

# Implementação de FMECA em Veículos Militares Autónomos Submarinos

Suzana Lampreia <sup>1</sup>, Victor Lobo <sup>1</sup>; Hugo Policarpo <sup>1</sup>; Valter Vairinhos <sup>1</sup>

suzanalampreia@gmail.com, vlobo@novaims.unl.pt, diniz.policarpo@escolanaval.pt,  
valter.vairinhos@sapo.pt

<sup>1</sup> CINAV – Portuguese naval Academy, Base naval de Lisboa, Alfeite, 2810-001, Almada, Portugal

DOI: 10.17013/risti.n.pi-pf

**Resumo:** Este artigo apresenta uma investigação sobre *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis* (FMECA) em sistemas complexos, neste caso, veículos submarinos militares autónomos (Unmanned Underwater Vehicles – UUV). Serão apresentados os desafios na adaptação da FMECA a veículos autónomos em ambientes submarinos considerando a importância de identificar, avaliar e mitigar as falhas nos seus equipamentos e prever e planejar intervenções de forma dinâmica. Será verificada a aplicabilidade da integração da FMECA na análise de risco de operação do UUV. Com a exploração e processamento de dados considerados, será demonstrado e analisados um caso de estudo para verificar como é que a FMECA pode melhorar a fiabilidade, a segurança a operacionalidade dos UUV. Esta investigação demonstra a importância da monitorização do estado destes equipamentos para garantir o sucesso das missões dos UUV.

**Palavras-chave:** FMECA; Veículos; Autónomos; Submarinos; Militar.

***Iberian Journal of Information Systems and Technologies:  
Format guidelines to write articles***

**Abstract:** This article presents an investigation into Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) in autonomous military underwater vehicles (Unmanned Underwater Vehicles – UUV). The challenges in adapting FMECA to underwater environments will be presented, considering the importance of identifying, evaluating and mitigating failures in critical equipment. Methodologies that are applicable in complex systems will be explored and

processed, in this case equipment for an autonomous underwater vehicle. The applicability of FMECA integration in UUV life cycle analysis will be verified. With the demonstration and analysis of practical examples, it will be demonstrated how FMECA can improve the reliability, safety and operability of UUVs. This investigation demonstrates the importance of monitoring the condition of this equipment to ensure the success of UUV missions.

**Keywords:** FMECA; Vehicles; Autonomous; Submarines; Military.

## 1. Introdução

Por veículo autónomo entende-se por um sistema que integra um conjunto de tecnologia, de sensores, sistemas de controlo e atuadores que lhe permitem executar manobras e ações de forma autónoma.

Os veículos autónomos têm nas últimas décadas sido desenvolvidos na área da investigação científica, da academia, do comércio e na área militar (Othman, 2022). Com estes veículos é possível obter informações e imagens, que outrora eram dificultadas pela geografia dos territórios (Zeng et al., 2021), sem pôr em risco a vida humana ou necessitar de perícias que não sejam a manobra dos veículos.

A nível da aplicabilidade, os veículos submarinos são, atualmente, utilizados para estudos de batimétrica, estudos submarinos, vigilância de portos, inspeção de infraestruturas offshore e arqueologia subaquática, e desminagem marítima (Bibuli et al, 2022).

O Veículo em estudo é um veículo autónomo sem intervenção humana durante a operação, UUV.

Face a sua aplicabilidade, a emergência do desenvolvimento tecnológico e criação de autonomia na conceção deste tipo de veículos, de forma a criar reforços também naquilo que diz respeito à segurança cibernética de modo a que a sua operação não sofra intervenções maliciosas de terceiros, efetuou-se esta investigação de modo a definir os modos de falha de um veículo submarino, mas ao mesmo tempo entender que tipos de sensores pretendo incluir para prevenir as possíveis falhas em teatro de operações.

