

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA DAS
OPERAÇÕES DE MOVIMENTAÇÃO DE CARGA DE UM
FPSO COM O FRAM (FUNCTIONAL RESONANCE
ANALYSIS METHOD) E PETRO-HRA (HUMAN
RELIABILITY ANALYSIS)**

AUTORES:

André L. A. Santos¹, Samuel M A Junior², Gabriela R M Santos³, Evandro Abramov⁴, Josue E M Franca⁵

INSTITUIÇÃO:

¹Laboratório de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PGBio), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia.

²Programa de Pós-graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade (PPGIES), UNILA - Universidade Federal da Integração Latino-americana

³Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense

⁴Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais aplicadas, Universidade Federal do ABC

⁵ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP Departamento de Engenharia de e-mail do autor correspondente: andreluis.andradesantos@gmail.com

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA DAS OPERAÇÕES DE MOVIMENTAÇÃO DE CARGA DE UM FPSO COM O FRAM (FUNCTIONAL RESONANCE ANALYSIS METHOD) E PETRO-HRA (HUMAN RELIABILITY ANALYSIS)

Resumo

A Análise de Confiabilidade Humana (ACH) é um método estruturado para identificar e analisar potenciais eventos de falha humana. É caracterizada por permitir avaliar possíveis interferências na correta execução de uma atividade e propor medidas de redução da Probabilidade de Erro Humano (PEH), fornecendo subsídio para sua priorização destas medidas. Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo ampliar a compreensão de quais fatores influenciadores de performance afetam diretamente atividades de operações e manutenções dos FPSOs (do inglês *Floating Production Storage and Offloading*) por meio de um estudo de caso baseado no procedimento de movimentação manual de cargas, a ser analisado sob a ótica de duas metodologias de ACH. A primeira, FRAM, permite o reconhecimento e análise das complexas interações envolvendo trabalhadores, equipamentos, sistemas e ambiente *offshore*, além de permitir a análise do trabalho destacando a diferença entre o planejado e o executado. Já a segunda, Petro-HRA, permite a quantificação da PEH na execução da tarefa analisada, subsidiando a gestão de segurança baseada em risco. A aplicação das técnicas combinadas permitiu identificar a tarefa crítica de movimentação de lança de guindaste em manobra de recebimento de carga por embarcações de apoio, sendo atribuída uma probabilidade de erro humano em $5,0 \times 10^{-3}$ erros por oportunidade, superior ao valor nominal da técnica aplicada equivalente a $1,0 \times 10^{-3}$ erros por oportunidade. Tal condição fora elegível para adoção de recomendações para promover redução do PEH.

Palavras-chave: ACH, FRAM, Petro-HRA

Abstract

Human Reliability Analysis (HRA) is a structured method to identify and analyze potential human failure events. It allows evaluating possible interferences in the correct execution of an activity and proposing measures to reduce the Probability of Human Error (PHE), providing support for prioritizing these measures. In this context, the present article aims to enhance the understanding of which influencing performance factors directly affect operations and maintenance activities of Floating Production Storage and Offloading (FPSO) units through a case study based on the manual handling procedure of loads, to be analyzed from the perspective of two HRA methodologies. The first one, FRAM, allows recognizing and analyzing the complex interactions involving workers, equipment, systems, and offshore environment, in addition to highlighting the difference between the planned and executed work. The second one, Petro-HRA, enables the quantification of PHE in the execution of the analyzed task, supporting risk-based safety management. The combined application of these techniques allowed identifying the critical task of crane boom movement in cargo receiving maneuver by support vessels, with a human error probability of 5.0×10^{-3} errors per opportunity, higher than the nominal value of the applied technique, which is equivalent to 1.0×10^{-3} errors per opportunity. This condition was eligible for the adoption of recommendations to promote PHE reduction.

