

PREVISÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO DE AERONAVES MILITARES

Fábio de Souza Nascimento, Anderson Ribeiro Correia
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Pça. Mal. Eduardo Gomes, nº 50 – São José dos campos – SP

Resumo – O objetivo do presente artigo é definir o processo utilizado no desenvolvimento de um modelo de estimação de custos e explicar o uso deste modelo na realização de previsões mais acuradas de custos de manutenção de aeronaves militares. Este trabalho procura reunir conceitos e características da logística de operação e de manutenção de aeronaves da Força Aérea Brasileira. Finalmente, é apresentada uma aplicação da metodologia Box-Jenkins para modelos ARIMA de séries temporais, voltada para a Aeronáutica.

Palavras-chave – Logística, séries temporais, ARIMA, Estatística.

I. INTRODUÇÃO

Estimação paramétrica de custos consiste no uso de variáveis independentes para realizar previsões de custos de um projeto. Estas variáveis independentes podem ser especificações, funções, ou outros elementos descritivos de alto nível de detalhamento que definam o escopo do projeto em suas etapas iniciais, quando há falta de informação mais detalhada. No universo particular dos projetos de aeronaves, os elementos geralmente utilizados são especificações físicas e de desempenho do projeto, como velocidade, peso, número de motores, comprimento e envergadura, por exemplo.

Os benefícios apontados pela literatura, no uso de modelos de estimação paramétrica geralmente estão associados a sua capacidade de fornecer previsões de custos futuros, baseados em pouca informação atual disponível. Parte do princípio que, embora o projeto em questão esteja em uma fase inicial, dados históricos de projetos semelhantes podem ser utilizados para construir relações entre características pré-estabelecidas do projeto e seus custos envolvidos. Estas relações, chamadas de *Cost Estimating Relationships* (Relações de Estimativa de Custos) - CER, constituem expressões matemáticas usadas para estimar o custo de um item ou atividade em função de variáveis independentes consideradas relevantes, conhecidas como elementos de custos. Um modelo de estimação paramétrica de custos pode incorporar uma ou mais CER na sua construção (ISPA, 2003).

II. APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE DEFESA

Um cenário bastante comum em qualquer força armada é a contratação de empresas do ramo de defesa para o desenvolvimento de sistemas de armas com alto grau de tecnologia envolvida. A aquisição destes sistemas envolve, em geral, pesquisa, desenvolvimento, construção de protótipos e ensaios. Estas fases agregam incerteza ao contrato, torna difícil a previsão dos gastos totais e a sua adequação aos orçamentos militares. A análise do ciclo de

vida destes sistemas permite compreender melhor as características de cada fase e os custos relacionados.

2.1 Custo do Ciclo de Vida

O custo do ciclo de vida de um sistema de armas é o valor total, em unidades monetárias, que o sistema irá consumir, desde a sua concepção até o seu descarte final (Blanchard, 1998). O ciclo de vida é geralmente dividido em seis fases, definidas a seguir:

a) Conceitual: constituem a fase de pesquisa e os estágios preliminares de desenvolvimento, necessários à tomada de decisão de prosseguir com o projeto. Inclui estudos de viabilidade, simulação, projetos iniciais de engenharia e maquetes em tamanho real (*mockups*).

b) Demonstração e validação: o objetivo desta fase é assegurar que tecnologias críticas e decisões de projeto estejam definidas e disponíveis. Programação, custos e desempenho conceituais devem estar de acordo com as restrições de projeto.

c) Engenharia e desenvolvimento: esta fase tem o objetivo de traduzir as definições estabelecidas na fase anterior em um sistema estável. Inclui projetos de engenharia, desenvolvimento, fabricação, montagem e teste de protótipos de hardware e software, avaliação inicial do sistema e elaboração de documentação técnica.

d) Produção e entrega: custos associados com a produção do lote encomendado de aeronaves, suporte inicial, treinamento, gerência de dados técnicos, computadores e software, suprimento inicial de material de consumo e componentes reparáveis e demais itens necessários à entrada em operação do novo sistema.

e) Operação e suporte: encontram-se nesta fase os custos de pessoal, material e instalações necessárias ao suporte à operação rotineira do sistema.

f) Descarte: custos associados à desmilitarização, ou outro tipo de alienação de um sistema ao final de sua vida útil. Esta fase é raramente incluída nos custos de ciclo de vida, pois o montante é pequeno, se comparado aos demais custos. No entanto, importantes decisões devem ser consideradas quando do descarte de equipamentos militares, quer seja devido à segurança de informações contidas no sistema, ou pelo tratamento de materiais tóxicos, ou explosivos, e sua destinação.

