

Modelo empírico para a predição da distância de aquisição do *seeker* de um míssil

Bruno Morato Arnaut, Denise B. Ferrari, Ricardo Suterio

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

Pç Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vilas das Acácias - CEP 12.2228-900 - São José dos Campos - SP, Brasil

Resumo — Muitos problemas em engenharia requerem experimentação para a melhor compreensão dos fenômenos físicos. A partir daí, modelos matemáticos empíricos podem ser construídos para representação e análise do sistema de interesse. Este trabalho propõe um modelo empírico para a predição da distância de aquisição do *seeker* de um míssil, a partir de técnicas de projetos e análise de experimentos e de dados fornecidos pelo fabricante do míssil. A predição da distância de aquisição é realizada em função de três fatores: altitude do alvo, ângulo de aspecto e seção reta radar. O modelo obtido é analisado, mostrando-se adequado para a aplicação em simuladores de missões de defesa aérea.

Palavras-chaves — Projeto e análise de experimentos, ANOVA, míssil - *seeker*.

I. INTRODUÇÃO

O projeto e a análise de experimentos tem um papel relevante ao longo do ciclo de vida de sistemas de engenharia, auxiliando o desenvolvimento de produtos, a qualificação de processos produtivos e a melhoria das operações. Dentre os principais aspectos que caracterizam esta disciplina, pode-se destacar: (a) dispõe de um conjunto de técnicas e métodos científicos que permitem ao experimentador escolher as abordagens de planejamento e execução do experimento, bem como o emprego de ferramentas estatísticas para a análise dos dados obtidos; (b) favorece o entendimento dos fatores que podem influenciar ou não o desempenho do sistema, a fim de contribuir para as especificações de projeto e melhoria de produtos e processos; (c) por intermédio das ferramentas estatísticas de análise dos dados, apoia as decisões na definição de requisitos e na escolha de soluções de projeto; (d) permite construir modelos matemáticos empíricos para o sistema de interesse, podendo-se inferir sobre seu comportamento, dentro dos limites do espaço amostral; (e) propicia, pela análise dos resultados obtidos a partir de modelos empíricos, validar os resultados de modelos teóricos.

Além dos aspectos acima listados, os modelos empíricos gerados a partir de projetos de experimentos podem ser empregados em simulação. Maiores informações sobre modelos de simulação aleatórios e determinísticos podem ser obtidas nos trabalhos publicados por Kleijnen [6] e Sacks [7].

A simulação de sistemas é geralmente empregada no desenvolvimento de novos produtos, na análise de ambientes operacionais e no treinamento de pessoal, reduzindo os custos de projeto e operações. O uso de modelo matemático empírico é particularmente útil quando a complexidade, o custo de simulação ou outros motivos específicos tornam inviável o desenvolvimento ou aplicação de modelo determinístico (modelo teórico ou mecanicista). A motivação do presente trabalho é aplicar técnicas de projetos e análise de experimentos em um problema específico de simulação do comportamento do *seeker* de um míssil, em que as únicas informações disponíveis são as tabelas de dados fornecidas pelo fabricante do míssil. O presente estudo partiu de uma necessidade do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), órgão diretamente subordinado ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), de estudar como transformar os dados de distância de aquisição do *seeker* de um míssil em uma função contínua para usar em um *plugin* da plataforma AEROGRAF – simulador que agrega um conjunto de funcionalidades, em um ambiente georreferenciado, para auxílio à decisão e avaliação de cenários táticos no planejamento de missões de defesa aérea [3]. Assim, este artigo tem como objetivo construir um modelo para predição da distância de aquisição do *seeker* de um míssil, em função das variações de altitude do alvo, ângulo de aspecto e seção reta radar.

O artigo está organizado da seguinte maneira: primeiramente contextualiza-se o problema, identificando a necessidade do modelo empírico e caracterizando a aplicação do *seeker* em sistemas de armas de mísseis. Em seguida, os fundamentos de análise de variância (ANOVA) e o projeto fatorial para a construção de um modelo para a previsão da distância de aquisição do *seeker* são desenvolvidos. Por fim, os resultados obtidos são discutidos e algumas conclusões sobre o estudo são apresentadas.

II. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Nos anos 90, o então projeto AEROGRAF foi criado com o objetivo de fornecer módulos de *software* para atender às necessidades da Aeronáutica em Inteligência (INT), Geoprocessamento (GEO), Planejamento de Defesa Aérea (PDA) e Planejamento de Missão Aérea (PMA) para auxiliar a decisão e avaliação de cenários táticos em ambiente georreferenciado. A partir de 2003, os módulos foram integrados em um único sistema (plataforma AEROGRAF), com a possibilidade de agregar funcionalidades por meio de *plugins* - programas onde são adicionadas funções a outros programas maiores, provendo alguma funcionalidade especial ou específica [3].