Keywords: ACH, FRAM, Petro-HRA

Introdução

A Análise de Confiabilidade Humana (ACH) tem sido alvo de investigação no setor de petróleo e gás, uma vez que são recorrentes acidentes cujo fator humano se apresenta como causa básica. Nesse sentido, os autores Kandermir & Celik (2023) realizaram um levantamento bibliográfico sobre as abordagens utilizadas na análise de confiabilidade humana (ACH) em operações marítimas (plataformas offshore) e mencionaram a importância da análise no ambiente sociotécnico complexo, com a necessidade contínua de adaptação e inovação dos processos para enfrentar os desafios atuais e futuros da indústria de óleo e gás em todo o mundo. Em colaboração à temática, Levine *et al.*, (2024), enfatizam a importância da ACH desde a análise do ambiente, até a identificação e caracterização dos eventos de falha humana.

Na literatura, existem vários métodos para análise de confiabilidade humana (Zarei, et al., 2021; Kariuki & Löwe, 2007), no presente estudo foram abordados dois deles: *Functional Resonance Analysis Methos (FRAM)* e *Petroleum Human Reliability Analysis* (Petro-HRA). O primeiro é um método utilizado análise de ocorrências em ambientes sociotécnicos complexos. Este se concentra nas funções desempenhadas pelos elementos do sistema, em vez de se basear na decomposição estrutural e seu objetivo é entender como as interações entre as funções do sistema podem levar a resultados indesejados, como acidentes (Grabbe, et al., 2022; Zheng, et al., 2024). Já o Petro-HRA é um método de análise de confiabilidade humana aplicado à indústria de petróleo. Ele permite a identificação, modelagem e avaliação sistemática de tarefas relacionadas a acidentes graves (Bye, et al., 2022) de maneira qualitativa e quantitativa. Embora tenha sido inicialmente desenvolvido para a avaliação de tarefas críticas pós-iniciadoras, ou seja, atividades que ocorrem após o início do acidente (evento topo), o método tem sido também aplicado a tarefas pré-iniciadoras. Estas são atividades que ocorrem antes do evento topo e que, se omitidas ou realizadas incorretamente, podem levar a um acidente grave. Para essa aplicação, ajustes específicos devem ser feitos na metodologia (Monteiro, et al., 2024).

Este artigo visa aplicar o FRAM e o Petro-HRA ao procedimento de recebimento de rancho em um FPSO. A primeira é uma análise quantitativa e será utilizada para identificar as tarefas que possuem maior potencial de causar um acidente durante a movimentação de carga e avaliar aspectos de segurança ocupacional e fatores de influenciadores de desempenho (FID). Já a segunda avaliação, quantitativa, será realizada apenas para fins didáticos, de forma a identificar quais FIDs têm a maior influência na probabilidade de erro humano, de forma a calculá-la e a propor recomendações de redução de risco, caso aplicável. Vale ressaltar que, no caso estudado não haverá nenhuma tarefa crítica, mas possui sua relevância justificada uma vez que existem diversos fatores críticos de risco em operações de carga que afetam a segurança na indústria (Ma, et al., 2024; Vandeskog, 2023).

Metodologia

A condução do estudo contemplou o acompanhamento do procedimento típico de recebimento de carga (rancho) em unidades *offshore*, utilizando uma lista de verificação estruturada para identificar detalhadamente as etapas desde o planejamento até a sua conclusão. O processo assistido por técnicos de segurança a bordo acompanhou a movimentação de forma a responder questionamentos “como”, “quem” (responsável), “quando” (sequência), “etapas precursoras”, “recursos”, “cuidados adicionais”, “quais os potenciais erros humanos envolvidos na tarefa” e “quais as consequências caso a tarefa seja realizada de maneira inadequada ou não seja realizada”. Nesses tópicos, a ACH pretende responder como os fatores influenciadores de performance afetam esta atividade. Para esse estudo, foi considerada a PEHN como $1,0 \times 10^{-3}$, uma vez que todas as tarefas analisadas serão ações que causariam um possível acidente (eventos iniciadores) e provenientes procedimentos escritos (Monteiro et al., 2024). Caso no

PEH for maior do PEHN. A partir da análise *in loco*, o presente trabalho seguirá as etapas de modelagem do procedimento no FRAM *Model Visualiser*®, cujas funções são suportadas por recursos como mecanismos de controle (em “C”) nos hexágonos, variáveis de tempo envolvido (em “T”) bem como pré-condições (em “P” e “R”, respectivamente). Em seguida é selecionada uma tarefa considerada relevante para a segurança operacional e realizada de entrevista com profissionais envolvidos nesta tarefa para a coleta informações necessárias para aplicar o Petro-HRA e determinação da influência dos Fatores Influenciadores de Desempenho (FIDs) na execução da tarefa selecionada. Os FIDs incluem tempo, ameaça de estresse, complexidade da tarefa, experiência, procedimentos, interface humano-máquina (IHM), atitudes em relação à segurança, suporte gerencial, trabalho em equipe e ambiente físico de trabalho. A probabilidade de erro humano é dada pela Equação 1:

