

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A VALIDAÇÃO E PARA A IDENTIFICAÇÃO DE FATORES DE SATURAÇÃO DE UM SIMULADOR TEWA

Daniel Ferreira Manso*, Ricardo Sutério**, Marco Aurélio Leandro*

* Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias – CEP 12.228-900 – São José dos Campos – SP

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja – CEP 12.227-010 – São José dos Campos - SP

Resumo: Otimização, identificação de estratégias robustas e aprendizagem são alguns dos diversos exemplos do que se pode obter através do uso de simuladores. Todavia, para que isto seja possível, é imperioso que os mesmos reproduzam de forma fiel e consistente as respostas dadas pelos respectivos sistemas ou equipamentos reais a eles associados. Validação é parte de um processo maior que visa exatamente à averiguação da condição de fidelidade e consistência supracitadas. Neste sentido, o presente artigo apresenta uma proposta de metodologia para validação de um simulador de Sistema Automático de Seleção de Alvos e Designação de Armamentos baseada em experimentação estatística. Tal proposta visa, adicionalmente, identificar a combinação de fatores capazes de saturar o sistema aludido. Ou seja, a metodologia proposta possui a característica dual de propiciar a validação do próprio simulador e concomitante aprendizado acerca das capacidades, limitações e características do sistema real; tudo num único processo.

Palavras chave: DOE, Validação, TEWA.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de simuladores e de sistemas de simulação vem se tornando cada vez mais útil e necessária, seja para fins militares ou civis.

Um dos principais motivos para tal é capacidade que os mesmos possuem em fornecer importantes informações que podem influenciar processos de tomada de decisão. Além disto, ainda é possível identificar linhas de ação robustas, estratégias de otimização de processos [1].

No que tange especificamente às atividades militares, observa-se que manobras, exercícios e operações reais demandam necessariamente, além dos riscos associados, empenho considerável de pessoal e recursos financeiros. Nesta direção, pondera-se que a realização sistemática e exaustiva de treinamento real para tripulações e operadores, é inviável na sua totalidade, o que ratifica a relevância dos simuladores.

O Sistema Automático de Seleção de Alvos e Designação de Armamentos (TE – *Threat Evaluation & WA - Weapon Assignment*) é um sistema que objetiva prover apoio a decisão em um cenário operacional complexo e dinâmico, no qual o intervalo de tempo entre a decisão e tomada da ação é crucial. O TEWA atua minimizando a dependência dos operadores e o risco de perda de performance associado. A maior parte da literatura a respeito de TE e de problemas de designação incluem aplicações em gerenciamento de risco e aplicações em medicina, além das aplicações militares. Para maiores detalhes e uma revisão envolvendo TE & WA consultar [2].

Todavia, para que este e outros modelos sejam realmente úteis, faz-se necessário que os mesmos reproduzam adequadamente as características de interesse do sistema a ser simulado. Caso contrário, além de inertes no tocante à finalidade a que se destinam, os mesmos podem ainda, em função de resultados e respostas inconsistentes, deturpar a adequada compreensão do fenômeno real, levando o planejador a conclusões equivocadas, [1].

O acrônimo VV&A, respectivamente, verificação, validação e acreditação é comumente encontrado na literatura envolvendo Análise Operacional, nomeadamente, abarcando modelos para simulação de sistemas de uso das Forças Armadas. Segundo [1], a verificação de um modelo pode ser entendida como a garantia que o modelo computadorizado e sua implementação estejam corretos. A validação é a comprovação de que um modelo computadorizado dentro do seu domínio de aplicabilidade possui uma gama satisfatória de rigor compatível com a aplicação a que se destina o modelo, [3]. Por último, a fase de acreditação, segundo o Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (DoD), pode ser entendida como a certificação oficial que um modelo e seus dados são aceitáveis para uso em uma aplicação específica (DoDI 5000.61 2003).

