

Aplicação de Metodologias Fuzzy na Monitorização de Sistemas Marítimos
16.º Congresso Nacional de Manutenção
23 e 24 de Novembro de 2021 – Centro de Congressos de Aveiro, Portugal

S. Lampreia ⁽¹⁾, I. Mestre ⁽²⁾, T. Morgado ⁽³⁾, H. Navas ⁽⁴⁾
suzanalampreia@gmail.com, i.mestre@campus.fct.unl.pt, t.morgado@fct.unl.pt, hvgn@fct.unl.pt

(1) CINAV - Centro de Investigação Naval/Escola Naval, 2810-001 Almada, Portugal

(2) Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, NOVA School of Science and Technology (FCT NOVA), Universidade NOVA de Lisboa, Portugal

(3) ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 1959-007 Lisboa, Portugal

(4) UNIDEMI, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, NOVA School of Science and Technology (FCT NOVA), Universidade NOVA de Lisboa, Portugal

Resumo

Atualmente alguns meios marítimos enfrentam o desafio de, mesmo com escassez de recursos, otimizar o seu desempenho, minimizando ações de intervenção nos equipamentos, mas por outro, mantendo os padrões de segurança e de performance aceitável. Os navios, ainda não autônomos, são meios marítimos que transportam pessoal e sistemas, sendo a sua boa condição, uma permissão para a segurança do pessoal e material, evitando não só danos no próprio navio como eventuais ocorrências de poluição no mar ou danos noutros sistemas marítimos e pessoas externos a este. As empresas, as organizações e a comunidade científica com interesse na área de gestão da manutenção em navios, têm vindo a desenvolver sistemas avançados de monitorização de dados dos equipamentos de navios de forma a prevenir avarias e ter *in loco* o conhecimento sobre o estado dos equipamentos. Estes sistemas utilizam técnicas de controlo da condição e tratamento de dados através de algoritmos, sistemas estatísticos e outras metodologias. A metodologia que vai ser desenvolvida e aplicada nesta investigação é a Fuzzy. O equipamento escolhido para o case study é uma eletrobomba de incêndios de um navio patrulha oceânico, que é um equipamento vital a bordo, e que faz parte dos equipamentos selecionados pela Direção Técnica da Organização em estudo para a monitorização de horas de funcionamento e estado operacional.

1. Introdução

A importância da manutenção como atividade de apoio à produção tornou-se inquestionável devido à sua vasta contribuição no que concerne à operacionalidade e melhoria dos ativos físicos.

Neste contexto, foi desenvolvido o conceito de gestão da manutenção, definido pelo IPQ (NP, 2007) como “todas as atividades de gestão que determinam os objetivos, a estratégia e as responsabilidades respeitantes à manutenção e que os implementam por diversos meios tais como o planeamento, o controlo e a supervisão da manutenção e a melhoria de métodos na organização, incluindo os aspetos económicos.”

O planeamento da manutenção diz respeito a todas as atividades relacionadas ao desenvolvimento de um programa de trabalho regularmente programado para garantir a operação satisfatória do equipamento e evitar problemas graves (Dhillon, 2002).

Por outro lado, o controlo e supervisão da manutenção está relacionado aos diversos aspetos que devem ser vigiados para garantir a correta implementação da gestão da manutenção (Manzini *et al.*, 2010).

Segundo Morvay & Gvozdenac (2008), qualquer sistema de gestão compreende uma estrutura organizacional apoiada em três aspetos principais: procedimentos, pessoas e tecnologia para controlar e otimizar o uso dos recursos e garantir o cumprimento dos objetivos da empresa.

Para tal, os processos de planeamento e execução da manutenção são suportados pelo sistema de informação para assegurar a gestão das listas de trabalho e inventário, procedimentos e especificações técnicas, programação e gestão de recursos, transmissão de pedidos de intervenções, monitorização e gestão de peças sobressalentes, relatórios e controlo de custo. Nesta lógica, o papel da tecnologia surge não só como necessidade de um sistema de informação intimamente conectado a todos os ativos relevantes da empresa, mas também como uma ferramenta útil para os operadores com vista a garantir intervenções mais confiáveis (Silvestri *et al.*, 2020).

