the risk of potential oil spills affecting oceanic islands. The frequency estimate is a fundamental step in any risk assessment. However, some types of accidents correspond to extreme events, i.e., low frequency-high consequences events. In this context, classical statistical approaches are ineffective since available data is generally sparse and contain censored recordings. Thus, we propose a Bayesian population variability method to estimate the distributions of the accident rates. We can integrate sparse data from accident databases with judgements of experts such as pilots, captains and chief officers. Moreover, this assessment is used in the real case of oil tankers that navigate nearby the Fernando de Noronha Archipelago (FNA). The frequency results will be incorporated into a further Quantitative Ecological Risk Assessment (QERA).

1. INTRODUÇÃO

Vazamentos de petróleo no mar têm causado danos ambientais catastróficos a animais e plantas. O elevado número de embarcações, incluindo petroleiros que circulam pelo globo, além de eventos extremos como tempestades e ciclones tropicais devido ao aquecimento global, aumentam o risco de possíveis derramamentos de óleo afetando ilhas oceânicas. Apesar dos imensos esforços das autoridades marítimas internacionais e nacionais para aumentar a segurança dos navios ao longo dos anos, muitos acidentes marítimos ainda podem ocorrer [1], [2]. Há ainda um aumento no transporte marítimo de volume de petróleo, sendo os petroleiros responsáveis por cerca de 90% do petróleo transportado mundialmente [3].

Por exemplo, na década de 2010, ocorreram 63 derramamentos, liberando 164 mil toneladas de óleo, sendo a menor quantidade de óleo vazada nas últimas décadas [1]. No contexto brasileiro, derramamento de óleo de origem ainda desconhecida atingiu o litoral nordestino em 2019, e recentemente foram reportados fragmentos de óleo chegando ao arquipélago de Fernando de Noronha (AFN) [4], [5]. Além de ameaçar a vida da tripulação e resultar em perdas econômicas significativas, os derramamentos de óleo estão entre os poluentes mais perigosos para a contaminação marinha, com impactos catastróficos nos ambientes e ecossistemas dos países costeiros [3]. Os derramamentos de óleo recentes são causados principalmente por colisão, incêndio e explosão e são definidos como segue [6]:

- Colisão: atropelar ou ser atingido por outro navio, independentemente de estar em movimento, fundeado ou atracado;
- Incêndio: incidentes em que o incêndio é o evento inicial;
- Explosão: incidentes em que a explosão é o evento inicial.

1 MS, Engenheiro Mecânico – EMPRESA

2 PhD, Engenheiro Elétrico - EMPRESA

3 MS, Consultor - EMPRESA

Normalmente é preciso tratar de uma população heterogênea de embarcações sujeitas a diferentes condições ambientais e operacionais e outras características que podem alterar sua taxa de acidentes (por exemplo, ondas, marés, tráfego marítimo na rota). Portanto, é essencial analisar a variabilidade dessas taxas ao longo de toda a população de navios. No entanto, ao considerar acidentes em um local específico, pode haver carência de informações ou dados específicos. Outras fontes, como dados de áreas semelhantes (por exemplo, mesmas condições meteorológicas) e julgamentos de especialistas podem ser usados para estimar melhor essas taxas.

Portanto, este trabalho propõe um método bayesiano para estimar as taxas de acidentes no transporte marítimo que podem levar a derramamentos de óleo. Consideramos que cada navio tem uma taxa única de acidentes. A Análise de Variabilidade Populacional Bayesiana (AVPB), também conhecida como o primeiro estágio em uma análise Bayesiana de dois estágios, ou Bayes hierárquico [7], irá estimar a distribuição da variabilidade dentro de um grupo de navios não homogêneos. O método proposto também é uma tentativa de cobrir as desvantagens de métodos como a Avaliação Formal de Segurança (AFS) [6], como a incapacidade de quantificar os riscos e a falta de confiabilidade e eficácia quando o conhecimento subjetivo é usado na ausência de dados históricos. [8].

