PROPOSTA DE DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS PARA TESTE E AVALIAÇÃO DE SONARES PASSIVOS DE SUBMARINOS

Leandro da Silva Teixeira
Fundação Ezute
Rua do Rócio, 313 - 11º Andar - Vila Olímpia – São Paulo – SP
lsteixeira@ezute.org.br

Cleber Almeida de Oliveira
Fundação Ezute
Rua do Rócio, 313 - 11º Andar - Vila Olímpia – São Paulo – SP
caoliveira@ezute.org.br

Robert Douglas Barbosa Funchal
Fundação Ezute
Rua do Rócio, 313 - 11º Andar - Vila Olímpia – São Paulo – SP
rfunchal@ezute.org.br

RESUMO

Teste e Avaliação (T&A) é uma atividade crítica da engenharia de sistemas, pois permite aos engenheiros a garantia de que os produtos atendam às especificações e as necessidades dos usuários finais antes de entrarem em produção. O presente estudo visa a propor uma abordagem, baseado nas técnicas de Delineamento de Experimentos (DOE), para a atividade de T&A de sonar passivo de submarino, contribuindo para a assertividade do processo de validação do desempenho nas operações de detecção e de acompanhamento dos alvos.

PALAVRAS CHAVE. Teste e Avaliação, Delineamento de Experimentos, Diagrama de Decomposição Funcional.

Tópicos: Poder Marítimo, Defesa e Pesquisa Operacional; PO em defesa e Segurança Pública.

ABSTRACT

Test and Evaluation (T&E) is a critical activity in systems engineering, as it allows engineers to ensure that products meet end-user specifications and needs before they go into production. The present study aims to propose an approach, based on the techniques of Design of Experiments (DOE), for the T&E activity of submarine's passive sonar, contributing to the assertiveness of the performance validation process for target detection and tracking operations.

KEYWORDS. Testing and Evaluation. Design of experiments. Dendritic Analysis

Paper Topics: Poder Marítimo, Defesa e Pesquisa Operacional; PO em defesa e Segurança Pública.

https://proceedings.science/p/157398?lang=pt-br

1. Introdução

No contexto bélico, o Sonar (*Sound Navigation and Ranging*) é um sensor que emprega a energia acústica (propagação sonora) com o intuito de auxiliar a navegação, de comunicar ou de detectar objetos sobre ou sob a superfície da água, podendo empregar a tecnologia do equipamento no modo passivo ou ativo. O sonar no modo passivo basicamente analisa a energia acústica recebida, obtendo a marcação e as características do som produzido pelos objetos acompanhados. O sonar no modo ativo emite pulsos de sons e é capaz de receber seus ecos, determinando a marcação e a distância do objeto.

A guerra naval moderna faz uso extensivo de sonares nos modos passivo e ativo em embarcações, aeronaves e instalações fixas. Os submarinos evitam o uso do sonar no modo ativo a fim de minimizar os riscos de revelar a sua presença e posição às forças inimigas. Dessa forma, o submarino emprega primordialmente seus sonares em modo passivo para as operações de detecção e de acompanhamento do objeto de interesse. A determinação do estado do objeto de interesse em termos de posição, rumo e velocidade, no modo passivo, é realizado por meio do processo denominado "Análise do Movimento do Alvo" (*Track Movement Analysis* - TMA), que depende das informações de acompanhamento do objeto providas pelo sonar. Neste contexto, o desempenho do sonar passivo para a detecção e o acompanhamento de objetos no mar é vital para os submarinos ao longo de todo o seu ciclo de vida. O processo técnico de validação do desempenho, previsto na [ISO/IEC/IEEE 15288 2015], pretendido do Sonar em seu ambiente operacional visa a fornecer evidências objetivas e paramétricas de que o Sonar, quando em uso, cumpre seus objetivos de missão e requisitos funcionais. Este processo de validação é conduzido por meio da atividade denominada Teste e Avaliação (T&A).

O planejamento da atividade de T&A é apoiado por um processo estruturado de Delineamento de Experimentos (*Design of Experiments* – DOE), que fornece os métodos científicos e estatísticos necessários para a definição e elaboração dos testes e os seus respectivos planos de análise, considerando a análise da significância dos diversos fatores envolvidos [DoD 2016].

A literatura apresenta diferentes abordagens sobre o emprego de DOE para validação de desempenho de sistemas no contexto bélico, como os trabalhos de [Ahner e McCarthy 2020], [Bordelon 2006] e [Fowler e Rogers 2015].

O presente estudo visa a propor uma abordagem, baseado nas técnicas de DOE, para a atividade de T&A de sonar passivo de submarino, contribuindo para a assertividade do processo de validação do desempenho nas operações de detecção e de acompanhamento dos alvos.

Para isso, as seções seguintes descreverão com maiores detalhes a atividade de T&A com ênfase no problema abordado neste trabalho. Em seguida, alguns detalhes sobre DOE e a proposta para a validação de sonares passivos. A seção resultados apresenta um estudo de caso com dados simulados para ilustrar a aplicação do DOE. Por fim, as principais conclusões do trabalho são descritas.