No entanto, nenhuma gestão é fácil e a gestão da manutenção de ativos marítimos, é complexa devido às incertezas e condicionantes envolvidas como é o caso das condições climáticas (Abbas & Shafiee, 2020).

Se objetivos como reduzir o número de acidentes, desenvolver uma organização flexível e multifacetada, aperfeiçoar a eficiência da produção e por exemplo criar um sistema mais acessível e perceptível para todas as pessoas envolvidas; forem alcançados então pode afirmar-se que também estão a ser cumpridos os motivos fundamentais para a gestão da manutenção: maximizar o lucro e oferecer vantagem competitiva à organização. Este conjunto variado de argumentos conduziu a que a escolha e a implementação do “modelo ideal” deixassem de ser apenas um pensamento vago para se tornarem num tópico recorrente de pesquisa e numa questão fundamental para alcançar a eficácia e eficiência da gestão da manutenção (Campos & Márquez, 2008).

É no contexto da gestão da manutenção e de forma a minimizar avarias inesperadas, que se escolheu a metodologia Fuzzy para o desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão no âmbito da manutenção de uma eletrobomba de incêndios num navio.

2. A Metodologia Fuzzy em Manutenção

A lógica *fuzzy* veio dar algumas respostas relativamente a dados que não são nem totalmente falsos, nem totalmente verdadeiros. Esta lógica é capaz de desenvolver um sistema para tomada de decisão com base em entradas de variáveis linguísticas e, por conseguinte, muitas vezes vagas e subjetivas do ponto de vista matemático (Ierace & Cavalieri, 2008).

Esta metodologia é utilizada para expressar a ausência de uma fronteira nítida entre conjuntos de informações (Maletić *et al.*, 2014).

Segundo Ierace & Cavalieri (2008), esta técnica é adequada no âmbito da manutenção uma vez que os autores consideram que, na sua maioria, os objetivos gerais da manutenção são intangíveis e dependem da experiência do trabalhador.

Contudo, segundo os mesmos autores, este método é por vezes demasiado subjetivo o que se pode dificultar a avaliação da importância de cada objetivo, bem como, a capacidade de cada política de manutenção para os atingir.

2.1 Processo Fuzzy

Esta metodologia é a indicada para trabalhar com o raciocínio humano impreciso porque tem em conta a experiência e o conhecimento, fornece ainda uma estrutura matemática para modelar a incerteza dos processos cognitivos humanos que podem ser controlados por um computador (Moreno-Cabezali & Fernandez-Crehuet, 2020).

O processo inerente à Lógica *Fuzzy* pode ser descrito em 7 etapas que estão identificadas na figura 1.



Figura 1 - Etapas de um Sistema *Fuzzy*

Fonte: adaptado de (Jaderi et al., 2019; Kumru & Kumru, 2013)

A *Fuzzificação* é o processo que converte os dados de entrada em valores *fuzzy* com recurso às funções de pertença. É nesta etapa que são apurados os graus de pertença dos elementos. Para além disto, como é uma etapa relevante para o processo, normalmente, justifica-se o contributo dos especialistas do fenómeno em estudo que se pretende modelar (Silva, 2018).

Por outro lado, na inferência o processo que visa viabilizar uma ação do sistema mediante uma avaliação da compatibilidade das entradas com as condições estipuladas pela base de regras. O número de conjuntos *fuzzy* de saída tem de ser igual ao número de regras estipuladas (Paixão, 2010).

Na literatura são comumente abordados quatro tipos de métodos de inferência: Modelo Mamdani e o modelo de Larsen em que o antecedente e o consequente são proposições *fuzzy*, o modelo de Tsukamoto em que o que difere dos modelos anteriores é o consequente ser representado por uma função de pertença monotónica, e por último, o modelo de Takagi-Sugeno no qual a diferença reside no consequente ser uma função polinomial (Ross, 2010).

É de salientar que os quatro métodos diferem apenas no consequente.

A *Desfuzzificação* é a Etapa na qual são calculados os valores de saída do sistema com base no processo de inferência e de acordo com as funções de pertença das variáveis linguísticas. O número de regras estipula o número de saídas, logo, se por exemplo forem determinadas cinco regras, então existirão cinco valores de saída, no entanto, só pode existir um único valor final de resposta e este é apurado caso a caso, uma vez que tem de ser aquele que melhor reproduz a região obtida através dos valores de saída (Cox, 1994).