A necessidade do modelo matemático empírico que representasse a distância de aquisição do *seeker* do míssil em função dos fatores altitude do alvo, ângulo de aspecto e seção reta radar originou-se da necessidade de simular o comportamento deste sistema na plataforma AEROGRAF.

O *seeker* é um elemento do míssil que tem um importante papel no seu guiamento. Ele tem como funções, dentre outras: prover as medidas de movimento do alvo requeridas pelos mecanismos de guiamento, seguir o alvo por meio de um sensor (e.g.: radar, infravermelho, laser ou ótico), rastrear o alvo continuamente depois da aquisição, medir a variação angular da linha de visada com o tempo, estabilizar o míssil em relação aos desvios de rotas [2].

Storiuis [2] mostra alguns aspectos que indicam complexidade deste subsistema, destacando-se o problema de aberração (ou refração) do erro angular, de característica não linear, e o *parasitic attitude loop*, que pode alterar a característica de resposta do míssil e, em consequência, aumentar a perda da distância de aquisição do alvo.

Diante da complexidade associada ao desenvolvimento de um modelo físico para o *seeker*, aliada à inexistência de maiores informações a respeito do projeto do míssil, a aplicação de métodos de projeto e análise de experimentos se mostra uma alternativa racional para a construção de um modelo matemático empírico para representar a distância de aquisição do *seeker*. Para tanto, conta-se com a disponibilidade de dados tabulados para a distância de aquisição, em função de níveis de altitude do alvo, ângulo de aspecto e seção reta radar. O modelo assim obtido pode ser prontamente utilizado em um *plugin* da plataforma AEROGRAF.

III. ANOVA PARA OBTENÇÃO DE MODELO EMPÍRICO

Análise de variância (ANOVA) é uma das técnicas mais utilizadas no campo da estatística indutiva (inferencial), sendo fundamental em projeto e análise de experimentos. Basicamente, essa técnica permite ao projetista ou experimentador verificar o quanto um ou mais fatores e suas correlações influenciam na resposta de um sistema ou processo.

Quando o experimento envolve dois ou mais fatores, a literatura aponta como abordagem adequada a técnica Projeto Fatorial [1], por permitir avaliar a influência de todos os fatores e suas interações, simultaneamente, na resposta do sistema. Num projeto com três fatores, por exemplo, o modelo estatístico linear seria dado por:

$$\begin{aligned}
 y_{ijkl} &= \mu_{ijkl} + \epsilon_{ijkl} \\
 &= \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} \\
 &\quad + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (1)
 \end{aligned}$$

onde y_{ijkl} são as $ijkl$ observações (medidas) da resposta do sistema, μ_{ijkl} são as médias das observações para cada combinação de fatores ijk e replicação l da medida, μ é uma constante que representa a média total das observações, τ_i é a variável que indica o desvio da média devido ao nível i do fator τ , β_j é a variável que indica o desvio da média devido ao nível j do fator β , γ_k é a variável que indica o desvio da média devido ao nível k do fator γ e ϵ_{ijkl} são os erros aleatórios (resíduos) associados às $ijkl$ observações.

Para determinar se há efeito dos fatores analisados e de suas interações sobre a resposta do sistema, são realizados testes de análise de variância (teste ANOVA). Para análise da in-

fluência do fator τ na resposta, por exemplo, tem-se o seguinte teste ANOVA:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para algum } i = 1, 2, \dots, a$$

Teste para os efeitos principais dos outros fatores podem ser construídos de modo análogo. Para análise da interação entre fatores, por exemplo, τ e β , tem-se:

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ para todo } i, j$$

$$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ para pelo menos um par } ij$$

Por outro lado, o teste ANOVA é válido somente quando as seguintes premissas forem satisfeitas [1]: (i) normalidade - resíduos normalmente distribuídos, com variáveis independentes, média zero e variância constante; (ii) constância da variância - resíduos independentes em relação à resposta predita; e, numa menor gradação de importância, (iii) independência - não existência de correlação entre os resíduos.

A ANOVA, além de propiciar a análise da influência dos fatores e de suas interações na resposta do sistema, permite ainda, quando os fatores são quantitativos, com o uso de métodos de regressão linear, determinar uma equação que relaciona a resposta do sistema com os fatores (modelo matemático empírico). Assim, por meio do modelo matemático e dentro dos limites do espaço amostral estudado, pode-se prever a resposta do sistema.