Relativamente à fase de validação, observa-se o desenvolvimento de diversos trabalhos e pesquisas ao redor do mundo, através dos quais é possível verificar diferentes abordagens e metodologias, que são função direta da natureza do sistema avaliado, de suas respectivas respostas e dos objetivos associados aos mesmos.

Uma das abordagens identificadas na literatura sobre validação de modelos diz respeito ao custo e ao tempo requeridos. Em [4], sugere-se que, ao invés de buscar a plenitude do processo, sob o risco da inxequibilidade, testes e avaliações devem ser criteriosamente planejados com base no que se espera de um simulador. Ou seja, deve-se buscar níveis aceitáveis de significância para que o processo de validação seja viável [5].

Posto isto, propor-se-á, uma metodologia para a validação de um *software* de simulação de Sistema

Automático de Seleção de Alvos e Designação de Armamentos (TEWA) baseada em experimentação estatística. Concomitantemente, adotar-se-á ações que viabilizem a identificação dos fatores capazes de saturar o sistema estudado. Assim, além do processo de validação, será possível ainda incorporar um processo de aprendizado num único procedimento.

Para tanto, o presente trabalho está dividido em 5 seções. Além da introdução, a metodologia será descrita na segunda seção; na terceira seção, a teoria envolvendo DOE (*Design and Analysis of Experiments* – Delineamento de Experimentos) será visitada; na quarta seção, os resultados obtidos serão apresentados e, finalmente, a quinta seção conterá a conclusão e desafios envolvendo trabalhos.

II. METODOLOGIA

Para a validação do TEWA, partiu-se do pressuposto de que o simulador avaliado corresponde exatamente ao sistema real, conforme ilustrado pela Fig. 1. Destarte, considerou-se que a fase de verificação quanto à consistência do modelo conceitual já foi previamente realizada. Assim sendo, adotou-se a abordagem do tipo “Validação e Verificação Independente” (IV&V) [1].

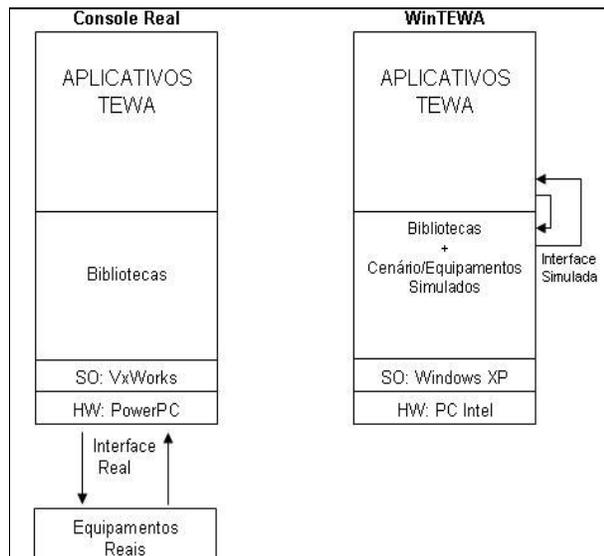


Figura 1. Comparação esquemática - TEWA

A partir de então buscou-se a validação do simulador através da técnica denominada: “Variabilidade de Parâmetro – Análise de Sensibilidade”. Segundo [1], esta técnica consiste em alterar os valores das entradas e dos parâmetros internos de um modelo para determinar o efeito sobre o seu comportamento ou comportamento das respostas. O mesmo efeito deve ocorrer tanto no modelo, como no sistema real. No tocante aos parâmetros são sensíveis, ou seja, que causam alterações no comportamento do modelo ou nas respostas, devem ser determinados com maior acurácia *a priori* do uso no modelo (Isso pode exigir iterações no desenvolvimento).

Adicionalmente, vislumbrando-se a possibilidade de prever o comportamento do sistema, utilizou-se a técnica denominada: “Validação Preditiva”, [1], segundo a qual o modelo é utilizado para estimar o comportamento do sistema real e, então, comparações são feitas entre o

comportamento do sistema e o comportamento do modelo estimado para determinar a sua correspondência.