Existem vários métodos de *desfuzzificação* como por exemplo o Centro de Gravidade (COG), Centro de Área (COA), Média dos Máximos (MOM), entre outros, por ser o mais utilizado, na presente investigação optou-se utilizar o COG.

O COG encontra o ponto onde uma linha vertical corta o conjunto *fuzzy* em duas partes iguais, isto é, este método encontra um centro de gravidade de um conjunto A, num intervalo ab. Matematicamente o COG pode ser calculado de pelo menos duas formas, na qual a primeira, apresentada na equação X, expressa exatamente o foi mencionado (Kumru & Kumru, 2013).

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx}$$

A segunda forma, apresentada na equação 3.4, o COG é calculado através de uma estimativa obtida através de uma amostra de pontos (Jaderi et al., 2019).

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x) x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)}$$

Um dos dados mais importantes da utilização da Lógica *Fuzzy* prende-se com o facto de ser possível converter a linguagem corrente, como palavras ou frases, em dados numéricos para que estes consigam ser tratados informaticamente. Normalmente, quando se faz referência à temperatura da água diz-se se esta está fria, morna ou quente, em vez de se dizer que está a determinados graus celsius. Ou quando se pretende fazer alusão à idade de alguém é recorrente dizer-se que determinado individuo é jovem, ou se encontra na meia-idade ou é velho (Silva, 2018).

Melo (2009) afirma que este fenómeno acontece porque normalmente o ser humano se expressa desta forma, por palavras, em vez de números. Seguindo o exemplo da idade, considera-se que a variável linguística é a idade, em que esta pode tomar termos linguísticos como jovem, meia-idade ou velho. Por conseguinte, estes termos linguísticos podem ser descritos através de conjuntos *fuzzy*, que por sua vez, são representados por intermédio de funções de pertença que serão apresentados no Case Study do presente artigo

2.2 Conjuntos Fuzzy

Um conjunto *fuzzy* A, pertencente a um universo U, encontra-se definido através de uma função de pertença:

$$\mu_A(x) : U \rightarrow [0,1]$$

Esta função de pertença representa um conjunto *fuzzy* através de um conjunto de pares ordenados dados por:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\}$$

Na qual existe apenas uma correspondência, um número real do intervalo [0,1], para cada elemento x.

Quanto mais próximo de 1 for o valor de μ_A maior é a possibilidade do elemento x pertencer ao conjunto A. Este grau de pertença dos elementos possibilita a ocorrência de transições graduais entre o verdadeiro e o falso.

A transição gradual é dada por:

$$\mu_A(x) : x \rightarrow [0,1], \quad \begin{cases} \mu_A(x) = 0 \\ 0 < \mu_A(x) < 1 \\ \mu_A(x) = 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

As funções de pertença utilizam termos linguísticos traduzidos numericamente e que permitem obter valores de saída, nas etapas de *fuzzificação* e *desfuzzificação*, respetivamente. Estas funções podem ser de

diversos tipos como retangulares, triangulares, trapezoidais e outras, sendo as últimas duas das mais recorrentes na literatura (Silva, 2018).

As funções de pertença triangulares e trapezoidais podem ser descritas através das equações seguintes e respetivamente:

$$\mu_A = \begin{cases} 0, & \text{se } x < x_1 \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & \text{se } x_1 < x \leq x_2 \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2}, & \text{se } x_2 < x \leq x_3 \\ 0, & \text{se } x > x_3 \end{cases}$$

$$\mu_A = \begin{cases} 0, & \text{se } x < x_1 \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & \text{se } x_1 < x \leq x_2 \\ 1, & \text{se } x_2 < x \leq x_3 \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2}, & \text{se } x_3 < x \leq x_4 \\ 0, & \text{se } x > x_4 \end{cases}$$

No estado atual da arte é possível encontrar vários exemplos de problemas complexos nos quais esta lógica tem contribuído para a sua compreensão, serve de exemplo Meng Tay & Peng Lim, 2006 na sua aplicação na fabricação de semicondutores, e Chung & Kim, 2014 na priorização de águas residuais.