As etapas de desenvolvimento de modelo matemático, a partir de dados experimentais quantitativos, são consagradas na literatura [1], sendo sumarizadas a seguir:

1. Obter as respostas do sistema de interesse (observações) para todas as combinações de níveis de fatores.
2. Realizar a análise de variância dos dados observados, determinando os seguintes parâmetros: (i) soma dos quadrados da resposta do sistema devido às fontes de variação (fatores e suas interações); (ii) grau de liberdade das fontes de variações; (iii) grau de liberdade dos resíduos; (iv) soma dos quadrados médios devido às fontes de variações e aos resíduos; e (v) fatores F_0 de cada fonte de variação para o teste da hipótese H_0 .
3. Identificar, pelo teste ANOVA, as variáveis que influenciam a resposta y , determinando um modelo estatístico linear que melhor represente o comportamento do sistema.
4. Checar as hipóteses de normalidade dos resíduos do modelo obtido.
5. Caso o modelo estatístico de 1ª ordem não atenda às hipóteses de normalidade, aplica-se, empiricamente, uma transformação de variável ou aumenta-se a ordem do modelo através de métodos de regressão linear, tendo por base os gráficos de interação dos fatores. Repete-se as etapas 3. e 4. até que as hipóteses de normalidade sejam satisfeitas.
6. Determinar o fator R^2 para inferir sobre a significância dos fatores e de suas interações para o modelo.

Essas etapas são, a seguir, aplicadas no desenvolvimento do modelo para a predição da distância de aquisição do *seeker*. Os cálculos e testes estatísticos são realizados com o apoio do software livre R [5], que é uma linguagem e um ambiente desenvolvidos para a computação estatística e gráfica.

IV. MODELO EMPÍRICO PARA A PREDIÇÃO DA DISTÂNCIA DE AQUISIÇÃO DO SEEKER

Deseja-se representar a distância de aquisição do *seeker* de um míssil (variável de resposta) como função de três fatores,

a saber: (i) altitude do alvo; (ii) ângulo de aspecto; e (iii) seção reta radar (*RCS*, do inglês *radar cross section*).

Os dados utilizados na construção do modelo são obtidos do manual do fabricante, que dispõe de uma única medida da distância de aquisição do *seeker*, para cada combinação dos fatores listados acima. Ao todo, são coletadas 60 observações para a distância de aquisição do míssil.

Visando descaracterizar os dados fornecidos pelo fabricante, os valores da distância de aquisição do *seeker*, em quilômetros, são, neste artigo, divididos pela maior distância de aquisição (valor considerado base). A Tabela I apresenta os níveis dos fatores considerados e os valores relativos de distância de aquisição correspondentes.

TABELA I – NÍVEIS DOS FATORES E VALORES DE DISTÂNCIA DE AQUISIÇÃO

Altitude (Kft)	Seção reta radar (m ²)														
	2					5					20				
	Ângulo de aspecto (graus)														
	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
20	0.5176	0.5176	0.5000	0.5588	0.5588	0.6471	0.6471	0.5882	0.7059	0.7059	0.9118	0.9118	0.8235	1.0000	1.0000
10	0.4706	0.4706	0.4706	0.5176	0.5176	0.5882	0.5882	0.5588	0.6471	0.6471	0.8235	0.8235	0.6471	0.9118	0.9118
3	0.4000	0.4000	0.3235	0.4235	0.4235	0.5000	0.5000	0.3235	0.5294	0.5294	0.7059	0.7059	0.3235	0.7471	0.7471
0	0.3059	0.3059	0.1176	0.3294	0.3294	0.3824	0.3824	0.1176	0.4118	0.4118	0.5294	0.5294	0.1176	0.5765	0.5765

Como há uma única observação da distância de aquisição para cada combinação de fatores (projeto fatorial sem replicação), não seria possível determinar os erros aleatórios (resíduos) e, portanto, o modelo estatístico linear de projeto fatorial com três fatores da Equação (1) não poderia ser realizado para a análise de variância.

Para resolver o problema de projeto fatorial sem replicação, Montgomery [1], ao estudar a técnica Projeto Fatorial 2^k, propõe a redução do modelo estatístico linear, negligenciando os fatores e as interações de fatores que não sejam significativos na resposta do sistema. Assim, a partir do modelo reduzido, cria-se uma “replicação oculta” e passa-se a ter grau de liberdade para a análise de variância e, conseqüentemente, para a estimação do erro. Essa abordagem é aplicada a seguir, visando determinar o modelo estatístico linear reduzido que represente as observações da distância de aquisição, em função dos fatores considerados.