A Figura 1 demonstra a participação de cada fase no ciclo de vida de um sistema.

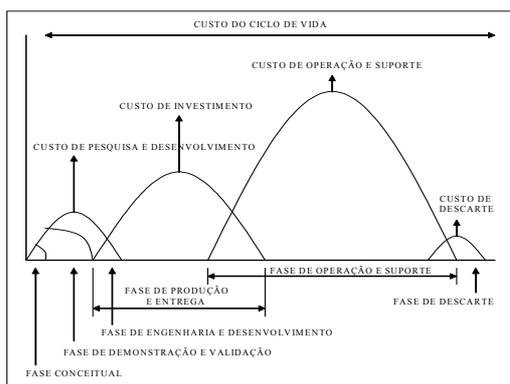


Fig. 1: Custo do ciclo de vida por fase (adaptado de: *Operation and Support Cost-Estimating Guide*, 1992).

III. ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA DE CUSTOS NA FAB

O principal problema que a Força Aérea Brasileira tem enfrentado para elaborar estudos mais aprofundados no campo da estimação de custos é a falta de uma base de dados unificada e informatizada a qual permitisse a extração de informações atualizadas e confiáveis a respeito das atividades de operação e de manutenção de suas aeronaves. Tal deficiência está sendo suplantada pelo Sistema Integrado de Logística de Material e de Serviços (SILOMS). O SILOMS integra os elos do sistema de material aeronáutico da FAB, permitindo aos gerentes acompanharem, em tempo real, as atividades desenvolvidas nas unidades operadoras e parques de material aeronáutico, gerenciando as mais de 700 aeronaves que compõem o acervo da força.

A integração das funcionalidades do sistema de material aeronáutico da FAB em uma base de dados unificada permite a padronização das informações armazenadas no SILOMS, as quais podem ser utilizadas na elaboração de modelos matemáticos de estimação de custos.

IV. METODOLOGIA

4.1 Coleta e tratamento de dados

Qualquer técnica de estimação paramétrica de custos requer o uso de dados confiáveis na sua elaboração, proporcionando a geração de previsões robustas. Dados referentes a custos e características técnicas devem ser coletados e tratados de modo adequado antes de alimentarem os modelos propostos. Um exemplo comum na indústria é a obtenção destes dados a partir de uma WBS (*Work Breakdown Structure*). A WBS fornece definições padronizadas a respeito de um projeto, bem como informações técnicas e de custos (Blanchard, 1998).

Uma vez coletados, os dados devem ser ajustados para remover influências de fatores externos ao processo de desenvolvimento tecnológico ou de produção envolvido, como o efeito da inflação ou mudança no valor da moeda, por exemplo.

A qualidade dos dados que irão alimentar o modelo é vital para a obtenção de previsões consistentes, além disso, o analista deve levar em consideração as peculiaridades do

projeto em estudo, procurando agregar informações de especialistas envolvidos nas etapas do projeto atual e, se possível, de projetos anteriores semelhantes (Hess e Romanoff, 1987). Este conhecimento especializado auxilia a responder questões importantes como:

- Quais elementos ou características técnicas afetam os custos considerados?
- A relação entre o custo e o elemento é positiva ou negativa?
- A relação entre custo e elemento é linear ou não?

Obter as respostas a esses tipos de questões irá proporcionar um guia na elaboração das CER e de modelos mais complexos, pois permitem ao analista, ao derivar as equações de custos, verificar se a formulação matemática guarda coerência com a realidade.