Como estudo de caso, consideramos os petroleiros que trafegam próximo ao Arquipélago de Fernando de Noronha (FNA), que possui o maior número de espécies marinhas e terrestres, atribuídas à sua extensão e heterogeneidade de habitats. O AFN possui o status de Unidade de Conservação, protegendo espécies endêmicas e mantendo um ecossistema insular saudável [9]. Dois terços do AFN consistem no Parque Nacional Marinho (PARNAMAR-FN), uma Área Marinha Protegida que atinge a linha isobática de 50 metros [10]. No entanto, o AFN carece de infraestrutura e planos de mitigação caso precise lidar com um derramamento de óleo, o que poderia intensificar os impactos do acidente [11].

2. DESCRIÇÃO

A principal suposição é de que a taxa de acidentes é uma expressão que reflete a incerteza sobre o sistema de interesse; neste contexto, os navios petroleiros. Esta suposição é semelhante às afirmações de Singpurwalla [12] no contexto de uma abordagem bayesiana para análise de confiabilidade. Assim, dada a incerteza quanto à taxa de acidentes de cada navio, pode-se obter a variabilidade da incerteza de toda a população, que pode ser representada como uma distribuição de probabilidade, denominada Distribuição da Variabilidade Populacional (DVP), e sua avaliação é realizada através de a Análise de Variabilidade Populacional (AVP).

Desde que, esta seção apresenta os fundamentos que apoiam a Análise de Variabilidade Populacional Bayesiana (AVPB) [7], [13]. Como um procedimento típico de AVP, assume-se que uma família de distribuições paramétricas descreve a DVP. Seja λ uma variável aleatória que define a taxa de acidentes e $\phi(\lambda) = \phi(\lambda|\theta_1, \dots, \theta_p)$ uma DVP paramétrica com p parâmetros. Uma distribuição de probabilidade $\pi(\underline{\theta}) = \pi(\theta_1, \dots, \theta_p)$ sobre os parâmetros do modelo podem ser usados para descrever a incerteza sobre a DVP. Então, a densidade de variabilidade populacional estimada $\hat{p}(\lambda)$ pode ser dada por:

$$\hat{p}(\lambda) = \int \dots \int_{\theta_1, \dots, \theta_p} \phi(\theta_1, \dots, \theta_p) \pi(\theta_1, \dots, \theta_p) d\theta_1 \dots d\theta_p \quad (1)$$

Portanto, $\hat{p}(\lambda)$ consiste em uma mistura ponderada de distribuições do modelo escolhido, ao invés de ser formada por uma única melhor distribuição preferencialmente obtida a partir do conjunto de distribuições possíveis, por exemplo, usando Estimadores de Máxima Verossimilhança [14]. Na APVB, a avaliação de λ pode ser baseada em três tipos diferentes de informação:

- E_0 : conhecimento a priori do estado sobre λ , como a experiência do analista com o sistema ou componente;
- E_1 : dados de exposição (tempo de execução) da experiência operacional com sistemas semelhantes em aplicações semelhantes (e.g., banco de dados de acidentes marítimos);
- E_2 : estimativas sobre a medida do acidente λ de fontes como opiniões de especialistas.

E_0 é a evidência a priori e fornece informações sobre $\pi(\underline{\theta})$. Em outras palavras, $\pi_0(\underline{\theta}) = \pi(\underline{\theta}|E_0)$ é a distribuição de probabilidade a priori sobre os parâmetros $\underline{\theta}$ e $\hat{p}_0(\lambda) = \hat{p}(\lambda|E_0) = \int_{\underline{\theta}} \phi(\lambda|\underline{\theta})\pi_0(\underline{\theta})d\underline{\theta}$ é a DVP a priori de λ . A evidência E_1 inclui os dados disponíveis obtidos a partir de conjuntos de dados de acidentes. Os dados consistem no número de ocorrências de cada acidente (i.e., colisão, incêndio e explosão) anualmente ou dentro de uma determinada janela de tempo. Além disso, E_2 inclui estimativas de opiniões de especialistas sobre a ocorrência de acidentes. No caso deste trabalho, foram obtidas por meio de um questionário. Nas seções a seguir, considera-se também avaliar a confiança do analista na estimativa de um determinado especialista.