2.3 Vantagens e Desvantagens da Lógica Fuzzy

As vantagens da lógica em relação a outros tipos de lógica são as seguintes (Zanette et al., 2006):

- Melhora o tratamento de dados imprecisos;
- Facilita o processo de especificação das regras de um sistema;
- Mais intuitiva devido à utilização de palavras em vez de números;
- Facilita a resolução de problemas complexos;
- Proporciona uma maior rapidez no desenvolvimento de protótipos de sistemas.

Podem ser apresentadas como desvantagens as seguintes (Sousa, 2014):

- Dificulta a análise de aspetos como a otimização;
- A precisão do sistema *fuzzy* encontra-se limitada pela experiência e conhecimento do especialista;
- Sistema é influenciado por todos os parâmetros do mesmo, como o método escolhido para a *fuzzificação*, ou o número de regras.

3. Metodologia

A metodologia proposta para a implementação da lógica *Fuzzy* na avaliação do risco de falha de uma eletrobomba de incêndios a bordo de um navio, vai contribuir para determinar o tipo de manutenção que melhor se adequa à realidade na organização, e no planeamento da manutenção dos ativos. Por conseguinte, vai ser então demonstrada a integração desta metodologia no âmbito de uma manutenção baseada no risco. O primeiro passo para a implementação da lógica *Fuzzy* será a escolha do equipamento a implementar a metodologia, os restantes encontram-se exposto na Fig.3.



Fig. 3 - Metodologia Fuzzy para um equipamento de um navio

4. Case Study – Eletrobomba de Incêndios

4.1 A manutenção e o equipamento no navio

As características gerais da eletrobomba de incêndios é o seguinte:

- Capacidade: 100 m³/h
- Head: 99.6 m
- Velocidade: 2950 l/min
- Potência Absorvida: 44.7 kW
- Potência do motor elétrico: 55 kW



Fig. 4 - Eletrobomba de Incêndios

O procedimento base de manutenção preventiva da eletrobomba de incêndios:

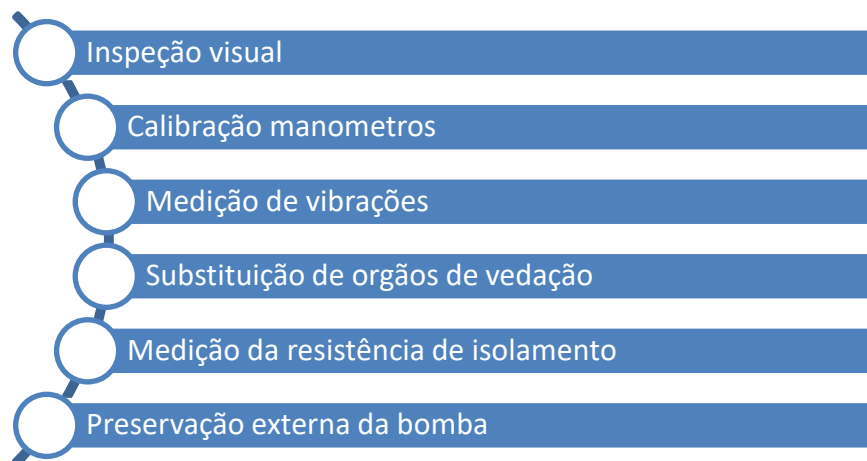


Fig. 5 – Manutenção base do sistema da eletrobomba de incêndios

Para efeito da construção do Fuzzy com informação sobre uma eletrobomba de incêndio é importante referir que o Navio Patrulha Oceânico possui várias Eletrobombas de Incêndio.

As eletrobombas de incêndio são equipamentos selecionados, o que quer dizer que o número horas de funcionamento é contabilizado para efeitos da sua gestão da manutenção, e que é considerado um equipamento vital na operacionalidade do navio.

4.2 Parametrização do Sistema Fuzzy

As tabelas de 1 a 9 representam as classificações da Frequência da falha, consequência do impacto na segurança e ambiente, do fator sequência, do nível de risco, regras de inferência e os resultados obtidos sobre o estado do equipamento de acordo com as inferências consideradas.