2. Teste e Avaliação

Teste e Avaliação (T&A) é definido por [Reynolds 1996] como a atividade de mensuração do desempenho de um sistema e de avaliação dos resultados, realizada com um ou mais propósitos, sendo reconhecida como uma disciplina científica que aborda: (i) o planejamento e a condução de testes orientados para a coleta de dados relacionados ao desempenho de um sistema; (ii) a análise dos dados obtidos; e (iii) a avaliação dos resultados.

As informações provenientes dessa atividade podem ser utilizadas para identificar e mitigar riscos e para fornecer dados para validar modelos e simulações, além de determinar se os sistemas são operacionalmente eficazes e adequados para o usuário típico. Quanto melhor for o trabalho de T&A, melhores serão as condições para a tomada de decisão, e mais alta será a confiabilidade dos resultados de validação dos requisitos funcionais do sensor.

Segundo DoD [2016], apesar dos termos "Teste" e "Avaliação" serem usados mais frequentemente de forma conjunta, há claras distinções semânticas no processo de concepção, desenvolvimento e produção de um sistema. Teste denota qualquer procedimento para obter,

https://proceedings.science/p/157398?lang=pt-br

verificar ou fornecer dados para a avaliação dos seguintes tópicos: a) progresso na realização de objetivos de desenvolvimento; b) desempenho, capacidade operacional e adequação de sistemas, subsistemas, componentes e itens de equipamento; e c) vulnerabilidade e letalidade dos sistemas, subsistemas, componentes e itens de equipamento. Avaliação é interpretada como o processo pelo qual os dados obtidos são organizados de forma lógica, analisados e comparados com os níveis de desempenho esperados, de modo a apoiar o processo de tomada de decisão.

A atividade de T&A requer uma abordagem analítica ampla com foco cuidadoso no desenvolvimento de um plano de teste para fornecer respostas para os tomadores de decisão em todas as fases de aquisição ou desenvolvimento do sistema. Esse é composto pelas etapas citadas na Figura 1, adaptada de DoD [2016].

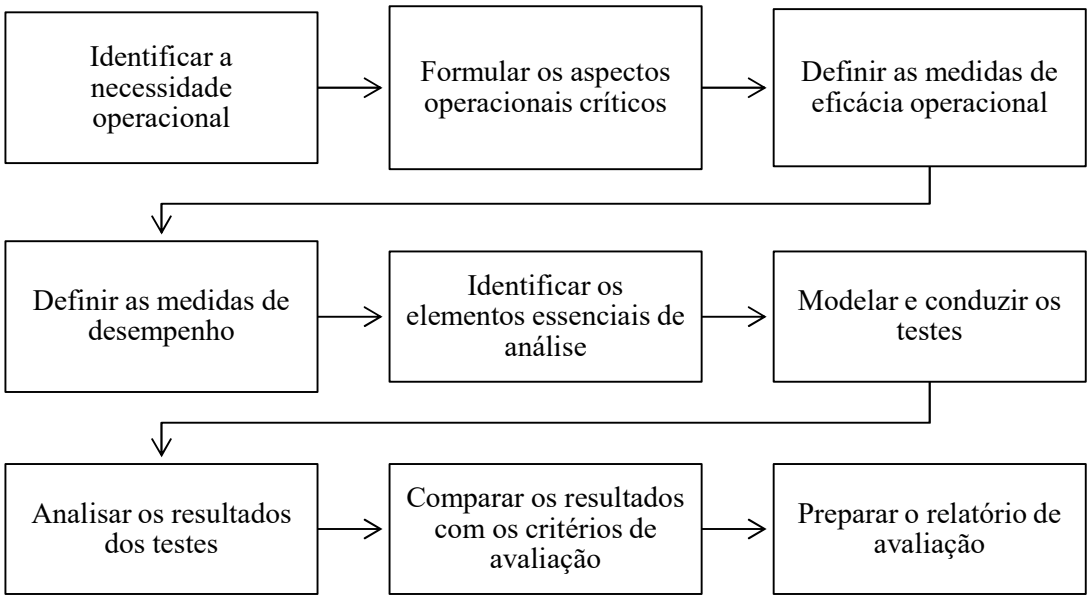


Figura 1 – Etapas da Atividade de T&A

A primeira etapa consiste na identificação de uma deficiência ou necessidade operacional. Em seguida devem ser identificados os Aspectos Operacionais Críticos (AOC). Entende-se por AOC qualquer questionamento, em alto nível, de uma capacidade do sistema ou equipamento no cenário previsto. Uma vez definido o AOC, a estrutura deve ser desenvolvida com o propósito de coletar a informação necessária para fornecer uma resposta para cada AOC. Assim, os AOC devem ser desmembrados em Medidas de Eficácia Operacional (MEO) e Medidas de Desempenho (MED). As MEO são parâmetros que avaliam a capacidade do sistema em avaliação no cumprimento das tarefas a ele designadas, sob um conjunto de condições. As MED são componentes, ou subconjuntos, das MEO e podem ser entendidas como qualquer medida que o sistema em avaliação alcança no cumprimento de suas tarefas para quantificar uma MEO, pelo fato desta não ser diretamente mensurável. Em seguida, os Elementos Essenciais de Análise (EEA) que são os dados para mensurar as MED e MEO são consolidados. Por fim, os analistas modelam e conduzem os testes num ambiente o mais próximo possível do emprego real do sistema, analisam os resultados esperados e emitem relatórios para os tomadores de decisão [Teixeira 2015].