A fim de verificar a significância dos efeitos dos fatores e de suas interações na distância de aquisição do *seeker*, pode-se utilizar a soma dos quadrados médios dos fatores e de suas interações para identificar termos negligenciáveis. A Tabela II apresenta os resultados obtidos para graus de liberdade (*gdl*), soma dos quadrados (*SQ*) e soma dos quadrados médios (*SQM*) para os fatores considerados e suas interações.

Como pode ser verificado na Tabela II, o efeito da interação de terceira ordem entre os fatores Altitude, Ângulo e Seção Reta Radar (*RCS*) apresenta valor de quadrado médio na

ordem de 10 vezes inferior à menor soma de quadrados, podendo, então, ser negligenciado.

TABELA II – EFEITO DAS FONTES DE VARIÇÃO DO MODELO

Fontes de variação	<i>gdl</i>	<i>SQ</i>	<i>SQM</i>
Altitude (A)	3	1.0484	0.3495
Ângulo (B)	4	0.3385	0.0846
RCS (C)	2	0.892	0.446
Altitude:Ângulo (A:B)	12	0.0819	0.0068
Altitude:RCS (A:C)	6	0.0668	0.0111
Ângulo:RCS (B:C)	8	0.0761	0.0095
Altitude:Ângulo:RCS (A:B:C)	24	0.0118	0.0005

Ao eliminar o elemento de maior ordem, tem-se um modelo estatístico linear reduzido, dado por:

$$y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + \epsilon_{ijk} \quad (2)$$

com $\epsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$ independentes;

$i = 1, 2, 3, 4;$

$j = 1, 2, 3, 4, 5;$

$k = 1, 2, 3;$ e, conseqüentemente,

$$y_{ijk} \sim N(\mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + \epsilon_{ijk}, \sigma^2)$$

em que:

y_{ijk} : resposta (distância de aquisição do *seeker*) para o i -ésimo nível de altitude do alvo, com o j -ésimo nível para o ângulo de aspecto e k -ésimo nível para seção reta radar;

μ : constante (distância de aquisição média);

A_i : efeito da i -ésima altura do alvo;

B_j : efeito do j -ésimo ângulo de aspecto;

C_k : efeito da k -ésima seção reta radar;

$(AB)_{ij}$; $(AC)_{ik}$; $(BC)_{jk}$: efeitos da interação entre os fatores;

ϵ_{ijk} : erro aleatório (resíduo) para o i -ésimo nível de altitude do alvo, com o j -ésimo nível para o ângulo de aspecto e k -ésimo nível para seção reta radar.

O próximo passo consiste em realizar a análise de variância para o modelo reduzido de 1ª ordem (Equação (2)). Os testes de hipóteses são feitos para nível de significância $\alpha = 0.01$. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela III.

TABELA III – RESULTADO DA ANOVA PARA O MODELO 1ª ORDEM

Fontes de variação	<i>gdl</i>	<i>SQ</i>	<i>SQM</i>	<i>Fo</i>	<i>Pr(>F)</i>	
A	3	1.0484	0.3495	713.31	< 2e-16	***
B	4	0.3385	0.0846	172.72	< 2e-16	***
C	2	0.892	0.446	910.31	< 2e-16	***
A:B	12	0.0819	0.0068	13.93	5.12E-08	***
A:C	6	0.0668	0.0111	22.73	8.54E-09	***
B:C	8	0.0761	0.0095	19.41	1.01E-08	***
Resíduos	24	0.0118	0.0005			
Total	59	2.5155				

Significância: 0 **** 0.001 *** 0.01 ** 0.05 * . 0.1 ' ' 1

Dos resultados obtidos e indicados na Tabela III, verifica-se que os efeitos de todas as fontes de variação são significativos, já que apresentam valores-*p* ($Pr(>F)$) inferiores ao nível de significância 0.01.

Antes de realizar inferência com base no modelo obtido, é preciso verificar se as hipóteses do modelo são válidas: (i) normalidade; e (ii) homoscedasticidade (variância constante) dos erros. A Fig. 1 mostra o gráfico de quantis para os resíduos.

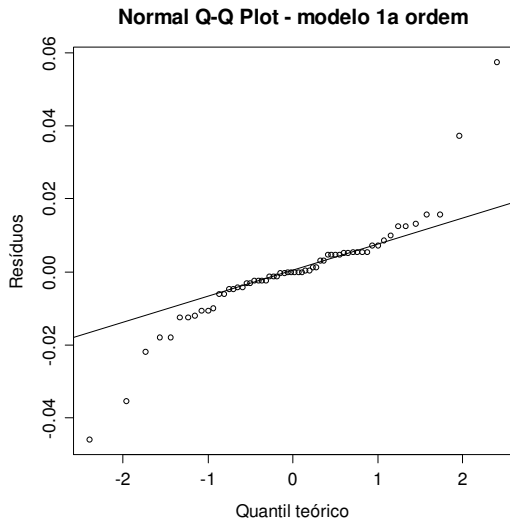


Fig. 1. Normalidade dos resíduos - modelo 1ª ordem

Como pode ser observado, o modelo de 1ª ordem da Equação (2) não representa bem os dados em análise, pois apresenta violações às hipóteses a respeito dos termos aleatórios, já que os resíduos apresentam desvios significativos em torno da reta e, assim, não possuem uma distribuição normal. Conclusão semelhante pode ser obtida através do teste Shapiro-Wilk [4] [5], para o qual se obteve o valor-*p* = 6.384E-06.