Tabela 1 - Classificação da Frequência da Falha

| Frequência da Falha | Falhas por Ano | Valor Modelo |
|---------------------|-----------------|--------------|
| Muito Frequente | $F \geq 15$ | 15 |
| Frequente | $9 \leq F < 15$ | 9 |
| Pouco Frequente | $5 \leq F < 9$ | 5 |
| Remota | $F < 5$ | 4 |

Tabela 2 - Classificação do Fator de Consequência - Impacto Operacional

| Impacto Operacional | Descrição da Consequência | Valor |
|---------------------|---|-------|
| Extremamente Alto | Os três eletrobombas de incêndios a bordo avariaram. Comprometimento da missão. Motores propulsores e grupos eletrogêneos com limite de arranques. | 10 |
| Muito Alto | Duas das eletrobombas de incêndios encontram-se avariadas e a outra já conta com um considerável número de horas sem manutenção. Possível avaria inopinada, indisponível em caso de incêndio. | 6 |
| Alto | Duas das eletrobombas de incêndios ultrapassaram as horas de funcionamento para substituição dos órgãos vedantes. Aumento do risco de anomalia das eletrobombas. | 4 |
| Moderado | Duas das eletrobombas estão perto de atingir o limite recomendado de horas sem manutenção. O funcionamento da eletrobomba começar a funcionar em modo degradado. | 2 |
| Baixo | Todas as eletrobombas se encontram com a manutenção regularizada. Nenhum impacto para os equipamentos e nas operações do navio. | 0 |

Tabela 3 - Classificação do Fator de Consequência - Impacto na Segurança e no Ambiente

| Impacto na Segurança e no Ambiente | Descrição da Consequência | Valor |
|---|---|--------------|
| Alto | Ocorrência de acidentes e incidentes graves para os equipamentos, guarnição e ambiente como fugas de água, curto circuito, risco de incêndio. | 5 |
| Moderado | Ocorrência de alguns acidentes e incidentes causando pequenos danos nos equipamentos circundantes, na guarnização e no ambiente. | 3 |
| Baixo | Causa alguns efeitos no meio ambiente, no entanto, não existe violação de leis associadas. | 1 |

Tabela 4 - Classificação do Fator de Consequência - Custos de Manutenção

| Custos de Manutenção | Valor |
|-----------------------------|--------------|
| Alto | 5 |
| Moderado | 3 |
| Baixo | 1 |

Tabela 0.5 - Classificação do Nível de Risco

| Nível de Risco | Valor |
|-----------------------|--------------------|
| Muito Crítico | $R > 250$ |
| Crítico | $150 < R \leq 250$ |
| Semicrítico | $100 < R \leq 150$ |
| Pouco Crítico | $50 < R \leq 176$ |
| Não Crítico | $R \leq 50$ |

Tabela 5 - Termos Linguísticos e Intervalos para a variável Frequência (F)

| Termo Linguístico | Abreviatura | Intervalo |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| Muito Frequente | MF | [15, 17, 18] |
| Frequente | Fr | [9, 11, 14] |
| Pouco Frequente | PF | [5, 7, 8] |
| Remota | Re | [0, 2, 4] |

Tabela 6 - Termos Linguísticos e Intervalos para a variável Consequência (C)

| Termo Linguístico | Abreviatura | Intervalo |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| Baixa | Ba | [0, 2, 4] |
| Moderada | Mo | [5, 7, 8] |
| Alta | A | [9, 10, 12] |
| Muito Alta | MA | [13, 14, 15] |
| Extremamente Alta | EA | [17, 20, 22] |

Tabela.7 - Termos Linguísticos e Intervalos para a variável Risco (R)

| Termo Linguístico | Abreviatura | Intervalo |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| Não Crítico | NC | [0 25 50] |
| Pouco Crítico | PC | [51 70 100] |
| Semicrítico | SC | [101 125 150] |
| Crítico | C | [151 200 250] |
| Muito Crítico | MC | [251 275 300] |