A definição dos AOCs e das respectivas MEOs, MEDs e EEAs é feita por meio de estudos analíticos a partir do entendimento da necessidade operacional apresentada, onde são utilizadas questões que reflitam controvérsias e incertezas sobre o sistema submetido ao processo de T&A adotando uma abordagem sistêmica. Algumas técnicas têm-se mostrado eficientes no apoio a essa definição, entre elas a que faz uso de Diagramas de Decomposição Funcional (DDF). DDF são estruturas de árvores, que pretendem descrever o fluxo de informações e capacidades que o sistema deve ter durante uma situação operacional, sendo que o primeiro nó dessa estrutura consiste na definição do Aspecto Operacional Crítico (AOC).

https://proceedings.science/p/157398?lang=pt-br

A necessidade operacional levantada para este trabalho, no contexto bélico, consiste no fato de que o sonar passivo é utilizado pelos submarinos como principal sensor para as operações de detecção e acompanhamento de alvos, alimentando os algoritmos de TMA para a determinação do estado do objeto em termos de posição, rumo e velocidade. Assim, derivamos o seguinte AOC: **"Qual é a capacidade do sonar passivo no processo de TMA?"**. O TMA depende, sobretudo, da informação da marcação do alvo disponibilizada pelo sonar passivo. Logo, a precisão dessa informação se torna fundamental para avaliar a capacidade do sonar nesse processo. Com isso, temos condições de desenhar o DDF ilustrado na Figura 2:

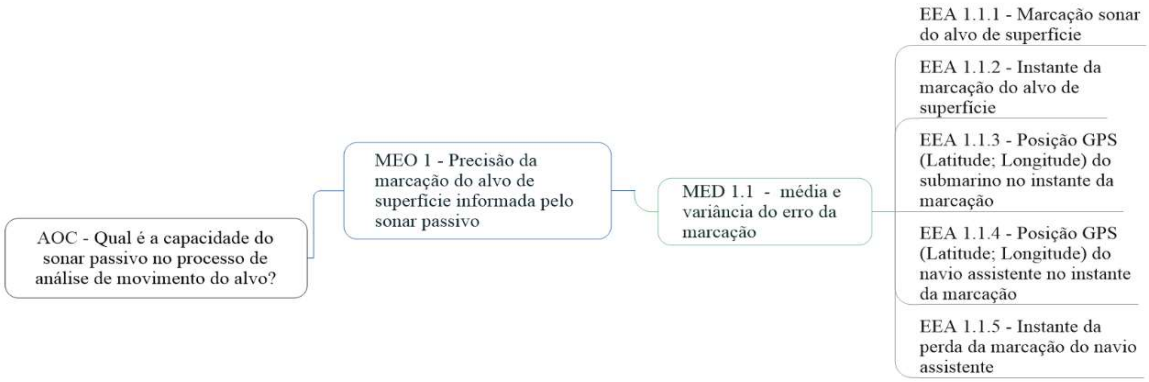


Figura 2 - Diagrama de Decomposição Funcional

Definido o DDF, a modelagem dos testes é conduzida por meio de um processo estruturado, que fornece os métodos científicos e estatísticos com rigores necessários para definição e elaboração dos testes e dos seus respectivos planos de análise, denominado Delineamento de Experimentos (*Design of Experiments* – DOE) e descrito na seção seguinte.

3. Proposta do Delineamento de experimentos

Segundo [Gilmore 2010], DOE é uma metodologia estatística para planejar, conduzir e analisar um teste exploratório permitindo que somente dados apropriados e na quantidade necessária sejam coletados e analisados por métodos estatísticos que resultam em conclusões válidas e objetivas.

De uma maneira geral, delinear um experimento significa especificar a unidade experimental, os fatores externos a serem controlados e a variável em análise. Além disso, é necessário definir a maneira de designar os tratamentos às unidades e o número de unidades experimentais que serão testadas. A unidade experimental é a unidade física ou biológica usada para conduzir o experimento. A variável em análise é a característica medida ou observada no experimento.

Com relação às técnicas que podem ser usadas nos experimentos, [Vieira 2006] define três tipos de delineamento: (i) inteiramente ao acaso, quando as condições experimentais são homogêneas em todas as unidades experimentais testadas; (ii) com blocagem, quando as condições experimentais não são homogêneas, mas podem ser agrupadas em conjuntos homogêneos denominados blocos; e (iii) em quadrados latinos, quando cada tratamento aparece uma única vez em cada linha e cada coluna. Nos experimentos inteiramente ao acaso ou ensaios randômicos, os tratamentos são designados aleatoriamente às unidades experimentais. No entanto, quando o pesquisador dispõe de pequenos grupos de unidades similares, mas em quantidade insuficiente para executar o experimento, o mesmo deve optar em fazê-lo em blocos. Nestes experimentos, os erros gerados pela utilização de blocos diferentes são considerados de forma a não interferir nos resultados da análise.