Para tanto, projetou-se um experimento que fosse capaz de, a partir de parâmetros relevantes, doravante denominados fatores relevantes, gerar respostas passíveis de comparação com vistas à validação posterior do simulador e, ao mesmo tempo, que pudesse fornecer informações acerca da saturação do sistema. Ou seja, que possibilitasse identificar situações que levassem o sistema a não ser mais capaz de selecionar alvos e designar armamentos, corroborando com a abordagem de [6] no que tange à compreensão do fenômeno real a partir da análise das respostas computacionais.

III. DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS - DOE

A importância de identificar corretamente o problema e os objetivos que se deseja alcançar antes de iniciar qualquer processo de montagem, execução ou análise de um experimento, é senso comum na comunidade científica.

Os autores em [7], por exemplo, defendem que, para um experimento simulado, o primeiro passo a ser dado consiste da formulação adequada do problema e do planejamento dos estudos. Subsequentemente, aspectos adicionais também devem ser levados em conta, tais como: a definição das questões a serem respondidas, parâmetros a serem avaliados e condições de contorno a serem consideradas.

De acordo com [6], há ainda outros pontos que devem ser observados, como: o desenvolvimento de uma compreensão adequada do sistema em estudo e a possibilidade de identificação de estratégias robustas ou ótimas.

Nesta direção, estabeleceu-se, conforme citado na seção anterior, dois objetivos básicos. O primeiro deles consiste na proposição de uma metodologia para validação do TEWA, enquanto que o segundo objetivo consiste da identificação dos fatores que possam saturar o sistema em tela.

A partir de então, optou-se por avaliar os seguintes fatores: velocidade das aeronaves, altura das aeronaves, defasagem de proa entre as aeronaves e número de aeronaves, respectivamente identificados nas figuras como: *speed*, *heigh*, *heading* e *number*. Estes fatores estão relacionados aos alvos a serem selecionados pelo sistema TEWA. A opção pelos mesmo baseou-se na experiência operativa dos autores.

Assim sendo, restava definir as condições de contorno do experimento que, por uma questão de confidencialidade, não serão totalmente explicitadas. Desta forma, considerar-se-á apenas níveis de valores, alto e baixo, para cada um dos fatores escolhidos.

Adicionalmente, buscou-se projetar um experimento capaz de gerar resultados que auxiliassem o analista a compreender melhor as características do sistema, proporcionando, também, aprendizado prático concomitante ao processo de validação em tela, conforme proposto por [6]. Ou seja, buscou-se, além da validação anteriormente citada, identificar uma estratégia ótima que de saturasse o sistema TEWA.

Para a escolha do projeto de experimento mais adequado, avaliou-se inicialmente o número de fatores e os objetivos esperados. Assim sendo, alguns delineamentos tais como o 2^K Fatorial, o 2^K Fatorial com Níveis Mistos e o 2^K Fatorial com Adição de Pontos Centrais foram considerados por suas características [8].

Com relação aos dois últimos delineamentos, ponderou-se que trabalhar com mais de dois níveis para todos ou para alguns dos fatores seria inócua à medida em que o objetivo de identificar uma estratégia que fosse capaz de saturar o sistema demandaria a experimentação nos extremos operacionais. Assim sendo, não faria sentido algum considerar qualquer nível intermediário.

Desta feita, o delineamento 2^K Fatorial teria se mostrado totalmente adequado não fosse o objetivo de validar o sistema computacional em tela. Isto se deu devido ao fato da necessidade de realizar o experimento não só com o simulador mas, também, com aeronaves e embarcações reais.

Neste sentido, seria necessário de substancial empenho financeiro para que 16 rodadas experimentais pudessem ser realizadas na prática, o que poderia inviabilizar a execução do experimento.