Tabela 8 - Regras de Inferência

| Nº da Regra | Regra |
|--------------------|--|
| 1 | Se (F é MF) e (C é Ba) então (R é NC) |
| 2 | Se (F é MF) e (C é Mo) então (R é PC) |
| 3 | Se (F é MF) e (C é A) então (R é SC) |
| 4 | Se (F é MF) e (C é MA) então (R é C) |
| 5 | Se (F é MF) e (C é EA) então (R é MC) |
| 6 | Se (F é Fr) e (C é Ba) então (R é NC) |
| 7 | Se (F é Fr) e (C é Mo) então (R é PC) |
| 8 | Se (F é Fr) e (C é A) então (R é SC) |
| 9 | Se (F é Fr) e (C é MA) então (R é C) |
| 10 | Se (F é Fr) e (C é EA) então (R é C) |
| 11 | Se (F é PF) e (C é Ba) então (R é NC) |
| 12 | Se (F é PF) e (C é Mo) então (R é NC) |
| 13 | Se (F é PF) e (C é A) então (R é PC) |
| 14 | Se (F é PF) e (C é MA) então (R é PC) |
| 15 | Se (F é PF) e (C é EA) então (R é SC) |
| 16 | Se (F é Re) e (C é Ba) então (R é NC) |
| 17 | Se (F é Re) e (C é Mo) então (R é NC) |
| 18 | Se (F é Re) e (C é A) então (R é NC) |
| 19 | Se (F é Re) e (C é Ma) então (R é NC) |
| 20 | Se (F é Re) e (C é Ea) então (R é PC) |

Para os atributos definidos e para as situações consideradas na tabela 8, obteve-se o cálculo de risco constante na Tab.10:

Tabela 9 - Resultado cálculo de risco

| Risco | TL R |
|--------------|--------------|
| 0 | Não Crítico |
| 12 | Não Crítico |
| 30 | Não Crítico |
| 48 | Não Crítico |
| 128 | Semi-Crítico |
| 36 | Não Crítico |
| 40 | Não Crítico |
| 110 | Semi-Crítico |
| 120 | Semi-Crítico |
| 182 | Crítico |
| 224 | Crítico |
| 150 | Semi-Crítico |

As funções de pertença utilizadas para converter os valores de entrada de frequência em termos linguísticos e os termos linguísticos em valores de saída estão traduzidas na Fig.3.

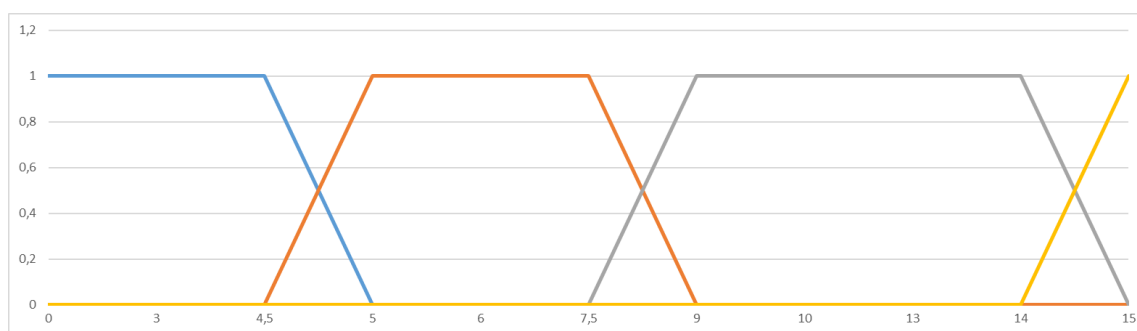


Figura 3: Função de pertinência trapezoidal

4.4 Análise de Resultados

No processo de aplicação da Lógica Fuzzy verificou-se que não se obteve nenhum resultado muito crítico.

O case study foi baseado num eletrobomba de incêndios de um navio.

Foram definidos os níveis dos atributos que serviram base para o desenvolvimento da metodologia.

Com base na inferência desenvolvida foram apresentados resultados num intervalo entre não crítico e crítico. Para validar a metodologia é necessário implementar o sistema desenvolvido *on job*, por forma a efetuar eventuais ajustes.

Das regras de inferência consideradas considera-se que estas estão bem definidas, no entanto como não se obteve nenhum resultado de muito crítico, poderá traduzir a necessidade observação do funcionamento do equipamento aplicando as presentes regras, mas ajustando se necessário.

Na função de pertinência trapezoidal não houve sobreposição de resultados pelo que é traduzido num modelo suficientemente ajustado.