Portanto, podemos desenvolver a distribuição dos parâmetros de variabilidade populacional com base nos tipos de informação E_0 , E_1 e E_2 aplicando o teorema de Bayes

$$\pi_2(\underline{\theta}) = \pi(\underline{\theta}|E_0, E_1, E_2) = \frac{P(E_1, E_2|\underline{\theta}, E_0)\pi_0(\underline{\theta})}{\int_{\underline{\theta}} \phi P(E_1, E_2|\underline{\theta}, E_0)\pi_0(\underline{\theta})d\underline{\theta}} \quad (2)$$

onde $P(E_1, E_2|\underline{\theta}, E_0)$ é a verossimilhança das evidências E_1 e E_2 . Então, a DVP de λ , condicionada a E_0 , E_1 , e E_2 i.e., a DVP posteriori é denotada por $\hat{p}_2(\lambda) = \hat{p}(\lambda|E_0, E_1, E_2) = \int_{\underline{\theta}} \phi(\lambda|\underline{\theta})\pi_2(\underline{\theta})d\underline{\theta}$.

3. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Foi feita a aplicação da AVPB usando conjuntos de dados reais de acidentes marítimos e julgamentos de especialistas sobre acidentes próximos ao AFN e obter as taxas de ocorrência de colisão, incêndio e explosão. Ambos os tipos de dados foram usados para construir a função de verossimilhança ($P(E_1, E_2|\underline{\theta}, E_0)$). Portanto, foi obtida distribuição de variabilidade populacional de cada acidente.

Os resultados obtidos mostram que, baseado somente nos bancos de dados de acidentes marítimos, as modas (i.e., valor mais provável) da DVP das taxas dos acidentes são as seguintes: $\lambda_{colisão} = 1.05E - 2 \text{ ano}^{-1}$, $\lambda_{incêndio} = 1.77E - 3 \text{ ano}^{-1}$ e $\lambda_{explosão} = 2.13E - 4 \text{ ano}^{-1}$. Dentre os acidentes analisados, colisões são os mais prováveis de acontecer, enquanto explosões são mais raras. Incluindo as opiniões dos especialistas, têm-se as novas taxas dos acidentes: $\lambda_{colisão} = 1.30E - 2 \text{ ano}^{-1}$, $\lambda_{incêndio} = 3.52E - 3 \text{ ano}^{-1}$ e $\lambda_{explosão} = 2.35E - 4 \text{ ano}^{-1}$.

É possível notar que houve um aumento nas estimativas das taxas. No entanto, ao agregar opiniões de especialistas, a maior quantidade de dados aumenta a robustez do modelo fornecendo estimativas mais confiáveis. Com esses resultados mais confiáveis, é possível realizar a etapa de avaliação de frequência de uma avaliação de riscos de modo mais consistente. Uma vez que, além de se obter informações sobre a ocorrência dos acidentes, há ainda a incerteza associada com essas informações, de modo a auxiliar na tomada de decisão sob incertezas.

4. CONCLUSÃO

O modelo apresentado neste artigo é baseado no método da Análise de Variabilidade Populacional Bayesiana, que permite avaliar as distribuições da variabilidade populacional de acidentes marítimos (i.e., colisão, incêndio e explosão) a partir de bancos de dados de acidentes marítimos e opiniões de especialistas. A AVP permite o tratamento da incerteza nas medidas de interesse.

O modelo foi alimentado com bases de dados disponíveis de acidentes marítimos notificados. No entanto, alguns locais, como é o caso do AFN, carecem de dados sobre acidentes. Assim, pode-se usar o conhecimento subjetivo de especialistas para complementar as informações, levando a um modelo com melhor performance. De fato, os resultados mostraram que, em geral, os limites de incerteza da distribuição da variabilidade posterior cumulativa diminuíram quando as opiniões foram incluídas. Portanto, com limites e incerteza mais estreitos, as estimativas são mais confiáveis.