A unidade experimental submetida à atividade de T&A neste trabalho é o sonar passivo embarcado em submarinos. A variável em análise é a capacidade do sonar passivo no processo de TMA mensurada por meio da MEO 1 e respectivas MEDs apresentadas no DDF da Figura 3. Contudo, essa variável deve ser avaliada nas condições mais próximas possíveis do emprego real

do sonar passivo de acordo com os preceitos de T&A [DoD 2016]. Assim, baseado na experiência operativa dos autores e na elicitação da opinião de especialistas sobre o assunto são definidos os seguintes fatores e os seus respectivos níveis que podem influenciar o erro de marcação: profundidade na qual o submarino costuma navegar dividida nos níveis de 14,5 metros e 55 metros e o setor em que ocorre a marcação do alvo de superfície pelo sonar passivo do submarino dividido em 24 níveis que correspondem a intervalos de 15 graus a partir da marcação 000º até a marcação 359º.

A relação sinal-ruído mínima detectável varia em função da distância entre o sonar e o alvo e influencia diretamente o valor da marcação informada pelo sonar e se trata de um fator não controlável que pode provocar uma grande variação para o valor da MED 1.1. Portanto, para eliminar a influência desta fonte de variabilidade, optou-se pelo delineamento fatorial 2 x 24 com blocagem, considerando a distância entre o submarino e o navio assistente como bloco nos níveis k = 1, 2, 3 e 4, sendo a execução do teste conforme a cinemática ilustrada na Figura 3.

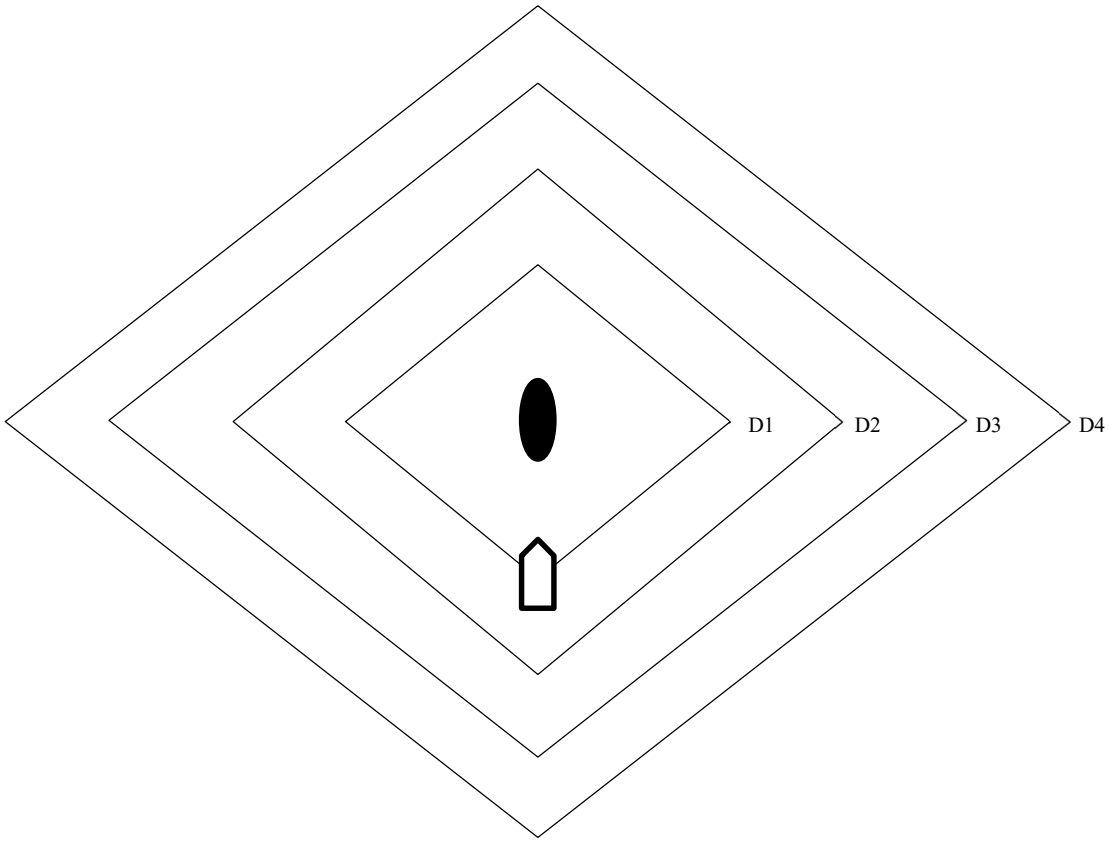


Figura 3 - Cinemática do submarino e do navio assistente

Nesta cinemática, o submarino encontra-se no centro da figura ilustrada e deve manter velocidade constante igual a 4 nós durante o experimento. Enquanto, o navio assistente que faz o papel de alvo de superfície, mantem a velocidade de 10 nós e segue o rumo de modo a manter a marcação relativa do submarino, alterando as distâncias conforme o percurso definido pelas linhas do losango definido.