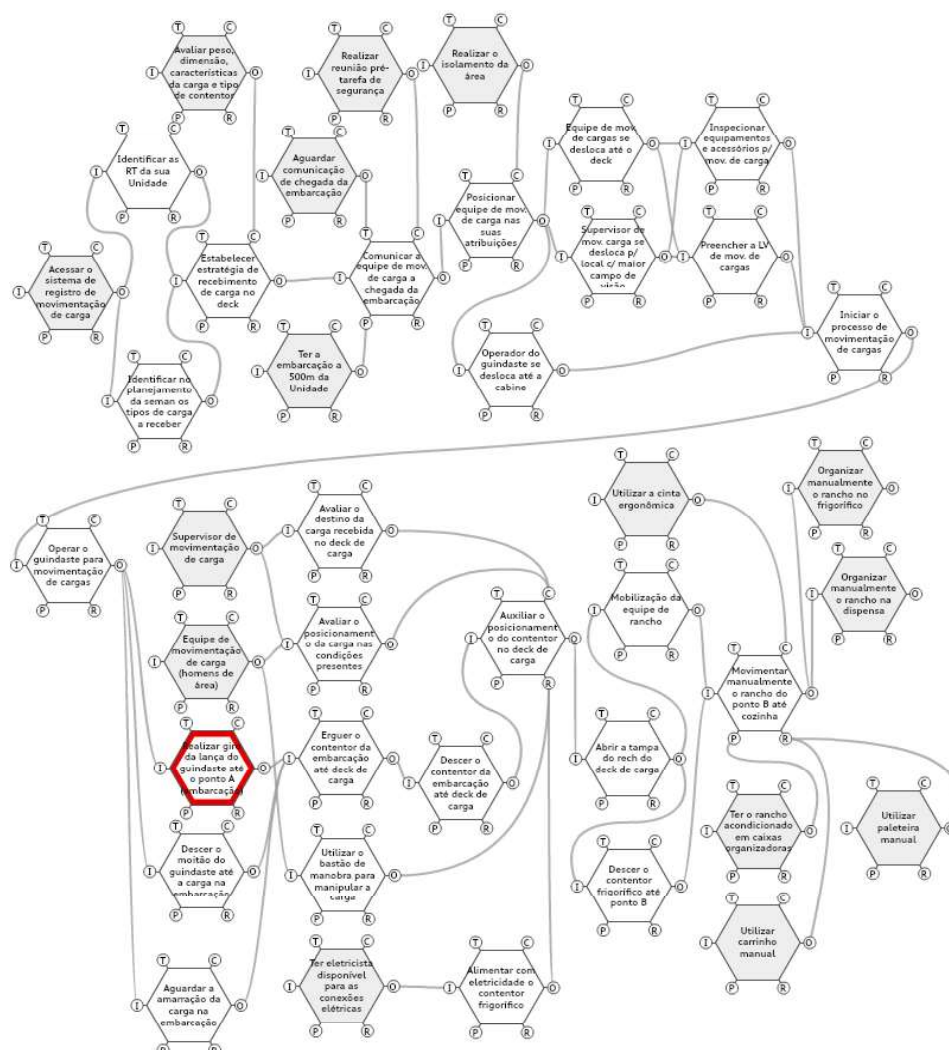
$$PEH = PEHN \times \prod_{i=1}^n \text{Multiplicadores } (FID_i) \quad (1)$$

Onde, PEH é a Probabilidade de Erro Humano, PEHN é Probabilidade de Erro Humano Nominal, que contempla as possíveis influências que afetam a PEH e que não estão cobertas pelos FIDs e $\prod_{i=1}^n \text{Multiplicadores } (FID_i)$ cujos fatores influenciadores de performance impactam a tarefa (sendo i , a quantidade de FIDs considerados) (Bye, et al., 2022).