4.2 Acurácia do modelo

Além das verificações descritas anteriormente para determinar o nível de confiabilidade do modelo, a estimação paramétrica nos permite utilizar técnicas estatísticas para verificar o grau de ajuste do modelo ao fenômeno observado. Modelos paramétricos simples podem ser obtidos a partir de métodos de estimação de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), para os quais existem testes consagrados de verificação da “robustez” dos modelos.

Outro aspecto importante na manutenção destes modelos reside em considerar a sua dinâmica, pois, uma vez elaborado e testado o modelo, o mesmo deverá sempre estar sendo alimentado com dados atualizados e revalidados. Isto permitirá remover influências de tecnologias e processos antigos, os quais não serão aplicados no projeto atual (Stewart, 1991).

4.3 Modelos de séries temporais

Segundo Morettin e Toloi (1981), série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo. Se o conjunto é discreto, a série é dita discreta, sendo que um processo estocástico de parâmetro contínuo sempre pode ser discretizado.

Dada uma série temporal Z_t , a mesma pode ser definida também como a realização do processo estocástico $Z(\omega, t)$, em que:

$$t \in T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}, \quad \text{dado } t_i = t_j = h \\ \forall i \neq j$$

Uma série temporal com n observações pode ser representada por $\{Z_t, t = 1, 2, 3, \dots, n\}$, em que as observações são feitas a intervalos de tempo fixos h .

4.3.1 Metodologia Box-Jenkins

Neste tópico, será abordada a metodologia proposta por Box e Jenkins para a modelagem de processos ARIMA, por se tratar da metodologia a ser adotada no escopo deste trabalho.

Combinando-se modelos AR e MA podemos obter estimativas adequadas com um número menor de

parâmetros. Processos auto-regressivos de médias móveis (ARMA) formam uma classe de modelos muito úteis e parcimoniosos para descrever o comportamento de séries temporais. Dado o seguinte modelo ARMA (p, q):

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + \varepsilon_t + \beta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \beta_q \varepsilon_{t-q}$$

Em que ε_t é um processo puramente aleatório com média zero e variância σ_ε^2 . Usando o operador diferença B , o modelo pode ser reescrito como:

$$(1 - \alpha_1 B - \alpha_2 B^2 - \dots - \alpha_p B^p) X_t = (1 + \beta_1 B + \beta_2 B^2 + \dots + \beta_q B^q) \varepsilon_t$$

Ou ainda:

$$\phi(B) X_t = \theta(B) \varepsilon_t$$

Uma das análises preliminares de processos ARMA constitui na verificação da função de autocorrelação. De um modo geral, para processos ARMA (p, q) estacionários, a função de autocorrelação (fac) apresenta um decaimento exponencial ou oscilatório após a defasagem q , enquanto que a função de autocorrelação parcial (facp) possui o mesmo comportamento após a defasagem p (Box e Jenkins, 1976). Em princípio, tal resultado pode ser utilizado no auxílio da determinação da ordem (p, q) do processo mas, na prática pode ser bastante difícil distinguir padrões de decaimento exponencial ou oscilatório através destas funções.

4.3.2 Modelos ARMA Integrados

Os modelos discutidos até agora são apropriados para séries temporais estacionárias. Assim, para ajustar estes modelos a uma série temporal qualquer é necessário remover as fontes de variação não estacionárias. Por exemplo, se a série observada for do tipo não estacionária na média, pode-se tentar remover a tendência tomando-se uma ou mais diferenças, abordagem esta muito empregada em Econometria.