Ainda, os gráficos de interações entre fatores, mostrados na Fig. 2., sugerem modelos matemáticos de ordem mais elevada.

Levando-se em conta o número de graus de liberdade disponíveis, podem ser avaliados modelos de 2ª até 4ª ordem.

Ao testar os modelo de 2ª e 3ª ordem, verifica-se também violação à hipótese de normalidade dos erros aleatórios, como pode ser constatado no gráfico da Fig.3. e da Fig. 4., respectivamente.

Os resultados da ANOVA para o modelo de 4ª ordem, mostrados na Tabela IV, indicam significância dos efeitos principais para todos os fatores, bem como efeitos quadráticos para altitude e efeitos até 4ª ordem para o fator ângulo de aspecto, incluindo suas interações com os fatores altitude e seção reta radar.

Assim, um modelo estatístico de 4ª ordem para predição da distância de aquisição do seeker, considerando o princípio da hierarquia, pode ser dado por:

$$\begin{aligned}
 y_{ijk} = & \mu + A_i + A_i^2 + B_j + B_j^2 + B_j^3 + B_j^4 + C_k + (AC)_{ik} \\
 & + (BC)_{jk} + (B^2C)_{jk} + (B^3C)_{jk} \\
 & + (B^4C)_{jk} + \epsilon_{ijk}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

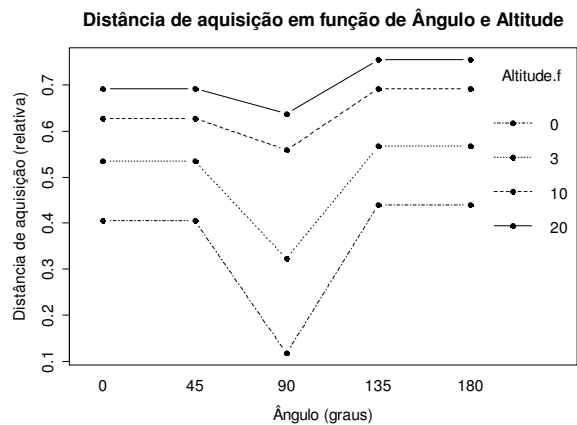
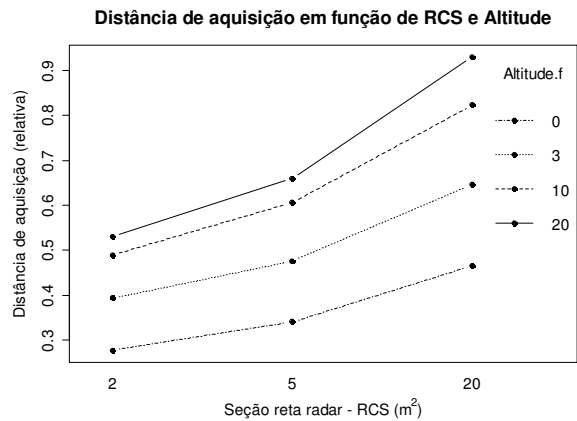
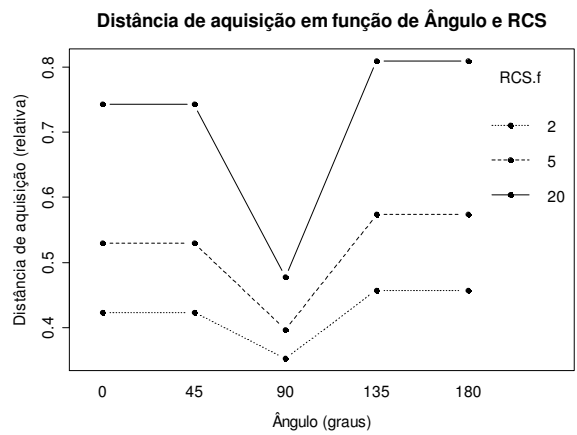