Várias metodologias podem ser aplicadas quando existe um conceito de monitorização online ou Internet of Things (IoT), por exemplo Kinjo et al (2022) aplicaram as redes Bayesianas no sentido de detetar a probabilidade de falha num sistema com IoT.

Desta forma para mitigar as falhas foi escolhido utilizar a FMECA de forma a definir os critérios a considerar para que no futuro se saiba em que estado se encontra o veículo, qual o nível da sua criticidade para execução de determinado tipo de missões. Com o conhecimento do estado do UUV pretende-se que seja possível definir de modo dinâmico as intervenções de manutenção para que as missões sejam cumpridas com um nível de performance elevado.

## **2. Veículos Submarinos Autônomos**

Os Veículos Subaquáticos Autônomos (AUVs, ou UUV em inglês) representam um avanço significativo na exploração marítima, pesquisa e aplicações industriais. Estes veículos com sistemas de propulsão e não tripulados navegam em ambientes subaquáticos sem intervenção humana direta. Isso faz deles um meio aplicável em vários tipos de ambiente, mesmo ambientes hostis. (Madureira, 2018)

Uma das principais vantagens dos UUVs reside na sua autonomia. Equipados com sensores sofisticados, sistemas de navegação e computadores de bordo, os UUVs podem operar de forma independente por longos períodos, recolhendo dados e executando tarefas onde a presença humana não é possível ou é ou perigosa. Esta autonomia não só aumenta a eficiência, mas também reduz os custos operacionais e os riscos para os mergulhadores humanos. (Zhang, 2023)

Os recentes avanços na inteligência artificial e na aprendizagem automática (machine learning) melhoraram ainda mais as capacidades dos UUVs, permitindo-lhes realizar tarefas cada vez mais complexas com níveis mais elevados de autonomia e eficiência, como sejam a análise dos dados da sua própria condição, ou estado do material. (Singh, 2020)

Na conceção dos veículos autônomos vários tipos de propulsão podem ser considerados, de preferência todos com base em energia elétrica, sejam eles de propulsão a hélice, biomiméticos (inspirados na mobilidade de animais marinhos) ou até por controlo de tanques de lastro. Desta forma uma das suas limitações é a energia necessária à sua movimentação que será limitada provavelmente à capacidade de armazenagem de energia por parte de baterias e a forma como o veículo otimiza o seu movimento em função das missões em que é empenhado (Conde, 2023).

Na presente investigação pretende-se que através da definição de alguns subsistemas a integrar na plataforma UUV sejam considerados desde a sua conceção estratégias de intervenção de manutenção, porqui estas devem ser planeadas aquando do projeto e construção (Eckestein, 2020).

Nos veículos autônomos é possível controlar o nível de falhas toleráveis, no desenvolvimento de ações por estes veículos é necessário implementar uma série de dependências funcionais até que estes sejam capazes de ser empenhados em missões outrora desempenhadas por sistemas operados pelo ser humano (Crestani et al., 2015).

Um sistema de avaliação da condição de sistemas autônomos deve ser implementado à medida que a necessidade de autonomia dos sistemas aumenta (Glover et al, 2010).

### **3. FMECA**

O Método de Análise e Avaliação de Modo de Falha, Efeito e Criticidade (FMECA) é uma abordagem sistemática para identificar e avaliar os modos de falha potenciais em sistemas, componentes ou processos, analisando seus efeitos e determinando a criticidade de cada falha. A FMECA é amplamente utilizado em diversas indústrias, incluindo manufatura, automotiva, aeroespacial, saúde e energia, para garantir a confiabilidade, segurança e desempenho dos produtos e processos.

As etapas da FMECA são: a identificação dos modos de falha, a análise dos efeitos e a avaliação da criticidade. Após a identificação das falhas possíveis de ocorrer, o efeito dessas falhas no desempenho por exemplo de um equipamento e avaliada a criticidade em que se considera a severidade da ocorrência, a probabilidade de ocorrer e a capacidade que os técnicos têm de detectar essa falha. (Stamatis, 2003) (Daya & Lazakis, 2022).