Um modelo ARMA no qual X_t é substituído pela sua d -ésima diferença $\nabla^d X_t$ é capaz de descrever alguns tipos de séries não estacionárias. Denotando a série diferenciada por:

$$Z_t = \nabla^d X_t = (1 - B)^d X_t$$

Em que: 1ª dif. $\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}$

$$2^\text{ª} \text{ dif. } \nabla^2 Z_t = (Z_t - Z_{t-1}) - (Z_{t-1} - Z_{t-2})$$

O processo auto-regressivo integrado de médias móveis chamado ARIMA (p, d, q) é dado por:

$$Z_t = \alpha_1 Z_{t-1} + \dots + \alpha_p Z_{t-p} + \varepsilon_t + \beta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \beta_q \varepsilon_{t-q}$$

4.3.3 Construção de modelos ARIMA segundo a metodologia Box - Jenkins

A metodologia desenvolvida por Box e Jenkins para análise de séries temporais é bastante popular em virtude da sua generalidade, permitindo adequação a vários tipos de séries temporais, estacionárias ou não, com ou sem características sazonais e, ainda, com ferramentas computacionais disponíveis bastante confiáveis (Maddala, 2003).

O ciclo descrito será repetido até a obtenção de um modelo considerado adequado e, diferentemente dos modelos “caixa-preta”, requer a interferência de um especialista que possua domínio sobre a metodologia empregada e sobre o fenômeno em estudo. A seguir, discutiremos mais detalhadamente cada etapa:

- 1) O método mais usual para identificar se uma série temporal é ou não estacionária consiste em analisar o gráfico do correlograma da série. É sabido que o correlograma de uma série temporal estacionária diminui a medida que aumentam o número de defasagens. Deste modo, é comum observar o correlograma de uma série e o das suas diferenciações sucessivas, até que o gráfico apresente o comportamento de uma série estacionária.
- 2) Após o processo de diferenciação e a consequente obtenção de uma série estacionária, é procedido o exame das fac e facp com o objetivo de decidir sobre as ordens apropriadas dos componentes AR e MA. O gráfico de um processo MA apresenta valor zero após um determinado ponto. Já um processo AR declina exponencialmente.
- 3) A etapa seguinte consiste na estimação dos parâmetros AR e MA e a variância de ε_t .
- 4) Os testes de diagnóstico permitirão a verificação e a validação do modelo quanto a sua capacidade de previsão.

V. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NA FAB

Um problema enfrentado pelo Comando da Aeronáutica, comum a qualquer força aérea do mundo, está no planejamento das atividades de manutenção das suas aeronaves. A FAB possui em seu acervo cerca de 700 aeronaves distribuídas por mais de 40 projetos (tipos de aeronaves) diferentes. Há projetos que possuem apenas uma aeronave e existem Unidades Aéreas operando mais de cinco projetos diferentes.

Assim sendo, cada projeto apresenta um comportamento particular na evolução dos seus custos de operação e de suporte, motivo pelo qual não parece ser adequado tentar modelar estes comportamentos heterogêneos em modelos de análise de corte.

5.1 Obtenção, tratamento e análise dos dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir da base de dados do SILOMS, compondo uma série temporal de 36 observações mensais, no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2005. Os dados de custos estão contabilizados em dólares americanos e foram deflacionados através do PPI – *Producer Price Index* (Índice de Preços ao

Produtor), emitido pelo *U. S. Department of Labor* (Bureau of Labor Statistics, 2005).

A série temporal utilizada neste trabalho corresponde aos gastos com material de manutenção da aeronave T-27 “Tucano”, aeronave de treinamento militar empregada pela FAB nas atividades de instrução avançada de seus pilotos, a qual será utilizada como exemplo de aplicação da metodologia

A Figura 2 apresenta a série temporal composta pelos custos de manutenção de material reparável da aeronave em estudo e as Figuras 3 e 4, as respectivas funções de autocorrelação e de autocorrelação parcial:

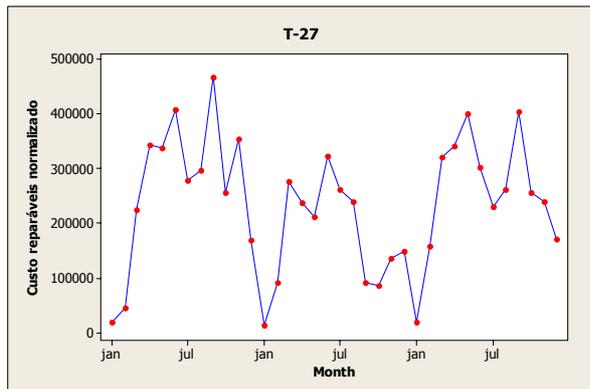


Fig. 2: Série temporal – custos.