Assim sendo, ao assumir que as possíveis interações de segunda ou terceira ordem poderiam ser desprezadas por não apresentarem influência significativa sobre o evento, optou-se pelo delineamento 2^{4-1}_{IV} (Fatorial Fracional – Resolução IV) [8]. O que proporcionou a redução de 50% no número de rodadas necessárias e a consequente economia de recursos para a realização do experimento real.

Desta forma, de acordo com o representado na Tabela 1, obteve-se o projeto selecionado com cada um dos fatores ajustados em diferentes combinações de níveis para cada rodada.

Tabela 1. Projeto do experimento - 2^{4-1}_{IV}

Rodada	Número de Aeronaves	Defasagem de Proa	Velocidade	Altura
1	1	1	-1	-1
2	1	-1	1	-1
3	-1	-1	1	1
4	-1	1	1	-1
5	-1	1	-1	1
6	-1	-1	-1	-1
7	1	1	1	1
8	1	-1	-1	1

Por fim, vale ressaltar que a estrutura pseudônima para o experimento 2^{4-1}_{IV} é: $A = A^2 BCD$, $B = AB^2 CD = ACD$, $C = ABC^2 D = ABD$, $D = ABCD^2 = ABC$, $AB = CD$, $AC = BD$, $BC = AD$ e $I = ABCD$.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma vez rodado o experimento e obtidas as respostas de interesse, apresentadas pela Tabela 2, em unidades de distância (UD), passou-se para a fase da análise estatística. Utilizou-se o *software R - project*, versão 2.15.0, o pacote Rcommander, versão 1.8-4 e os *plugins* DOE e DOEx.

Tabela 2. Respostas obtidas

Rodada	Resposta (em UD)
1	3.67
2	0
3	3.42
4	6.33
5	6.4
6	4.0
7	3.18
8	0.86

Após obtidos os resultados, para que se pudesse validar o simulador do TEWA, bastava que se executasse o experimento com aeronaves, embarcações e com o sistema real. Assim, ambos resultados poderiam ser comparados e, posteriormente, validados ou não.

Destarte, passou-se para a consecução do segundo objetivo proposto, a identificação de uma estratégia que fosse capaz de saturar o sistema avaliado.

Para tal, analisou-se quantitativamente as respostas obtidas. Inicialmente, em função da escala métrica utilizada, não foi possível identificar com precisão a distribuição de probabilidade correlata. Assim, tentou-se a transformação de Johnson com o intuito de se obter uma distribuição normal [9], o que não foi possível.

Ao avaliar outras possíveis soluções, considerou-se a abordagem binária, na qual o insucesso do sistema TEWA em abater a aeronave seria representado pelo número 0 e, analogamente, o sucesso seria representado pelo número 1. Porém, tal abordagem resultaria na impossibilidade da análise mais profunda dos dados obtidos, limitando o processo de aprendizado inicialmente proposto.

Assim, após algumas tentativas, identificou-se a escala métrica mais adequada, o que propiciou a distribuição gaussiana das respostas anteriormente encontradas. Para confirmar a normalidade supracitada, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk [10], obtendo-se o valor de $W = 0,9211$ e $p\text{-value} = 0,4387$.

Subsequentemente, partiu-se para a estimação e análise dos efeitos dos fatores que, para fins de ilustração, é dada especificamente para o fator “número de aeronaves” (*speed*), A, por:

$$A = \frac{1}{4}[-(1) + ad - bd + ab - cd + ac - bc = abcd] \quad (1)$$

Onde a =número de aeronaves (*speed*), b =defasagem de proa entre as aeronaves (*heading*), c =velocidade (*speed*) e d =altura (*heigh*).

Graficamente, observa-se tais efeitos através da análise qualitativa da Fig. 2, sendo possível notar que os fatores “número de aeronaves” ($A=number$) e “defasagem de proa entre as aeronaves” ($B=heading$) são consideravelmente mais relevantes que todos os outros fatores para um nível de significância de 0,5.