A combinação destes três fatores é dada por  $ICF=S \cdot O \cdot D$ , sua quantificação individual é alvo de valorização fixa de 1 a 10 normalmente recomendada por alguns autores. No presente artigo não são seguidos estes valores, por razão de escala, e porque vai ser entrado com um outro fator que é uma valorização para o controle de condição dos equipamentos ou sistemas. (Stamatis, 2003)

O ICF é classificado numa escala que mede a criticidade do sistema e que vai apoiar na definição das prioridades de manutenção. (Stamatis, 2003) (Vaurio & Veseley, 2006)

Com base na análise de criticidade é depois possível, de acordo com as características do equipamento definir um conjunto de ações corretivas, em que se esta técnica for aplicada logo na fase de projeto pode apoiar a correção de possíveis futuras anomalias nos sistemas. (Blanchard & Fabrycky, 2011)

A FMECA é útil na gestão de risco em equipamentos, promovendo a melhoria contínua da performance dos sistemas e a sua fiabilidade durante as operações em que são utilizados. É um sistema que pode auxiliar a evitar falhas catastróficas reduzindo custos de manutenção inopinada, aumentando a operacionalidade dos meios. (Smith & Smith, 2005)

O uso da FMECA pode permitir que os gestores de manutenção tenham um profundo conhecimento acerca de um equipamento, nomeadamente no que diz respeito às suas fragilidades e nível de risco associado à sua operação (Daya & Lazakis, 2022).

Várias metodologias podem ser utilizadas para aumentar a qualidade de um equipamento ou sistema. A metodologia 8D inclui o FMEA, e foi utilizada por Divanoglu & Tas (2022) como forma de minimização das falhas de qualidade e para aumentar a eficiência na produção na indústria automóvel.

Aliado ao FMECA sistemas inteligentes de análise de risco podem ser utilizados em veículos autónomos, por exemplo pode ser integrado no próprio veículo um sistema de processamento de dados lidos por sensores em que seja o próprio veículo a efetuar a análise de risco em vez de operadores humanos em terra (Chen, 2023). No presente artigo será explorado o processamento de dados pelo veículo e a sua transmissão para sistemas em terra de apoio à decisão.

Alguns estudos fomentam o estudo quantitativo do risco associado a equipamentos, tendo em consideração dados históricos e considerando esta análise dinâmica (Chet et al, 2023), ou seja, entre outros, os parâmetros a considerar podem variar de acordo com a operação em que os equipamentos são emprenhados.

Alguns autores como é exemplo Cullum et al. (2018) definem passos na definição de um sistema de manutenção planeada são eles: a avaliação de risco, planeamento da manutenção e quantificação da disponibilidade e custo para a realização da manutenção.

#### **4. Metodologia FMECA em UUV**

No presente artigo considerou-se a sequência de ações presente na Figura 1 para a implementação de um sistema de monitorização baseado na FMECA.