Fig. 2. Gráficos das interações entre fatores

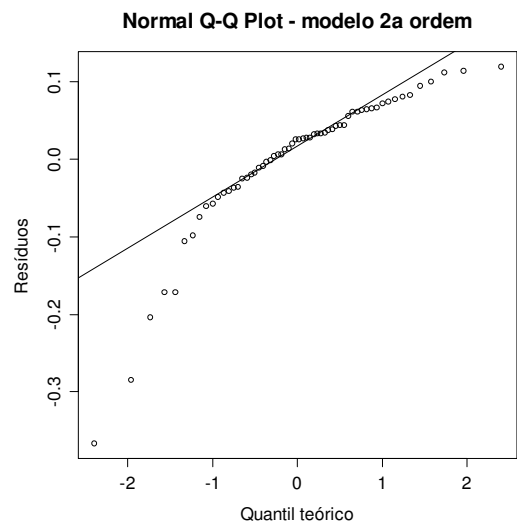


Fig. 3. Normalidade dos resíduos - modelo 2ª ordem

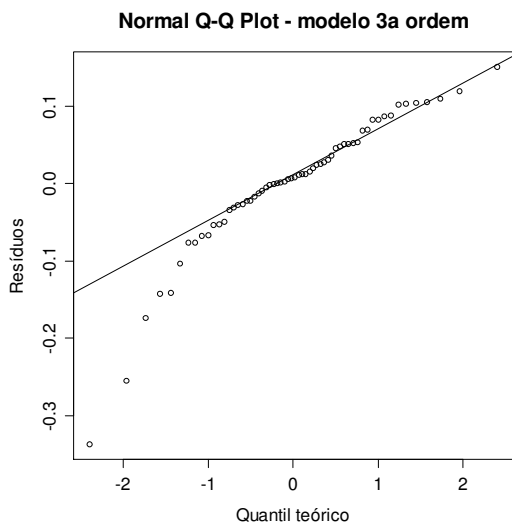


Fig. 4. Normalidade dos resíduos - modelo 3ª ordem

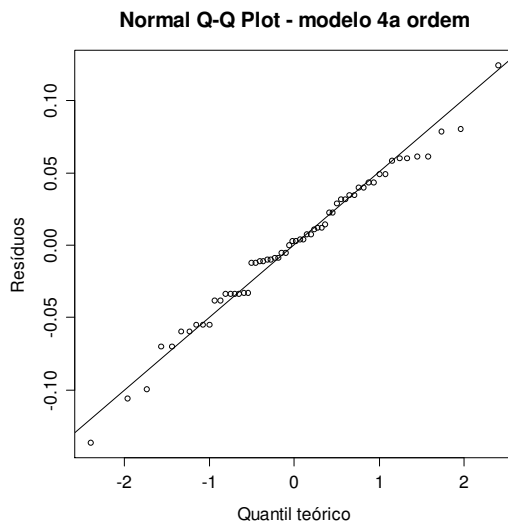


Fig. 5. Normalidade dos resíduos - modelo 4ª ordem

TABELA IV – RESULTADO DA ANOVA PARA O MODELO 4ª ORDEM

Fontes de variação	gdl	SQ	SQM	Fo	Pr(>F)	
A	1	0.9059	0.9059	300.36	< 2e-16	***
A ²	1	0.129	0.129	42.772	4.08E-08	***
B	1	0.0249	0.0249	8.265	0.00606	**
B ²	1	0.1110	0.1110	36.803	2.13E-07	***
B ³	1	0.0028	0.0028	0.918	0.34283	
B ⁴	1	0.1998	0.1998	66.245	1.58E-10	***
C	1	0.8643	0.8643	286.58	< 2e-16	***
A:C	1	0.0619	0.0619	20.514	4.05E-05	***
B:C	1	0.0019	0.0019	0.637	0.42875	
B ² :C	1	0.0257	0.0257	8.526	0.00536	**
B ³ :C	1	0.0002	0.0002	0.071	0.79135	
B ⁴ :C	1	0.0463	0.0463	15.347	0.00029	***
Resíduos	47	0.1418	0.0030			
Total	59	2.5155				

Significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1

O gráfico de normalidade dos resíduos do modelo da Equação (3), apresentado na Fig. 5., não apresenta desvios significativos, de forma que a hipótese de normalidade não deve ser rejeitada. A mesma conclusão é obtida pelo teste Shapiro-Wilk, para o qual se obtém valor-*p* = 0.7502.

O gráfico dos resíduos versus distância de aquisição predita, referente ao modelo da Equação (3) é mostrado na Fig. 6. Verifica-se que os resíduos distribuem-se em torno de zero, não apresentando nenhum padrão sistemático, indicando assim a homoscedasticidade do modelo. Conclusão semelhante pode ser obtida através do teste Bartlett [1] [4] [5], para o qual se obteve o valor-*p* = 0.3231 referente à variância da distância de aquisição devido ao fator altitude, valor-*p* = 0.8594 devido ao ângulo de aspecto e valor-*p* = 0.01307 devido à seção reta radar.