5. Conclusão

A metodologia Fuzzy permite a medição de registos cognitivos humanos, para isso devem ser considerados alguns critérios e estes devem ter vários níveis para ser possível obter uma quantificação de resultados através de um algoritmo.

A lógica Fuzzy converte os dados de entrada em texto em valores fuzzy com recurso às funções de pertinência.

A aplicação da Lógica de Fuzzy em equipamentos de navios pode ser útil no apoio ao desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão em gestão da manutenção de navios da Marinha Portuguesa.

O resultado do algoritmo pode ser um nível de risco que permita perceber a urgência de execução de uma manutenção num equipamento.

Foi aplicada a metodologia Fuzzy a uma eletrobomba de incêndios de um navio com o objetivo de servir de sistema de apoio à decisão à sua manutenção.

No desenvolvimento deste sistema de apoio à decisão, a função de pertinência trapezoidal não deu sobreposição de resultados pelo que se considera, a metodologia e o método, validados mas sujeito a uma aplicação prática sob observação dos responsáveis por implementação do sistema.

Referências

NP (2007). Norma Portuguesa: NP-EN13306, Terminologia da Manutenção. IPQ: Instituto Português da Qualidade.

- Kumru, M., & Kumru, P. Y. (2013). Fuzzy FMEA application to improve purchasing process in a public hospital. *Applied Soft Computing*, 13(1), 721–733. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.08.007>
- Maletič, D., Maletič, M., Lovrenčić, V., Al-Najjar, B., & Gomiscek, B. (2014). An Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Sensitivity Analysis for Maintenance Policy Selection. *Organizacija*, 47, 177–189. <https://doi.org/10.2478/orga-2014-0016>
- Manzini, R., Regattieri, A., Pham, A., & Ferrari, E. (2010). *Maintenance for Industrial Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-575-8>
- Morvay, Z., & Gvozdenac, D. (2008). *Applied Industrial Energy and Environmental Management*. John Wiley & Sons.
- Paixão, A. (2010). *Modelo de Sistema de Inferência Difuso para Auxílio da Resposta ao Risco em Projetos*. FCT-UNL.
- Reis, J. (2019). *Integração da Metodologia Fuzzy num Modelo para Aquisição de Equipamentos Médicos*. FCT-UNL.
- Ross, T. (2010). Logic and Fuzzy Systems. Em *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (pp. 117–173). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119994374.ch5>
- Silva, B. (2018). *Proposta de um modelo Fuzzy—AMFE integrado no DMAIC aplicado à Indústria Automóvel*. FCT-UNL.
- Silvestri, L., Forcina, A., Introna, V., Santolamazza, A., & Cesarotti, V. (2020). Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 123, 103335. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335>
- Sousa, A. (2014). *Controladores Linguísticos Fuzzy*. ISEL.
- Zanette, A., Radanovitsck, E., & Gonçalves, W. (2006). *Fuzzy Logic*. UFRGS.
- Chung, E.-S., & Kim, Y. (2014). Development of fuzzy multi-criteria approach to prioritize locations of treated wastewater use considering climate change scenarios. *Journal of Environmental Management*, 146, 505–516. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.013>
- Campos, M. L., & Márquez, A. C. (2008). Review, Classification and Comparative Analysis of Maintenance Management Models. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(3), 239–244. <https://doi.org/10.3182/20081205-2-CL->
- Dhillon, B. S. (2002). *Engineering Maintenance: A Modern Approach*. CRC Press.
- Dinmohammadi, F., & Shaffee, M. (2013). A fuzzy-FMEA risk assessment approach for offshore wind turbines. *Int. J. Progn. Heal. Manag.*, 4(13), 59–68. Scopus.
- Ierace, S., & Cavalieri, S. (2008). Maintenance Strategy Selection: A comparison between Fuzzy Logic and Analytic Hierarchy Process. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(3), 228–233. <https://doi.org/10.3182/20081205-2-CL-4009.00041>
- Jaderi, F., Ibrahim, Z. Z., & Zahiri, M. R. (2019). Criticality analysis of petrochemical assets using risk based maintenance and the fuzzy inference system. *Process Safety and Environmental Protection*, 121, 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.11.005>