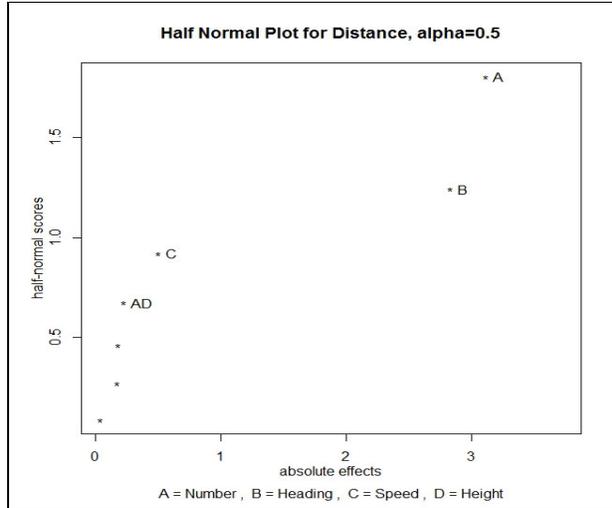


Figura 2. Gráfico de estimativa de efeitos

Confirma-se a assertiva anterior ao se observar a Fig. 3, a qual ilustra a grande variação ocorrida na resposta (*Distance*) em função dos fatores “número de aeronaves” (*Number*) e “defasagem de proa entre as aeronaves” (*Heading*) e, em contrapartida, pequena variação em função dos fatores “velocidade” (*Speed*) e “altura” (*Height*).

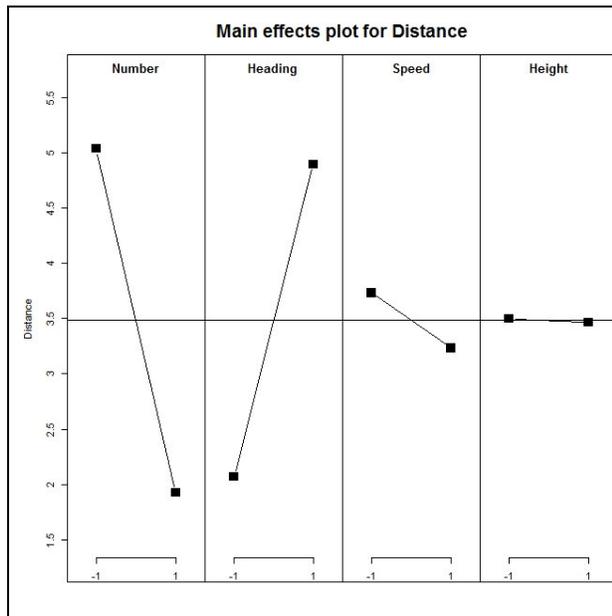


Figura 3. Gráfico de efeitos principais

Para fins de análise numérica, tem-se a Tabela 3, que apresenta a estimativa dos efeitos dos fatores em termos da soma dos quadrados (SS – *Sum of Squares*). Nesta situação, temos que:

$$SS = \frac{(CONTRAST)^2}{8n} \quad (2)$$

Tabela 3. Estimativa numérica dos efeitos

Fator	SS
(A) Número de Aeronaves (<i>Number</i>)	19.344
(B) Defasagem de Proa (<i>Heading</i>)	15.961
(C) Velocidade (<i>Speed</i>)	0.500
(D) Altura (<i>Heigh</i>)	0.002
(A:B) Número de Aeronaves : Defasagem de Proa	0.058
(A:D) Número de Aeronaves : Altura	0.097
(B:D) Defasagem de Proa : Altura	0.061

Uma vez analisados os gráficos representados pelas Fig. 2 e 3, bem como após a análise da Tabela 3, julgou-se adequado iniciar a construção de um modelo de regressão linear considerando os fatores A, B, C e A:D; ainda que estes dois últimos tenham apresentado pouca influência na resposta. Assim, temos:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \varepsilon \quad (3)$$

Onde, β representam os valores predeterminados das estimativas do efeito de cada fator, ε representa o erro experimental e x_1, x_2, x_3 e $x_1 x_4$ representam, respectivamente, os fatores A, B, C e A:D.