Como as hipóteses de normalidade do modelo da Equação (3) estão satisfeitas, pode-se agora, por meio de técnicas de regressão linear [1], determinar o modelo matemático empírico para a predição da distância de aquisição do *seeker* do míssil.

Resíduos Vs Distância Predita

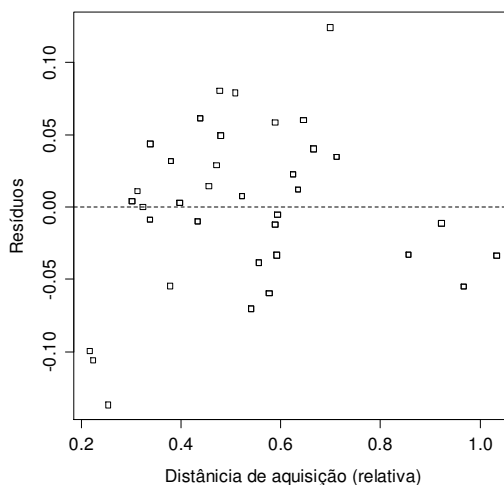


Fig. 6. Resíduos versus distância predita – modelo 4ª ordem

Os coeficientes do modelo regressão são determinados no software *R*, de forma que a equação da distância de aquisição (*ŷ*), em função dos fatores altitude (*A*), ângulo de aspecto (*B*) e seção reta radar (*C*), é dada por:

$$\begin{aligned}
 \hat{y} = & 2.78E-01 + 3.40E-2 A - 1.12E-3 A^2 + 5.09E-3 B \\
 & - 1.82E-4 B^2 + 1.75E-6 B^3 \\
 & - 4.94E-9 B^4 + 1.22E-2 C \\
 & + 5.30E-4 AC + 7.18E-4 BC \\
 & - 2.54E-5 B^2C + 2.40E-7 B^3C \\
 & - 6.71E-10 B^4C
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

O modelo da Equação (4) apresenta $R^2 = 94,36\%$, ou seja, explica 94,36% da variabilidade observada na resposta. O R^2 ajustado é igual a 92,93%, indicando a aderência do modelo.

Algumas curvas de superfície do modelo obtido são apresentadas na Fig. 7. Elas seguem o comportamento inicialmente previsto nas curvas de interações de fatores da Fig. 1. A distância de aquisição do modelo de predição do *seeker* apresenta o seguinte comportamento:

- a maior distância de aquisição ocorre para seção reta radar de $20 m^2$, altitude de $20 Kft$ e ângulo entre $0 e 45^\circ$ e $135 e 180^\circ$;

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo partiu de uma necessidade do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), órgão diretamente subordinado ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), de estudar como transformar dados tabelados de distância de aquisição do *seeker* de um míssil em uma função contínua para usar em um *plugin* da plataforma AEROGRAF. Técnicas de projeto e análise de experimentos foram utilizadas para determinação de um modelo matemático empírico. A metodologia mostrou-se eficiente para a solução do problema, tendo sido possível obter um modelo capaz de representar satisfatoriamente o comportamento do *seeker* do míssil em estudo.

Pelo estudo, pode-se concluir que:

- mesmo o experimento não possuindo replicações, é possível, através da eliminação de fatores que não sejam significativos na resposta do sistema, realizar a análise de variância;
- a análise das curvas de interações dos fatores e o entendimento do modelo teórico propiciou encontrar o modelo empírico que atende aos anseios do cliente;
- as técnicas de projetos de experimentos contribuem para determinar um modelo empírico para um estimador da distância de aquisição do *seeker* do míssil de interesse, em que a complexidade do modelo e a falta de informações do projeto são restrições importantes para modelagem do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] Montgomery, D. C. - Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons Inc., 7th edition, New York, NY, USA, 2009.
- [2] Siouris, G. M. - Missile Guidance & Control Systems, Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA, 2004.
- [3] Aquino, M. R. C. et. al - Planejador de missões aéreas – PMA II, Atividade de P&D - IAEv, v.5, p.119, 2011.
- [4] Lalanne, C. R Companion to Montgomery's Design and Analysis of Experiments (2005), Draft Version versão, 2012. Disponível em: www.aliquote.org/articles/tech/dae/dae.pdf. Acesso em 19/06/2013.
- [5] The Comprehensive R Archive Network. An Introduction to R. Disponível em: <http://cran.r-project.org/doc/manuals/R-intro.html>. Acesso em 19/06/2013.
- [6] Kleijnen, Jack P.C. - Statistics and deterministic simulation models: why not? Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference, 1990.
- [7] Sacks, J et al. Design and Analysis of Computer Experiments. Statistical Science, Vol. 4, No 4 (Nov., 1989), pp.409-423. Institute of Mathematical Statistics, 1989.
- [8] The R Project for Statistical Computing. R Documentation. Disponível em: <http://www.r-project.org/other-docs.html>. Acesso em 19/06/2013.
- [9] Karp, Natasha A. R commander an Introduction - May 2010. Disponível em: <http://cran.r-project.org/doc/contrib/Karp-Rcommander-intro.pdf>. Acesso em 13/07/2013.
- [10] Royston, J. P. Algorithm AS 181: The W Test for Normality. Applied Statistics, Vol. 31, No. 2. (Fev., 1982), pp. 176-180. Royal Statistical Society, 1981.