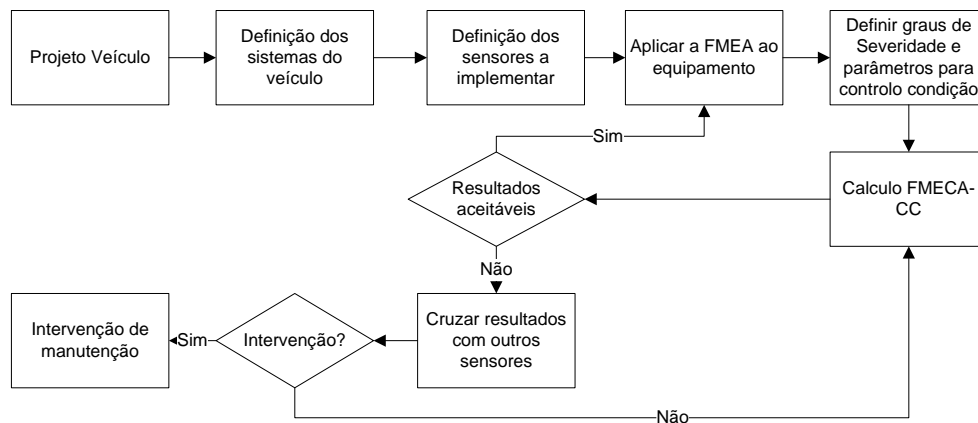


Figure 1. FMECA-CC methodology

Se após a aplicação da FMECA-CC os resultados forem aceitáveis, o sistema de monitorização do equipamento continua a recolher dados, e os analistas podem eventualmente introduzir melhorias na parte da identificação.

Ao do modo de falhas e do seu efeito (FMEA). Se os resultados não forem aceitáveis estuda-se a hipótese eventual de proceder a uma intervenção de manutenção, se a opção for não continua a monitorização através do FMECA-CC, senão passa-se a efetuar uma intervenção de manutenção.

## 5. Case Study – FMECA aplicado a veículos autónomos submarinos.

No presente caso foi efetuada uma adaptação do FMECA original (FMECA\_CC) da seguinte forma: foram consideradas 4 severidades (a severidade na segurança - Ss, a severidade no ambiente - Sa, a severidade no equipamento – Se, e a severidade operacional - So) em que se efetuou a média das quatro de forma a obter uma severidade média Sm; depois foi considerada a probabilidade de ocorrência e a deteção já consideradas normalmente na FMECA; para este caso específico foi considerado ainda o controlo de condição com 3 tipos de controlo para o caso do UUV (o controlo de vibração medido através de acelerómetros nas chumaceiras e na estrutura, foi ainda utilizado a medição de temperatura no motor elétrico propulsor e no interior do UUV, foi ainda utilizado um sensor para contabilizar a corrente consumida de propulsor. Todos estes fatores combinam-se conforme é apresentado nas equações nº 1 e nº 2.

$$Sm = Ss + Sa + Se + So \quad (1)$$

De referir que a forma logarítmica foi incluída de forma a considerar, mas ao mesmo tempo amortizar o resultado da consideração dos valores do controlo de condição.

$$RPNm = Sm * O * D * \ln(CCV + CCT + CCP) = FMECA\_CC \quad (2)$$

Os critérios considerados para o cálculo de RPN, ou neste caso FMECA\_CC relativamente à severidade foram os seguintes:

Tabela 1 – Critérios das Severidades

| Atribuição Valor | Severidade Segurança (Ss)   | Severidade Ambiente (Sa)           | Severidade Equipamento (Se)                     | Severidade Operacional (So)        |
|------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|------------------------------------|
| 0,1              | Sem impacte                 | Sem impacte                        | Sem impacte                                     | Sem impacte                        |
| 1                | Impacte leve                | Impacte leve                       | Impacte leve                                    | Impacte leve                       |
| 2                | Impacte gravidade média     | Impacte gravidade média            | Equipamento a funcionar sem sistemas segurança  | Impacte grave                      |
| 3                | Impacte grave               | Impacte grave                      | Equipamento a funcionar em modo degradado geral | UUV Limop                          |
| 4                | UUV Inoperacional           | Impacte no interior no UUV         | Equipamento inoperacional com redundância       | UUV Limop com risco falha iminente |
| 5                | Impacte na segurança do UUV | Impacte interno e externo agravado | UUV inoperacional sem redundância               | UUV Inoperacional                  |

Na tabela 2 apresentam-se os critérios considerados para o controlo de condição relativamente à vibração, medição de temperatura e medição da corrente. De referir que o nome aplicado à medição de correntes, é CCP (controlo de condição de parâmetros), em que o parâmetro (P) nomeou-se desta forma porque pode integrar outros tipos de parâmetros através da média, mas para o presente estudo foi a corrente a considerada, pois através desta e da sua continuidade e valor é possível determinar com que qualidade e performance o motor propulsor do UUV está a operar. Os valores de vibração e das correntes serão enquadrados aquando da conceção do UUV.