Resultados e Discussão

A partir do levantamento de campo utilizando os recursos a bordo e com apoio da equipe de movimentação de carga e técnicos de segurança envolvidos, foi possível avaliar todas as tarefas necessárias para a execução do procedimento de recebimento de rancho em um FPSO. Estas estão representadas na Figura 1 com a modelagem segundo o método FRAM, as quais são subdivididas nas etapas de (a) planejamento e preparação, (b) posicionamento, (c) movimentação até o deck de carga (d) acomodação e destino.

Figura 1. Modelo FRAM do procedimento de movimentação de carga.



Fonte: Autores.

A Figura 1 compreende em seu início com tarefas relacionadas ao acesso ao sistema, como identificação de Requisição de Transporte (RT), planejamento da semana, comunicação e deslocamento da equipe. Os aspectos de suporte são representados em cinza. O segmento que envolve a tarefa crítica analisada com a operação do guindaste em si é destacado em “Realizar o giro da Lança e descer o moitão até embarcação”, a qual fora elegível para aplicação do Petro-HRA. As informações relevantes desta tarefa estão apresentadas na análise tabular de tarefas abaixo.

Quadro 1 – Análise tabular da tarefa de realizar o giro da lança e descer o moitão até a embarcação.

Descrição	Realizar o giro da Lança e descer o moitão até embarcação
Responsável	Operador do guindaste
Gatilho da tarefa	Líder da movimentação comunica a liberação para movimentação de carga à toda a equipe envolvida na operação.
Feedback da tarefa	Comunicação visual e via rádio entre o sinaleiro e o operador do guindaste. Além disso o Operador do guindaste possui câmera para realizar a operação.
Equipamentos	Guindaste; 3 rádios portáteis (para o operador do guindaste, para o sinalizador e para a equipe de movimentação de cargas); cabo guia; bastão; câmera.

Erro humano em potencial	Operador realiza movimento muito cedo, pois entende errado a comunicação do Líder da Movimentação.
	Operador realiza o movimento em desconformidade ao plano de movimentação de carga.
Consequências	Possíveis danos materiais, prensamento, fratura, lesões múltiplas, amputação e morte.
Oportunidades de recuperação	Não há oportunidade de recuperação

No quadro abaixo estão apresentados os resultados da entrevista feita, com a ponderação para cada FID e o valor do multiplicador selecionado baseado nas respostas dos profissionais.

Quadro 2 – Multiplicador selecionado e resposta do operador quanto a cada FID na atividade.

FID	Resposta do operador	Multiplicador selecionado
Tempo	Não há nenhuma pressão de tempo sobre a atividade. Ela pode ser desempenhada dentro do tempo necessário.	0,1
Ameaça de estresse	O operador pode se sentir estressado uma vez que há um histórico de acidentes envolvendo esta atividade na indústria. A vida de outras pessoas pode estar ameaçada por um erro.	5
Complexidade da tarefa	A tarefa é moderadamente complexa. Em sua primeira etapa o operador deve estar ciente das condições de mar e de vento para decidir quanto ao momento apropriado para realizar o içamento. Esta tarefa inclui diversas etapas.	2
Experiência	A equipe está adequadamente treinada para realização do procedimento.	1
Procedimentos	A qualidade dos procedimentos é adequada e eles são seguidos. A qualidade dos procedimentos não afeta o desempenho nem positiva nem negativamente.	0,5
IHM	O guindaste possui indicadores como velocidade do vento e grau de inclinação máxima da lança. A interface homem-máquina inclui telas que mostram imagens de uma câmera de 360°, oferecendo ao operador ampla visão do espaço de trabalho.	1
Trabalho em equipe	Nesta atividade estão envolvidos colaboradores cujo idioma é o inglês, enquanto outros falam português. O impacto desta realidade é reduzido uma vez que os operadores do guindaste e líderes de içamento falam ambos os idiomas fluentemente.	1
Atitudes em relação à segurança	A companhia possui filosofia formal relacionada a segurança e esta é seguida pelos colaboradores.	1
Ambiente físico de trabalho	Condições climáticas como fortes ondas ou ventos podem influenciar o desempenho da atividade.	10

Desta forma, a probabilidade de erro humano encontrada através da aplicação da Equação 1 foi igual a 5×10^{-3} , superior ao NHEP (1×10^{-3}) erros por oportunidade. Portanto, é necessário propor uma recomendação para reduzir a PEH. Para o presente artigo, considerando o caráter didático, sugere-se a inserção de uma metodologia de avaliação das condições climáticas, cujo FID apresentou maior (destacado em negrito) para determinar se a tarefa pode ser iniciada com segurança. A recomendação deve ser acompanhada de mecanismos de gestão apropriados (treinamento, por exemplo).