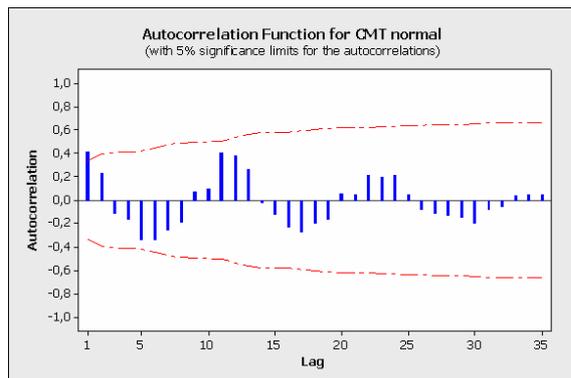


Fig. 3: Função de autocorrelação.

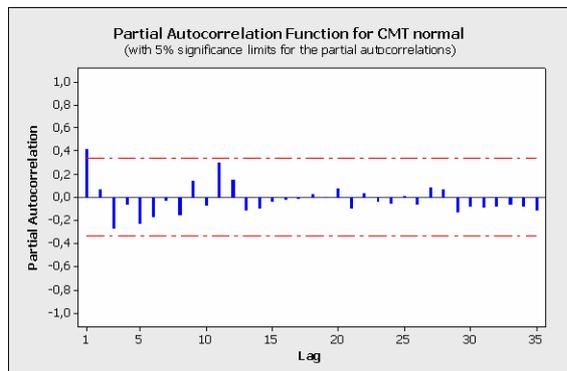


Fig. 4: Função de autocorrelação parcial.

A análise preliminar da função de autocorrelação aponta para o comportamento auto-regressivo da série e o gráfico da série original indica uma forte presença de um componente sazonal (Figuras 2 e 3).

Em função desta análise preliminar, optou-se pela construção de modelos do tipo Sazonal Auto-regressivo

Integrado Média Móvel SARIMA $(p,d,q)(P,D,Q)^S$, para eliminar os efeitos de tendência e sazonalidade que porventura ocorram na série, tornando a mesma estacionária. Após a elaboração de modelos tentativos, chegou-se ao modelo de melhor adequação aos dados SARIMA $(1,1,0)(1,0,0)^{12}$. A manipulação dos dados foi efetuada nos softwares Excel e SAS.

Os parâmetros estimados, bem como as estatísticas e os testes de diagnóstico, a análise gráfica do modelo e o conjunto de previsões para seis períodos adiante estão apresentados nas tabelas e na figura a seguir:

TABELA I: Estatísticas e testes de diagnóstico.

DF							33
Sum of Squared Errors							1,36878e12
Variance Estimate							4,14783e10
Standard Deviation							203662,162
Akaike's 'A' Information Criterion							857,635831
Schwarz's Bayesian Criterion							860,746527
Term	Factor	Lag	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	
AR1,1	1	1	-0,5867944	0,1466889	-4,00	0,0003	
AR2,12	2	12	0,58366954	0,1690402	3,45	0,0015	

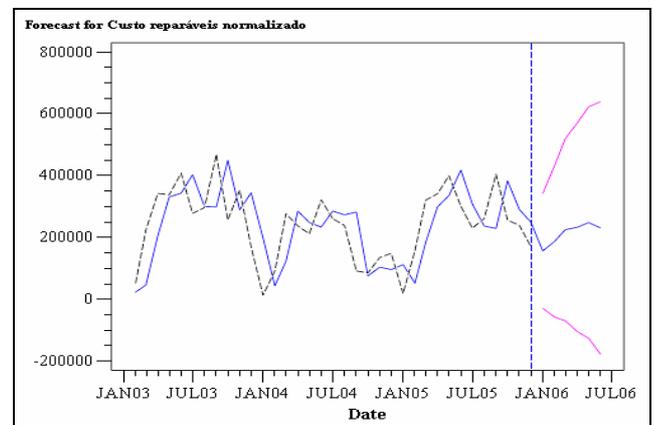


Fig. 5: Ajuste do modelo e previsões.