Essas estimativas de frequências mais confiáveis permitem realizar avaliações de risco de melhor qualidade. Permitindo incorporar resultados melhores, além de incluir a incerteza inerente ao sistema que se está sendo analisado. Portanto, uma avaliação de riscos com essas características pode servir para auxiliar na tomada de decisões em situações de incerteza.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Recursos Humanos (PRH) da Agência Nacional de Petróleo (ANP) 38.1: Análise de Riscos e Modelagem Ambiental na Exploração, Desenvolvimento e Produção de Petróleo e Gás (nº de processo 044819), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Finance Code 001 – pelo apoio financeiro no desenvolvimento desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ITOF, “Oil Spill Tanker Statistics 2020,” London, UK, 2021.
- [2] S.-T. Ung, “Evaluation of human error contribution to oil tanker collision using fault tree analysis and modified fuzzy Bayesian Network based CREAM,” *Ocean Eng.*, vol. 179, pp. 159–172, May 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.031.
- [3] J. Chen, W. Zhang, Z. Wan, S. Li, T. Huang, and Y. Fei, “Oil spills from global tankers: Status review and future governance,” *J. Clean. Prod.*, vol. 227, pp. 20–32, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.020.
- [4] J. Daniel, “Comissão Externa sobre o Derramamento de Óleo no Nordeste,” Brasília, 2019. [Online]. Available: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=532824DCF770C9B593CD68464F7BB330.proposicoesWebExterno2?codteor=1843890&filename=RRL+1/2019+CEXOLEO.
- [5] ICMBio, “Operação Emergencial ao Aporte Atípico de Fragmentos de Óleo e Lixo Marinho nas Localidades do Mar de Fora de Fernando de Noronha,” 2021.
- [6] IMO, *Formal Safety Assessment - Crude Oil Tankers*. London: International Maritime Organisation, 2008.
- [7] E. L. Droguett, F. Groen, and A. Mosleh, “The combined use of data and expert estimates in population variability analysis,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 83, no. 3, pp. 311–321, Mar. 2004, doi: 10.1016/j.ress.2003.10.007.
- [8] M. Jiang, J. Lu, Z. Yang, and J. Li, “Risk analysis of maritime accidents along the main route of the Maritime Silk Road: a Bayesian network approach,” *Marit. Policy Manag.*, vol. 47, no. 6, pp. 815–832, Aug. 2020, doi: 10.1080/03088839.2020.1730010.
- [9] T. Z. Serafini and G. França, “Ilhas oceânicas brasileiras: biodiversidade conhecida e sua relação com o histórico de uso e ocupação humana,” *Rev. Gestão Costeira Integr. / J. Integr. Coast. Zo. Manag.*, vol. 10, no. 3, pp. 281–301, 2010.
- [10] ICMBio, “PARNAMAR - Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha,” vol. 2013, no. oct 24. 2013, [Online]. Available: <http://www.parnanoronha.com.br/paginas/91-o-parque.aspx>.
- [11] S. Queiroz, L. Fazekas, M. A. Silva, and M. Araújo, “Simulation of Oil Spills Near a Tropical Island in the Equatorial Southwest Atlantic,” *Trop. Oceanogr.*, vol. 47, no. 1, pp. 17–37, 2019, doi: 10.5914/tropocean.v47i1.243115.
- [12] N. D. Singpurwalla, *Reliability and Risk: a Bayesian perspective*. The George Washington University, Washington DC, USA: John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- [13] M. das C. Moura *et al.*, “Estimation of expected number of accidents and workforce unavailability through Bayesian population variability analysis and Markov-based model,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 150, pp. 136–146, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.ress.2016.01.017.
- [14] M. Modarres, M. Kaminskiy, and V. Krivtsov, *Reliability Engineering and Risk Analysis*, vol. 53, no. 9. New York - Basel: Marcel Dekker, 1999.