Conclusões

A partir deste artigo, conclui-se que a combinação de diferentes técnicas de análise de confiabilidade humana proporciona uma visão abrangente do cenário analisado. Em destaque, o FRAM oferece uma visão detalhada dos aspectos sociotécnicos complexos envolvidos em uma atividade, enquanto o Petro-HRA fornece um método numérico para a avaliação da probabilidade de erro humano, com critérios de tolerabilidade estabelecidos. O resultado esperado para a reaplicação do Petro-HRA após adoção da recomendação proposta compreende da aproximação ao NHEP nominal da técnica, aqui utilizada em tarefas envolvendo risco potencial gravitacional (queda), com consequências para segurança de processo (atingimento de tubulações e equipamentos contendo produtos perigosos) bem como para integridade das pessoas envolvidos, como pensamento de membros e potencial fatalidade.

Agradecimentos

Agradecimento para equipe de Segurança, Saúde e Meio Ambiente do FPSO.

Referências Bibliográficas

Bye, A. et al., 2022. The Petro-HRA Guideline. *IFE - Institute for Energy Technology*, Volume 1.

Diretoria da Portos e Costas, s.d.. *Marinha do Brasil*. [Online]

Available at: <https://www.marinha.mil.br/dpc/content/cts-de-embarca%C3%A7%C3%B5es-flotel> [Acesso em 18 07 2024].

Grabbe, N., Arifagic, A. & Bengler, K., 2022. Assessing the reliability and validity of an FRAM model: the case of driving in an overtaking scenario. *Cognition, Technology & Work*, Volume 24, pp. 483-508.

IFE, 2022. The Petro-HRA Guideline, Revision 1. *IFE - Institute for Energy Technology*, p. 99.

Kandemir, C. & Celik, M., 2023. A systematic literature review and future insights on maritime and offshore human reliability analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Volume 237, pp. 3-19.

Kariuki, S. & Löwe, K., 2007. Integrating human factors into process hazard analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 92, pp. 1764-1773.

Levine, C. S. et al., 2024. Identifying human failure events for human reliability analysis: A review of gaps and research opportunities. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 245, p. 109967.

Liu, J. et al., 2018. *Combination of Human Reliability Analysis and Task Analysis in Human Factors Engineering*. Los Angelis, California, USA, Springer International Publishing, pp. 96-103.

Ma, J., Zhang, A., Tang, C. & Bi, W., 2024. A novel risk analysis method for hazardous cargo operations at port integrating the HFLC model and DEMATEL method. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 89, p. 105319.

Monteiro, G. P., Fernander, M., Diniz, F. & Sertã, C. S. B., 2024. Human Reliability Analysis of Pre-initiator and Initiator Events - What methodological adjustments must be adopted in Petro-HRA to analyze pre-accident operator actions?. *AIChE - American Institute of Chemical Engineers 2024 Spring Meeting and 20th Global Congress on Process Safety*, Volume 20, pp. 1-14.

Rasmussen, M. & Laumann, K., 2020. The evaluation of fatigue as a performance shaping factor in the Petro-HRA method. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 194, p. 106187.

Vandeskog, B., 2023. Risk, trust and reputation in the Norwegian offshore supply chain. *Safety Science*, Volume 163, p. 106118.

Zarei, E., Khan, F. & Abbassi, R., 2021. Importance of human reliability in process operation: A critical analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 211, p. 107607.

Zheng, Q. et al., 2024. Enhancing emergency response planning for natech accidents in process operations using functional resonance analysis method (FRAM): A case of fuel storage tank farm. *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 188, pp. 514-527.