Nesse experimento, os EEA coletados devem ser tabulados de acordo com os passos a seguir:

a) Transformar os dados de Latitude e Longitude (Lat.; Long.) do submarino e do navio assistente para a unidade de graus decimais;
b) Ajustar temporalmente os dados na seguinte ordenação: (i) Posição do submarino ajustada: ajuste temporal entre os dados de marcação sonar e posição; e (ii) Posição

entre o submarino e o navio assistente: ajuste temporal entre a posição do submarino ajustada e o navio assistente.

c) Realizar o cálculo do erro de marcação para os dados, a partir da marcação do sonar (*true bearing*), da posição do submarino em cada instante e da posição do navio assistente em cada instante aplicando a seguinte fórmula [Miguens 2019]:

$$\varepsilon_{marcação} = marcação_{real} - marcação_{sensor}$$

Onde a marcação real é calculada a partir da seguinte fórmula:

Se $Lat_{Sub} < Lat_{navio}$ e $Long_{Sub} < Long_{navio}$: $marcação_{real} = \theta + 180°$;
Se $Lat_{Sub} > Lat_{navio}$ e $Long_{Sub} < Long_{navio}$: $marcação_{real} = 360° - \theta$;
Se $Lat_{Sub} < Lat_{navio}$ e $Long_{Sub} > Long_{navio}$: $marcação_{real} = 180° - \theta$; e
Se $Lat_{Sub} > Lat_{navio}$ e $Long_{Sub} > Long_{navio}$: $marcação_{real} = \theta$.

Onde θ é dado por: $\theta = arctg\left(\frac{(LONG_{sub} - LON\ _{navio}) * \cos\left(\frac{LAT_{sub} + LAT_{navio}}{2}\right)}{LAT_{sub} - LAT_{navio}}\right)$.

A Tabela 1 apresenta o delineamento proposto que consiste num delineamento fatorial 2 x 24 com blocagem, considerando a distância entre o submarino e o navio assistente como bloco nos níveis k = 1, 2, 3 e 4. Devido a questões de confidencialidade, os valores reais das distâncias utilizadas no experimento não podem ser apresentados.

Tabela 1 - Proposta do Delineamento de Experimento

		Nível	**Parâmetro**
Fator	Profundidade (A)	Cota Periscópica (14,5 metros)	i = 1
		Cota de Segurança (55 metros)	i = 2
	Setor (B)	1 (0° - 14°)	j = 1
		2 (15° - 29°)	j = 2
		3 (30° - 44°)	j = 3
		...	...
		24 (345° - 359°)	j = 24
Bloco	Distância	D1	k = 1
		D2	k = 2
		D3	k = 3
		D4	k = 4

O modelo estatístico subjacente ao experimento é apresentado abaixo:

$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$, sendo: i = níveis do fator A; j = níveis do fator B; k = níveis do bloco; μ = média geral do experimento; y_k = efeito do k-ésimo bloco; α_i = efeito do i-ésimo nível do Fator A; β_j= efeito do j-ésimo nível do Fator B; $(\alpha\beta)_{ij}$ = efeito de interação do i-ésimo nível do fator A e j-ésimo nível do fator B; e ε_{ijk}= erro aleatório com distribuição normal.

Sendo posto, as seguintes hipóteses podem ser testadas:

i. Hipótese nula (H_0): As médias provenientes do erro de marcação da interação entre os fatores Setor e Profundidade são iguais; e
   Hipótese alternativa (H_1): Pelo menos uma das médias dessa interação entre os fatores Setor e Profundidade é diferente das demais.
ii. Hipótese nula (H_0): As médias provenientes do erro da marcação do fator Setor são iguais; e
   Hipótese alternativa (H_1): Pelo menos uma das médias do erro de marcação do fator Setor é diferente das demais.
iii. Hipótese nula (H_0): As médias provenientes do erro da marcação do fator Profundidade são iguais; e
   Hipótese alternativa (H_1): Pelo menos uma das médias do erro de marcação do fator Profundidade é diferente das demais.

iv. Hipótese nula (H_0): As médias provenientes entre os níveis no erro de marcação do bloco são iguais; e
Hipótese alternativa (H_1): Pelo menos uma das médias do bloco é diferente das demais.

4. Resultados

Apresentamos para fins didáticos na Tabela 2, médias aleatórias dos erros de marcação para o experimento delineado adaptadas dos EEA reais obtidos durante a execução do experimento.