Porém, ao analisar os resíduos do modelo proposto através de análise gráfica e do teste Shapiro-Wilk, constatou-se que o mesmo não apresentava características de normalidade. Além disso, a análise de variância mostrou que os fatores C e A:D continuaram influenciar minimamente a resposta, o que corrobora com a suposição inicial dos autores de que interações de segunda ou terceira ordem não influenciariam nas respostas.

Assim, optou-se por adotar o modelo de regressão linear simplificado, contendo apenas os fatores A e B:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (4)$$

A partir de então, conforme representado pela Tabela 4, realizou-se a análise de variância (ANOVA), obtendo-se $R^2_{Adj} = 0.9721$ e p-Value significativo para os fatores A e B.

Tabela 4. ANOVA modelo: $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$

Fator	Graus de Liberdade	SS	F-Value	p-Value
A	1	19.344	134.65	8.343 ⁻⁰⁵
B	1	15.961	111.10	0.0001327
Resíduos	5	0.7183	R-squared ajustado: 0.9721	

Tal análise indica que apenas os fatores A, “número de aeronaves” (*Speed*), e B, “defasagem de proa entre as aeronaves” (*Heading*), realmente influenciam a resposta do modelo, “distância” (*Distance*). Isto pode, adicionalmente, ser visto com facilidade através da Fig. 4.

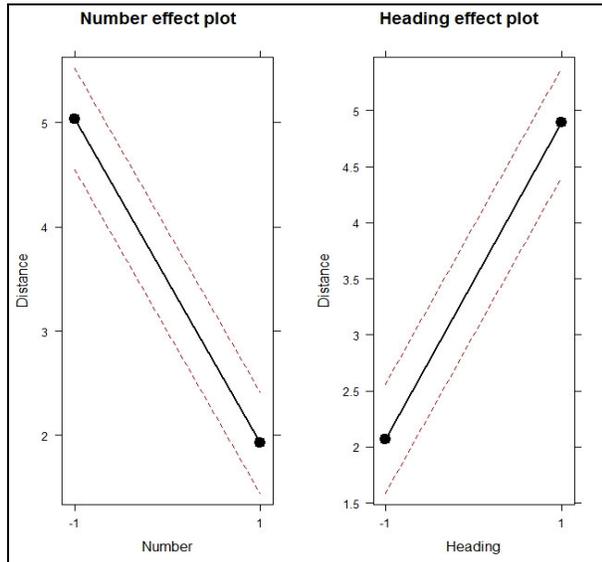


Figura 4. Gráfico de influência dos fatores A e B

Assim sendo, passou-se para a fase de avaliação de adequabilidade do modelo linear, realizando-se a análise dos resíduos através dos gráficos contidos na Fig. 5 e através do teste Shapiro-Wilk. Ou seja, qualitativamente através dos gráficos e quantitativamente através do teste supracitado, obtendo-se para este último o valor de $W = 0.896$ e $p\text{-value} = 0.2656$, o que confirma que o modelo utilizado é adequado.