Tabela 2 – Critérios do Controlo Condição

| Atribuição Valor | Controlo de Condição - Vibração (CCV) | Controlo de Condição - Temperatura (CCT)         | Controlo de Condição - P (Correntes) (CCP) |
|------------------|---------------------------------------|--|--|
| 1                | Nível baixo                           | Nível baixo (não há diferença)                   | Nível baixo                                |
| 2                | Nível médio baixo                     | Nível médio baixo (diferença 1° - 4°C do normal) | Nível médio baixo                          |
| 3                | Nível médio                           | Nível médio (diferença 4° - 15°C do normal)      | Nível médio                                |
| 4                | Nível médio alto                      | Nível médio alto (diferença 15°C e mantém)       | Nível médio alto                           |
| 5                | Nível alto                            | Nível alto (diferença >15°C do normal)           | Nível alto                                 |

Mediante o resultado da FMECA\_CC foram definidos os critérios para intervenção de manutenção na tabela 3.

Tabela 3 – Critérios para intervenção

| Valorização | FMECA_CC - Significância | Atuação/Intervenção                              |
|-------------|--------------------------|--|
| 1           | Não significativo        | Sem intervenção                                  |
| 2           | Pouco significativo      | Monitorizar continuamente                        |
| 3           | Pouco significativo      | Monitorizar continuamente                        |
| 4           | Pouco significativo      | Monitorizar continuamente                        |
| 7           | Aceitável                | Planear manutenção - definir medidas preventivas |
| 9           | Significativo            | Planear manutenção - definir medidas corretivas  |
| 12          | Significativo            | UUV LIMOP - Medidas corretivas                   |
| 16          | Inaceitável              | UUV INOP - Medidas corretivas imediatas          |



Tabela 4 – Cálculo FMECA\_CC

| <b>N R</b> | <b>Sub-sistemas</b>                    | <b>Aspeto</b>   | <b>Impacto</b>   | <b>Deteção</b>   | <b>FMECA_CC</b> |
|------------|--|---|--|--|-----------------|
| 1          | Motor Propulsor                        | Consumo excessivo de energia                                | Decréscimo de autonomia  | Sensor corrente elétrica   | 20              |
| 2          | Veio propulsor                         | Aquecimento no veio   | Gripagem do veio   | Acelerómetro medição vibrações   | 36              |
| 3          | Veio propulsor                         | Entrada de água pelo veio                                   | Danificação sistemas no interior                                 | Medidor de humidade no interior  | 12              |
| 4          | Hélice                                 | Vibrações   | Cavitação/desgaste material                                      | Acelerómetro medição vibrações   | 11              |
| 5          | Corrente elétrica no motor             | Corrente baixa/alta/inexistente                             | Velocidade baixa, dificuldade de manobra.                        | Verificação baterias   | 5               |
| 6          | Bateria Propulsão                      | Não recebe carga adequada                                   | Desaperto terminais  | Verificação aperto terminais   | 22              |
| 7          | Bateria Propulsão                      | Não recebe carga adequada                                   | Falha no sistema de carregamento                                 | Medição e verificação estado geral sistema de carregamento                                 | 36              |
| 8          | Estrutura do veículo                   | Aparente desagregação material                              | Corrosão, danos profundos na estrutura/infiltração água          | Inspeção visual, ou ultrassons   | 44              |
| 9          | Sistema de recolha de amostras de água | Falha na abertura de válvula                                | Incapacidade recolher amostras                                   | Sensor de nível não deteta entrada fluido  | 16              |
| 10         | MODEM processamento dados              | Falha de comunicação na recolha de dados e movimentação UUV | Falha intermitente na manobra                                    | Observação das manobras do UUV e da recolha de dados                                       | 8               |
| 11         | Sistema de transmissões                | Falhas na transmissão ou sem transmissão                    | Falhas intermitentes nas comunicações                            | Testar transmissões, comunicações e ligações   | 11              |
| 12         | Bateria das transmissões/comunicações  | Incapacidade de transmissão                                 | Veículo desgobernado e/ou sistemas de terra sem recolha de dados | Observação das manobras do UUV e da recolha de dados                                       | 16              |
| 13         | Câmara de recolha de imagens           | Não transmite imagens                                       | Sistema de monitorização não recebe imagens para tratamento      | Sistemas de receção em terra não recebem imagens   | 5               |
| 14         | Câmara de recolha de imagens           | Não regista/não recolhe imagens                             | Não existem imagens para tratamento.                             | Após recolha imagens com veículo em terra, verifica-se que não existem registo de imagens. | 8               |