Tabela 2 - Resultados experimentais

Bloco Distância	**1**		**2**		**3**		**4**	
Setor \ **Profundidade**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**
1	-0,3	-0,5	-0,1	0,4	0,3	0,5	4,7	2,4
2	-0,8	-0,6	1,7	1,3	2,1	1	1,3	2,8
3	-0,6	-0,3	-1	1,8	1,3	-3	2,7	-3,3
4	0,3	-0,1	-1,5	-0,7	3	1,4	-3,3	3,8
5	-0,1	0,1	2,5	1,8	1,5	0,2	0,1	2,5
6	0,3	-0,6	-1,7	-1,6	-2,4	2,6	-2,1	1,9
7	0,5	-0,1	0,6	-1,1	1,7	-1,8	0,6	4,6
8	-0,1	0,7	-0,4	-1	-0,3	-3	-2,6	-2
9	0,9	0	-1	1	-0,1	-3	1,9	0,3
10	0,9	-0,8	1	0,6	1,5	2,1	3,2	1,1
11	0,1	0,8	-0,3	-1,1	-1,5	0,1	-1,7	1,3
12	-0,4	-1	-0,4	0,7	1,8	-1,3	0,7	0
13	0	-0,9	-0,8	2,3	-2	-2,3	0,6	-2,2
14	0,5	0,3	1,1	-1	-1	-1,2	-3,9	2
15	-0,8	-0,6	1,5	0,3	3	0,5	-0,9	1,1
16	0,6	0,4	1,9	-1,4	3,3	2,9	0	-2,9
17	-0,6	-0,6	-1,3	-0,1	-0,7	0,8	-2	3,1
18	0,2	-0,7	0,3	1,8	2,1	3,8	5,2	-1,7
19	0,1	-0,6	0,3	-2	-0,3	-1,2	-0,6	-0,7
20	-0,3	0,9	1,9	0,2	-0,2	0,5	-2	3,3
21	-0,9	-0,8	0,9	-0,1	-2,5	-0,1	-0,9	0,8
22	-0,7	-0,3	0,5	1,8	1,2	3,2	1,8	0
23	0,5	-0,9	0,2	-1,2	4	-1,4	0,8	-1,4
24	-0,1	0,4	-0,8	-1,7	0,1	0,1	-0,4	5,2

Observamos que as médias dos erros de marcação estão em unidades de graus e que o sinal (-) em algumas células representam que o erro de marcação do sonar passivo está a boreste do navio assistente e na ausência de sinal, o erro está a bombordo.

Uma análise exploratória dos resultados apresentados na Tabela 2 revela, respectivamente, nos *boxplots* da Figura 4 que a marcação informada pelo sonar passivo possui diferentes desempenhos nos setores, desempenho próximo de acordo com a profundidade e variabilidade crescente em função do aumento da distância entre o submarino e o navio assistente.