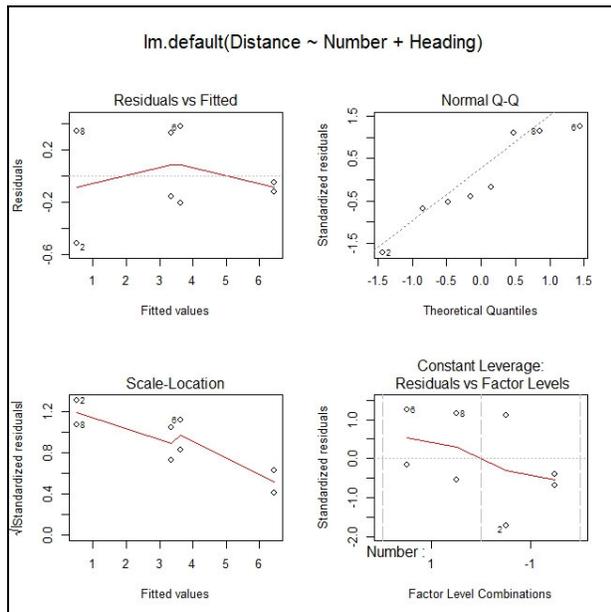


Figura 5. Análise básica de resíduos

Desta forma, o modelo de preditivo final encontrado pôde ser representado como:

$$\hat{y} = 3,482 - 1,555A + 1,413B \quad (5)$$

Daí, gerou-se as superfícies de contorno e de resposta, constantes das Fig. 6 e 7, o que viabilizou a identificação da combinação de fatores capaz de saturar o sistema TEWA. A saber: o “número de aeronaves” (*Number*) em seu nível mais alto e, ao mesmo tempo, a “defasagem de proas” (*Heading*) em seu nível mais baixo.

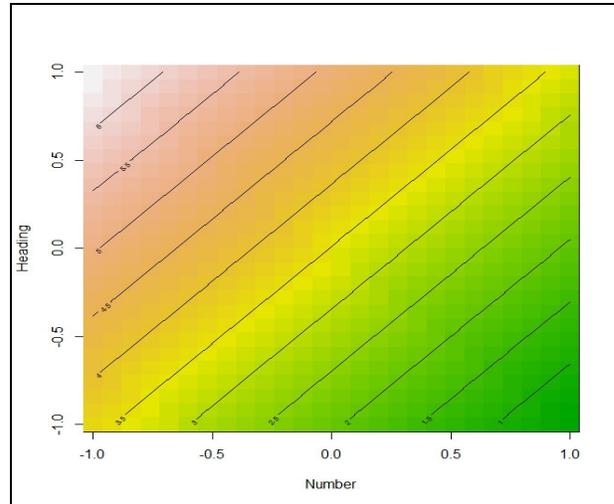


Figura 6. Superfície de contorno

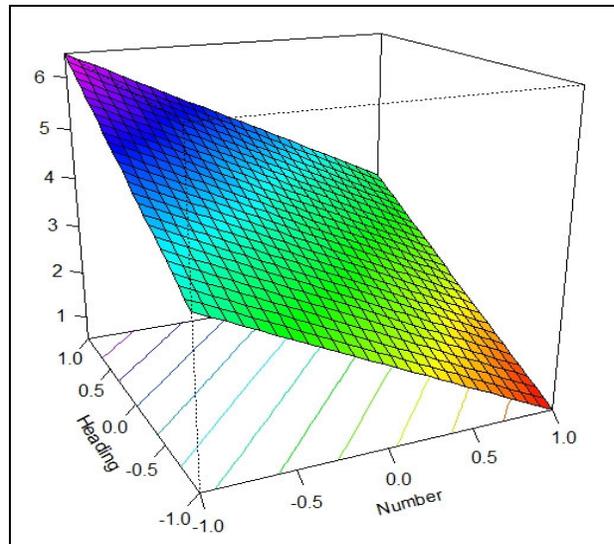


Figura 7. Superfície de resposta

V. CONCLUSÃO

O presente artigo buscou abordar uma das fases do acrônimo VV&A, respectivamente, verificação, validação e acreditação, sugerindo uma metodologia para validação de um simulador do sistema TEWA.

Para a validação do referido simulador, partiu-se do pressuposto, conforme citado na seção II do presente trabalho, de que a verificação quanto à consistência do modelo conceitual já havia sido previamente realizada. Assim sendo, adotou-se a abordagem do tipo “Validação e Verificação Independente” (IV&V). Foram usadas as abordagens: “Variabilidade de Parâmetro – Análise de

Sensibilidade”, na qual os valores das entradas e dos parâmetros internos de um modelo são variados para determinar o efeito sobre o seu comportamento ou comportamento das respostas.