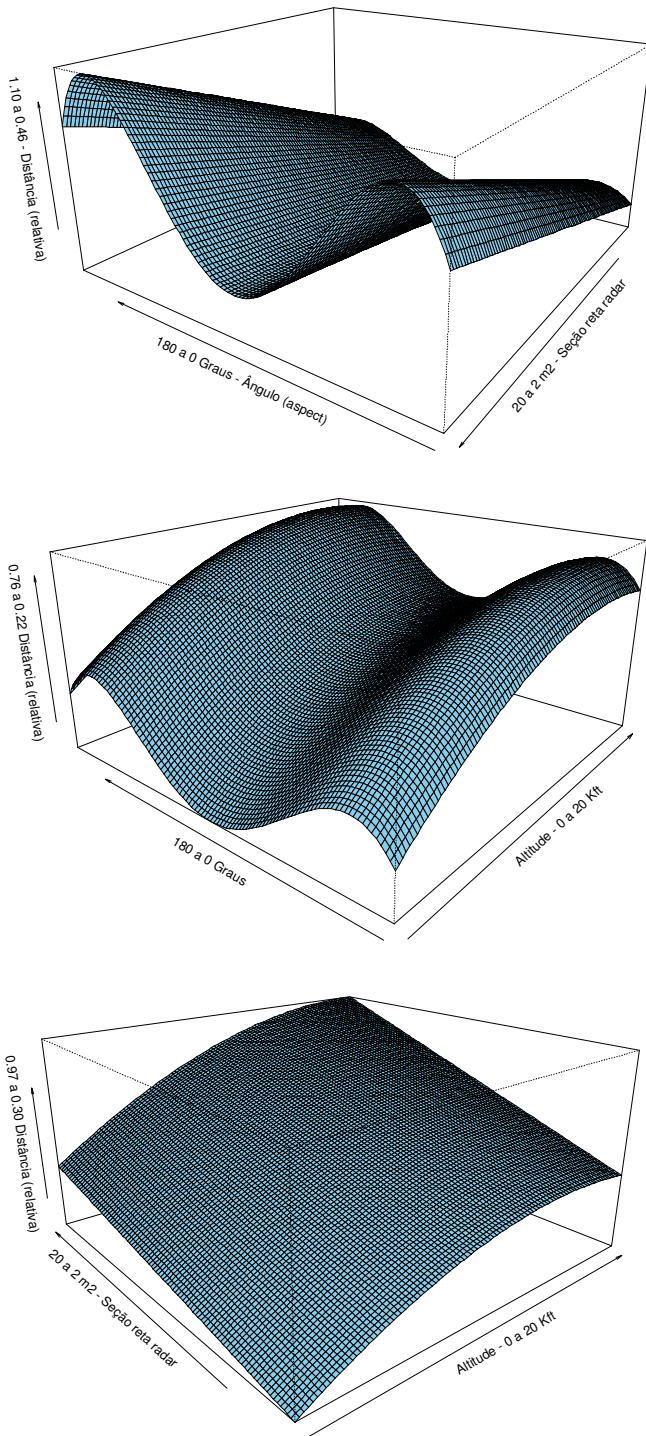


Fig. 7. Curvas de superfície do modelo de predição da distância de aquisição

- a menor distância de aquisição ocorre para ângulos de aspecto em torno de 90°, altitude 0 Kft e seção reta radar de 2 m²;
- apresenta três concavidades tanto para variação do ângulo de aspecto versus seção reta radar quanto para variação do ângulo de aspecto versus altitude, com pontos máximos entre 0 e 45° e 135 e 180°, e um ponto de mínima distância de aquisição para ângulos em torno de 90°;
- a distância de aquisição apresenta um aumento parabólico com o aumento da altitude do alvo e da seção reta radar.