Foi efetuado o cálculo da FMECA\_CC de forma a verificar o risco associado a uma avaliação da condição do UUV, aliando a metodologia FMECA e três parâmetros de controlo da condição.

De referir que os resultados são definidos com base naquilo que pretendemos definir para o UUV, aquando da sua conceção e apetrechamento é que serão ajustados em que critérios se enquadram as especificações dos meios (ex.: motor elétrico, veio, hélice, sistema de baterias, sensores de temperatura, acelerómetros, etc)

Dado os níveis definidos de significância para efetuar intervenção no sistema, obteve-se resultados entre 5 a 44 de significância, tabela 4.

A condição 3 do sistema encontra-se com um nível significativo, provoca limitação no UUV e necessita de intervenção corretiva.

A condição 4 e 11 estão em modo significativo, necessitam que se definam medidas preventivas de correção.

A condição 10 e 14 estão no estado aceitável, mas necessitam como medida preventiva de definir manutenção planeada preventiva.

Verificaram-se que 7 condições de sistemas (condições: 1, 2, 6, 7, 8, 9 e 12), de acordo com o definido na tabela 3 se encontram no estado inaceitável, pelo que necessitam de medidas imediatas de intervenção. Dendo que as condições 3, 7 e 8 são inaceitáveis extremas. Quais as medidas de intervenção vão fazer parte da base de dados que um software de apoio à monitorização integrará como sistema de apoio à decisão dos gestores nos atos de manutenção do meio.

Para o cálculo do FMECA\_CC, foram utilizados os critérios de experiência dos autores, pretende-se agora testar e validar o método disponibilizando esta avaliação aos setores operacionais e a especialistas nestes veículos e dos sistemas nele incluídos.

## **6. Conclusões**

Foi efetuado um breve estudo sobre performance e formas de controlo de condição de UUV.

Foi desenvolvida uma metodologia de monitorização baseada na FMECA, que foi modificada para FMECA\_CC, onde a base original desta metodologia lhe foi

acrescida três formas de controlo de condição, por vibração, medição de temperatura e medição de correntes. Ao considerar o controlo de condição foram criados critérios de valorização de forma a poder ser incluído na metodologia FMECA.

Esta forma de monitorização do equipamento permite fornecer aos operadores do sistema o estado do equipamento, de forma a aumentar a disponibilidade operacional deste, e minimizar a probabilidade de perda do próprio mar, uma vez que as suas características operacionais aumentam a risco de perda no mar. com este método será possível otimizar a intervenções, melhorando a sustentabilidade do meio, minimizando o impacto ambiental por desperdício de material ou perda do meio no mar.

Como trabalho futuro, deverá ser efetuada: a validação da FMECA por mais elementos especialistas na área, da criação da base de dados de sugestões de intervenção no meio, e finalmente a integração da informação da FMECA\_CC e das sugestões de intervenção no meio e sistemas associados de forma a tornar um sistema dinâmico de intervenção no UUV de forma a manter e melhorar a sua performance.