TABELA II: Previsões para seis períodos adiante e respectivos intervalos de confiança.

Forecasts for variable Custo reparáveis normalizado				
Obs	Forecast	Std Error	90% Confidence Limits	
37	156341.1	112645	-28944.2	341626.4
38	187311.4	148952	-57693.0	432315.9
39	225146.0	179131	-69498.1	519790.2
40	232682.2	204778	-104148.0	569512.5
41	248221.5	227569	-126096.7	622539.7
42	230668.1	248275	-177707.8	639044.0

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou, em linhas gerais, os conceitos e as técnicas de estimação paramétrica, aplicada aos custos do ciclo de vida de sistemas complexos, particularmente, de aeronaves militares.

Os benefícios da metodologia Box-Jenkins residem no fato de que a frota de uma força aérea é composta de aeronaves muito distintas em características físicas e operacionais, compondo séries temporais de comportamentos variados, necessitando de uma técnica

parcimoniosa que contemple todas as possíveis variações na sua estrutura. O método de Box-Jenkins permite o tratamento dos componentes sazonais e de tendência que porventura possam ocorrer nas séries, além da ocorrência de componentes AR e MA.

Dentro das possíveis aplicações para a FAB, com o crescimento da base de dados do SILOMS, cada vez mais será possível dispor deste recurso para apoiar as decisões relacionadas com o planejamento logístico, quer seja no nível operacional, no gerenciamento rotineiro das tarefas de manutenção; ou no plano estratégico, desenvolvendo ou adquirindo novos sistemas militares.

REFERÊNCIAS

- [1] **Blanchard, B. S.** (1998), *Logistics Engineering and Management*. New Jersey: Prentice Hall.
- [2] **Box, G. E. P.; Jenkins, G. M.** (1976), *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco: Holden-Day.
- [3] **Brasil** (2003), *DCA 400-6: Ciclo de Vida de Materiais da Aeronáutica*, Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica, Brasília.
- [4] **Bureau of Labor Statistics.** *Producer Price Index*. Washington: U. S. Department of Labor, 2005. Disponível em <http://data.bls.gov/cgi-bin/surveymost?pc>. Acesso em: 30 jan. 2006.
- [5] **Estados Unidos** (1992), *Operation and Support Cost-Estimating Guide*, Cost Analysis Improvement Group, Office of the Secretary of Defense. Disponível em: <http://www.dtic.mil/pae/>. Acesso em 28 de outubro de 2005.
- [6] **Gujarati, D.N.** (2000), *Econometria Básica*, 3.ed., São Paulo: Pearson Makron Books.
- [7] **Hess, R. W.; Romanoff, H. P.** (1987), *Aircraft Airframe Cost Estimating Relationships: Study Approach and Conclusions*, RAND Corporation, Santa Monica, CA.
- [8] **ISPA** (2003), *Parametric Estimating Handbook*, 3.ed. International Society of Parametric Analysts. Disponível em: http://www.ispa-cost.org/PEIWeb/Third_edition/handbook.htm. Acesso em 04 out. 2005.
- [9] **Kwak, Y. H.; Watson, R. J.** (2005), *Conceptual Estimating Tool for Technology-Driven Projects: Exploring Parametric Estimating Technique*. Disponível em <http://www.elsevier.com/locate/technovation>. Acesso em 08 mar 2006.
- [10] **Maddala, G. S.** (2003), *Introdução à Econometria*. 3. ed. São Paulo: LTC.
- [11] **Morettin, P. A.; Toloi, C. M. C.** (1987), *Previsão de Séries Temporais*. 2. ed. São Paulo: Atual.
- [12] **Pindyck, R. S., Rubinfeld, D. L.** (2004), *Econometria, Modelos e Previsões*, 4. ed., São Paulo: Campus.
- [13] **Stewart, R. D.** (1991), *Cost Estimating*. New Dimensions in Engineering.