Adicionalmente, utilizou-se “Validação Preditiva”, segundo a qual o modelo é utilizado para estimar o comportamento do sistema real e, então, comparações são feitas entre o comportamento do sistema e o comportamento do modelo estimado para determinar a sua correspondência.

Considerando a realização do experimento com aeronaves, embarcações e com o sistema TEWA real, visando à validação do simulador avaliado, recomenda-se o delineamento do tipo *Split-Plot* que, segundo [8], é uma generalização de um delineamento fatorial fracional no qual não é possível aleatorizar a ordem de execução de algum dos fatores (*hard to change factor*).

Tal sugestão pauta-se no fato de que a variação aleatória do fator altura das aeronaves, durante a execução do experimento real, poderá dificultar ou inviabilizar a sua execução conforme o planejado. Concomitantemente, pretende-se manter as características do projeto 2_{IV}^{4-1} , previamente executado, em função dos motivos citados na seção III.

Objetivando concluir a validação proposta e comparar os resultados de ambos experimentos, sugere-se a clássica abordagem do Teste de Hipótese proposta por Fisher [11], assumindo-se a hipótese nula de que o resultado obtido a partir do experimento real é igual ao resultado obtido a partir do experimento simulado. Assim sendo, será possível validar ou não o sistema em abordado, total ou parcialmente.

Além da metodologia proposta para validação do simulador do sistema TEWA, o conhecimento obtido identificou a combinação de fatores capaz de saturar o sistema. A saber: o “número de aeronaves” (*number*) em seu nível mais alto e, ao mesmo tempo, a “defasagem de proas” (*number*) em seu nível mais baixo.

Finalmente, o *software* R – *Project* mostrou-se totalmente adequado para todas as fases dos experimentos aqui apresentados.

REFERÊNCIAS

- [1] Sargent, Robert G.. *Verification and Validation of Simulation Models*. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2007, Syracuse. Proceedings. Syracuse: IEEE, 2007. p. 124 - 137. Disponível em: <<http://www.informs-sim.org/wsc07papers/014.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2012.
- [2] Roux, J.N.; van Vuuren, J.H.. *Threat evaluation and weapon assignment decision support: A review of the state of the art*. 23. Orion, 2007. p. 151 - 186. Disponível em: <<http://dip.sun.ac.za/~vuuren/papers/tewa.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2012.
- [3] Schingerles et al. *Terminology for model credibility*. In: SIMULATION, 32.,1979. p. 103 - 104.
- [4] Sargent, Robert G. *Chapter IX: Progress in Modelling and Simulation*. In: SARGENT, Robert G.. *Verification and*

Validation of Simulation Models. London: Academic Press, 1982. p. 159-169.

[5] Wood, O.. *MIT model analysis program: what we have learned about policy model review*. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1., 1986, New Jersey. **Proceedings**. New Jersey: IEEE, 1986. p. 248 - 252.

[6] Kleijnen, J. P. C. et al. *A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments: State-of-the-Art-Review*. Informs: Journal on Computing, Monterey, p. 263-289. jan. 2005.

[7] Law, Averill M.; KELTON, W. David. (1991) - *Simulation Modeling and Analysis*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.

[8] Montgomery, Douglas C.. *Design and Analysis of Experiment*. 7. ed. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

[9] Chou, y. Polansky, A.M. e Mason, R.L.. *Transforming nonnormal Data to Normality in Statistical Process Control*. Journal of Quality Technology, 30, 1988. p. 133-141.

[10] Shapiro, S. S.; Wilk, M. B.. *An Analysis of Variance Test for Normality*. 52. Biometrika, 1965. p.591 - 611.

[11] Fisher, R. A.. *Statistical Methods for Research Workers*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1925. p. 43.