## **Referencias**

Bibuli, M., Zereik, E., de Palma, D., Ingrosso, R., & Indiveri, G. (2022). Analysis of an Unmanned Underwater Vehicle Propulsion Model for Motion Control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 45(6), 1046–1059.

Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems engineering and analysis*. Prentice Hall.

Bureau of Shipping, A. (2015). *Guidance Notes on Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for Classification*. ABS. <https://www.eagle.org>

Chen, X. (2023). *Risk Analysis and Decision Making for Autonomous Underwater Vehicles*. PhD Thesis from Faculty of Engineering and Applied Science from Memorial University of Newfoundland, Canada.

Chen, X., Bose, N., Brito, M., Khan, F., Thanyamanta, B., & Zou, T. (n.d.). A Review of Risk Analysis Research for the Operation of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs).

Cullum, J., Binns, J., Lonsdale, M., Abbassi, R. & Garaniya, V. (2018). Risk-Based Maintenance Scheduling with Application to Naval Vessels and Ships. *Journal of Ocean Engineering* 148, 476-485.

Conde, M. S. (2023). Coordinated Control of Autonomous Underwater Vehicles. Tese Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Crestani, D., Godary-Dejean, K., Lapierre, L., Crestani, D., Godary-Dejean, K., & Lapierre, L. (2015). Enhancing Fault Tolerance of Autonomous Mobile Robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 68, 140–155. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.12.015>

Glover, W., Cross, J., Lucas, A., Stecki, C., & Stecki, J. (2010). The Use of Prognostic Health Management for Autonomous Unmanned Air Systems. In *Conference of the Prognostics and Health Management Society*.

Daia, A. & Lazakis, I. (2022). Investigating ship system performance degradation and failure criticality using FMECA and artificial neural networks. (n.d.). *Trends in Maritime Technology and Engineering Edition*. CRC Press.

Eckestein, M. (2020). Navy Striving for 71% On-Time Ship Maintenance This Year, No Extensions By End of 2021. *USNI News*. <https://news.usni.org/2020/01/23/navy-striving-for-71-on-time-ship-maintenance-this-year-no-extensions-by-end-of-2021>

RISTI – Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, (47), 87-108. <https://doi.org/10.17013/risti.47.87-108>

Madureira, L. (2018). Veículos subaquáticos autônomos: uma visão geral de desenvolvimentos e aplicações. Dissertação de mestrado, Escola politécnica da Universidade de São Paulo.

Othman, K. (2022). Exploring the implications of autonomous vehicles: a comprehensive review. In *Innovative Infrastructure Solutions* 7(165). Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00763-6>

Singh, H. et al. (2020). Recent Advances in Autonomous Underwater Vehicles: A Review. *Marine Technology Society Journal*, 54(5), 68-83.

Smith, D. R., & Smith, K. A. (2005). Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers including reliability centred maintenance and safety-related systems. Butterworth-Heinemann.

Stamatis, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution. ASQ Quality Press.

Uslu Divanoğlu, S., & Taş, Ü. (2022). Application of 8D methodology: An approach to reduce failures in automotive industry. *Engineering Failure Analysis*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.106019>

Vaurio, J. K., & Vesely, W. E. (2006). Risk analysis for process plant, pipelines, and transport. John Wiley & Sons.

Zeng, J., Li, S., & Liu, Y. (2021). Application of unmanned underwater vehicles in polar research. In *Advances in Polar Science* 32(3), (pp.173–184). Editorial Office of *Advances in Polar Science*. <https://doi.org/10.13679/j.advps.2021.0018>

Zhang, B., Ji, D., Liu, S. Zhu, X., & Xu, W. (2023). Autonomous Underwater Vehicle navigation: A review. Elsevier, *Ocean Engineering Journal*, 273 (113861), 1-29. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823002457>