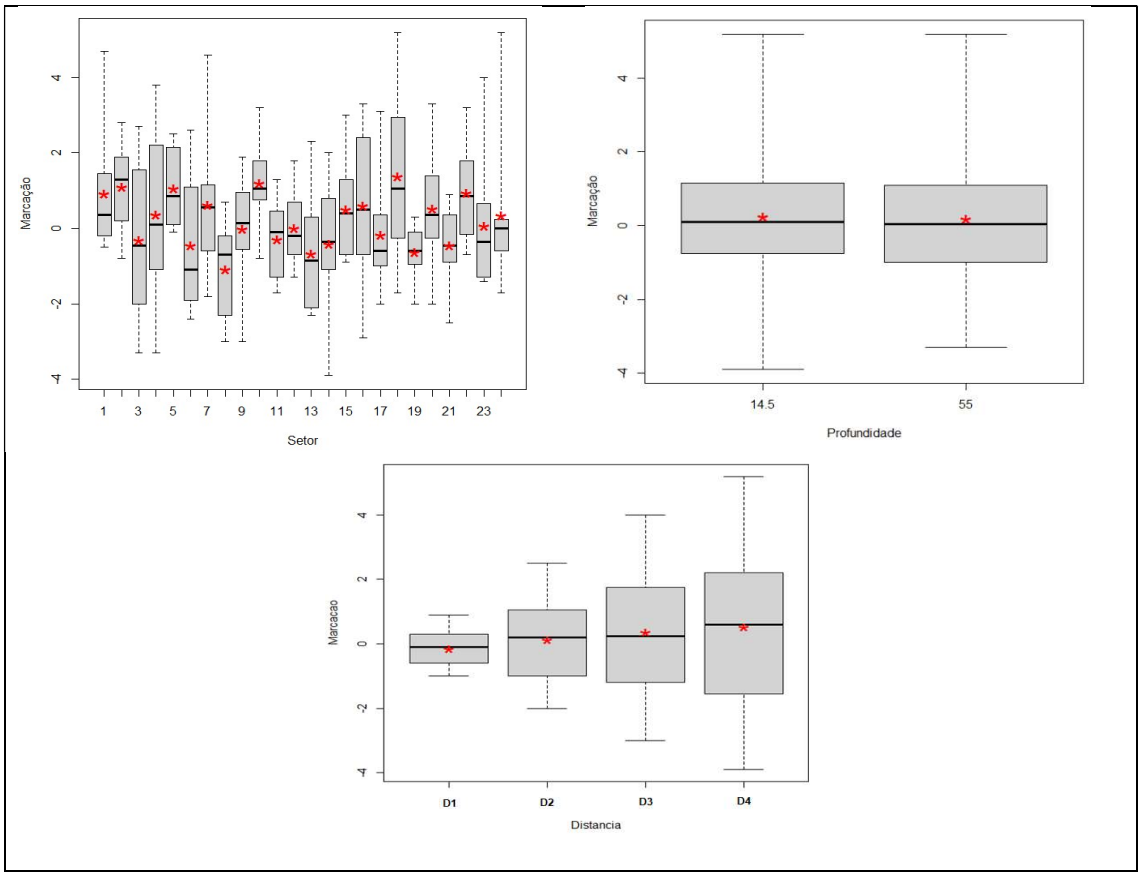


Figura 4 - Boxplots dos resultados experimentais

Conforme [Carpinetti 2009], deve ser feita a análise de variância (ANOVA) para verificar se as hipóteses nulas estão sendo atendida conforme um experimento fatorial em blocos.

Com o auxílio do software "R" [R Core Team 2018] obteve-se os seguintes resultados para a ANOVA, descritos na Figura 5.

```
             Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
A            23   85.0   3.696   1.439 0.1024
B             1    0.1   0.120   0.047 0.8292
Distancia     1   11.9  11.919   4.642 0.0329 *
A:B          23   69.7   3.028   1.179 0.2728
Residuals   143  367.2   2.568
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figura 5 - Resultados da ANOVA

Na ANOVA, verifica-se que o p-valor da estatística F, Pr(>F), para a distância (bloco) está abaixo do nível de significância usual de 5%, logo a hipótese nula de igualdade das médias do erro de marcação foi rejeitada. Portanto, as médias diferem significativamente dentro do tratamento em questão.

Neste caso, conforme [Lawson 2014], podemos aplicar o Teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, utilizando a função *HSD.test* do pacote *agricolae* para o software "R" [De

Mendiburu 2019], ilustrado na Figura 6, de modo a verificar, dentro do bloco, qual é a distância em que as médias dos erros de marcação do sonar passivo diferem.

```
> HSD.test(anova,as.factor("Distancia"),console=TRUE)

Study: anova ~ as.factor("Distancia")

HSD Test for YSensorCA

Mean Square Error:  2.603827

Distancia,  means

    YSensorCA       std  r  Min Max
D1 -0.1375000 0.5598727 48 -1.0 0.9
D2  0.1270833 1.2383482 48 -2.0 2.5
D3  0.3604167 1.9133061 48 -3.0 4.0
D4  0.5250000 2.3657575 48 -3.9 5.2

Alpha: 0.05 ; DF Error: 141
Critical Value of Studentized Range: 3.676862

Minimun Significant Difference: 0.8563725

Treatments with the same letter are not significantly different.

    YSensorCA groups
D4  0.5250000      a
D3  0.3604167      a
D2  0.1270833      a
D1 -0.1375000      a
```

Figura 6 - Resultados do teste de Tukey

Os resultados apresentados pela aplicação do teste indicam que a distância D4 apresentou o maior erro de marcação, porém, não diferiu significativamente do erro de marcação da distância D3. As distâncias de D2 e D1 apresentaram menor erro de marcação.

De modo a complementar a avaliação do desempenho do sonar, o gráfico da Figura 7 permite a visualização da interação do erro de marcação para cada profundidade para cada setor.

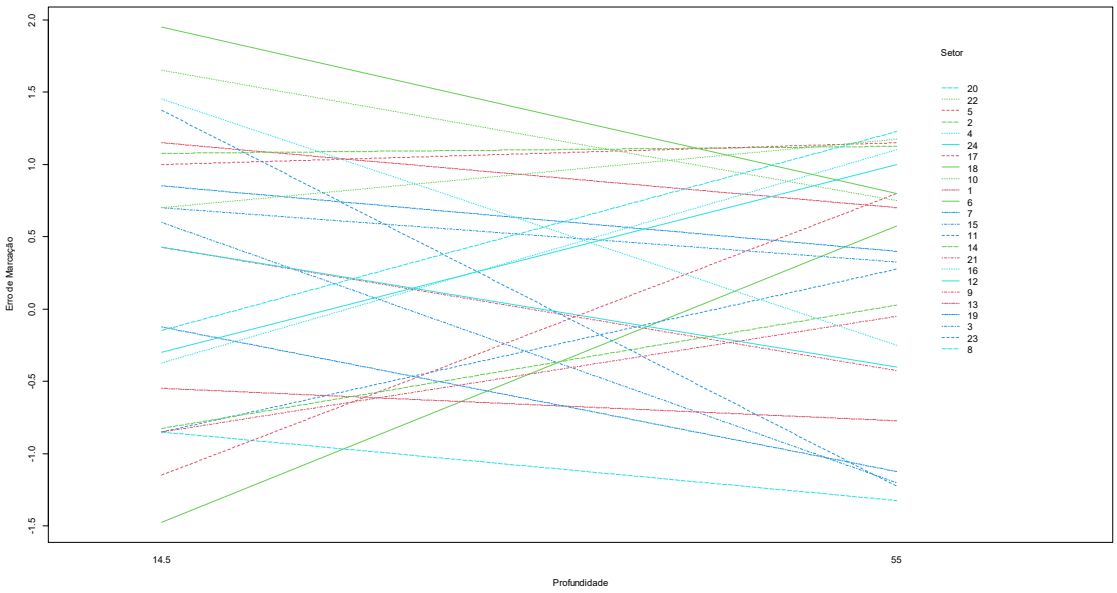
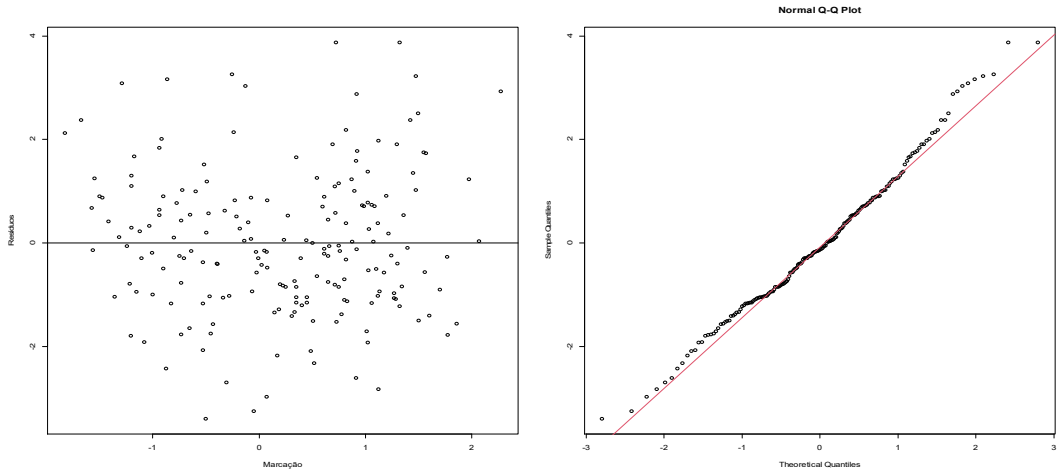


Figura 7 - Gráfico de interação

Por fim, deve ser verificado a adequabilidade do modelo de forma que o erro experimental possua distribuição normal. Isto é feito a partir de gráficos de resíduos que indicam um padrão aleatório (Figura 8a) para erros normalmente distribuídos (Figura 8b).



(a) (b)

Figura 8 - Gráficos dos resíduos

5. Conclusões

A abordagem proposta para a atividade de T&A, apoiada pelo processo estruturado de DOE, contribuiu para a assertividade do processo de validação do desempenho nas operações de detecção e de acompanhamento dos alvos, a partir do estabelecimento das MEO e MED voltadas para a avaliação da precisão da marcação informada pelo sonar.

A aplicação da técnica DDF facilitou a rastreabilidade das MEO e das MED atinentes ao AOC. Além disso, facilitou a indicação dos fatores e níveis a serem considerados no processo de delineamento de experimentos. O uso do planejamento fatorial com blocagem nos dados, apesar de serem simulados, mostrou-se válido, pois criou condições para a obtenção de um número maior de inferências com uma menor quantidade de experimentos a serem executados.

Trabalhos futuros poderão abordar a aplicação do DOE e do DDF em atividades de T&A voltados para outras tarefas de emprego de submarinos em diferentes cenários.

Referências

Ahner, D. e McCarthy, A. (2020). Response surface modeling of precision-guided fragmentation munitions. The Journal of Defense Modeling and Simulation, 17(1), 83-97.

Bordelon, L. (2006). Design of experiments applied to flight testing. NATO RTO Lecture Series SCI-176 on Mission Systems Engineering.

Carpinetti, L. C. R. (2009). Planejamento e análise de experimentos. USP, EESC, Departamento de Produção.

Department of Defense (DoD). (2016). Test and Evaluation Management Guide. USA.

De Mendiburu, F. (2019). Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. R Package version 1.3-1.

Fowler, L. e Rogers, J. (2015). Airframe performance optimization of guided projectiles using design of experiments. Journal of Spacecraft and Rockets, 52(6), 1603-1613.

Gilmore, J. M. (2010). Guidance on the use of Design of Experiments (DOE) in Test and Evaluation. Washington, DC: Office of the Director, Operational Test and Evaluation.

International Organization for Standardization (ISO). (2015). ISO/IEC/IEEE 15288. Systems and software engineering. System life cycle processes. International Standardization Organization/International Electrotechnical Commission.

Lawson, J. (2014). Design and Analysis of Experiments with R. CRC press.

Miguens, A. P. (2019). Navegação: A Ciência e a Arte. Web page. https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/npublicacoes. Acessado: 2022-06-06.

R Core Team. R (2018). A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Reynolds, M. T. (1996). Test and Evaluation of Complex Systems (Vol. 12). John Wiley & Sons Incorporated.

Teixeira, L. (2015). Avaliação operacional e racionalidade nos processos decisórios. Curso Superior. Escola de Guerra Naval. Rio de Janeiro.

Vieira, S. (2006). Análise de Variância. São Paulo: Editora Atlas.