

Amadurecimento da Confiabilidade de Sistemas em Desenvolvimento: Análise de Impacto nos Custos de Aquisição pelas Forças Armadas Brasileiras

Henrique Costa Marques¹, Fernando Teixeira Mendes Abrahão¹, José Nogueira Filho¹, Daniel Coelho Mota²

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) - AeroLogLab-ITA - São José dos Campos/SP - Brasil

²Instituto de Logística da Aeronáutica (ILA) - AeroLogLab-ILA - Guarulhos/SP - Brasil

Resumo— A incerteza na confiabilidade de sistemas pode afetar os custos de aquisição de um sistema em desenvolvimento para os primeiros clientes. Se a confiabilidade necessária não for alcançada até a fase de implantação, o sistema deverá ser mantido com uma abordagem conservadora, podendo aumentar custos e reduzindo a eficiência logística global. O presente artigo aponta o impacto de uma abordagem de amadurecimento de confiabilidade no desenvolvimento de novos sistemas no custo de aquisição para os primeiros clientes e sugere quais tipos de itens/sub-itens devem ter mais atenção em termos de impacto de custos com base em um estudo de caso. Com essa informação, os tomadores de decisão poderão se concentrar na gestão de itens/sub-itens em termos de impacto de logística de custos e sistemas.

Palavras-Chave— Confiabilidade, e-Maintenance.

I. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de novos sistemas, podemos ter itens/sub-itens cuja confiabilidade não está em conformidade com o solicitado em seus requisitos de desenvolvimento e poderemos ter a necessidade de redesenhar o sistema para alcançar os níveis esperados até sua fase de produção. Muitas vezes, o produto possui um plano de manutenção que está sendo desenvolvido em paralelo ao processo de amadurecimento da confiabilidade, criando uma Lista de Aprovisionamento Inicial (IPL do Inglês *Initial Provisioning List*) que não é a melhor em termos de custos para o primeiro cliente do sistema, caso a sua produção seja implementada antes do amadurecimento completo da confiabilidade do produto/sistema.

Outros impactos surgem nesta situação, a partir de um plano de manutenção conservador que poderá sugerir a intervenção de manutenção muito antes do término do tempo útil de um item, encarecendo o suporte logístico e perdendo eficiência na utilização dos recursos. Embora os conhecimentos utilizados na discussão do assunto sejam conhecidos na literatura a sua aplicação ainda é muito pouco evidente no planejamento de frotas de sistemas complexos existentes na Forças Armadas Brasileiras como, por exemplo, aeronaves, carros de combate e navios. Reconhecidamente, a indústria de Defesa possui

as Forças Armadas como os primeiros clientes de muitos dos sistemas desenvolvidos e, frequentemente, seus produtos começam a ser entregues para as Forças antes do projeto ter sido amadurecido por completo no quesito de confiabilidade.

Este artigo aponta o impacto do amadurecimento da confiabilidade em um sistema em desenvolvimento nos custos de aquisição para os primeiros clientes e fornece algumas pistas sobre o tipo de itens/sub-itens que devem ter mais atenção no processo de amadurecimento da confiabilidade. Na Seção II é apresentado o processo de amadurecimento da confiabilidade de sistemas complexos e pontuada a questão de implantação de um sistema ainda em amadurecimento. A Seção III apresenta a questão da metodologia de avaliação de itens reparáveis a serem adquiridos para o suporte de um produto e estabelece a metodologia de análise do estudo de caso. A Seção IV apresenta um estudo de caso de apoio à argumentação, evidenciando tipos de itens que produzem um efeito maior no custo de aquisição em condições de alteração do amadurecimento da confiabilidade. Finalmente a Seção V apresenta as considerações e conclusões a respeito da análise efetuada e traz à atenção os aspectos a serem considerados por tomadores de decisão que precisem fazer uso dos conhecimentos apresentados nas discussões.

II. AMADURECIMENTO DA CONFIABILIDADE

O desenvolvimento de novos sistemas complexos pode exigir o uso de novos componentes ou itens COTS (do Inglês *Commercial Off The Shelf*), mas ambos operando em um ambiente totalmente novo. Isso pode trazer incertezas na confiabilidade dos sistemas e exigir uma abordagem sistemática de demonstração e crescimento da confiabilidade para minimizar os impactos, especialmente para os primeiros clientes, na implantação e operação inicial do sistema. De acordo com Crowe [1], o gerenciamento e o planejamento do crescimento da confiabilidade podem ser os fatores mais importantes na obtenção da satisfação do cliente. Em muitos casos, a correção do projeto é recomendada para atingir as metas requeridas de confiabilidade sistêmica, a fim de atender os requisitos dos clientes.

O amadurecimento da confiabilidade do sistema é conseguida através de testes, avaliação, e correção no projeto. O

H.C. Marques, hmarques@ita.br, F. M. T. Abrahão, abrahao@ita.br; J. N. Filho, jose_filho1@hotmail.com Tel +55(12)3947 – 5763; D. C. Mota, danielmotaila@gmail.com, Tel +55(11)2465 – 2009.

objetivo do teste de crescimento de confiabilidade é melhorar a confiabilidade ao longo do tempo através de mudanças no projeto do produto ou no processo de fabricação do mesmo [2]. O processo de crescimento da confiabilidade faz parte do planejamento do programa de confiabilidade incluído no processo integrado de desenvolvimento do produto. Este processo começa durante os estudos preliminares com base na definição e compreensão dos requisitos do cliente, que deve influenciar todo o desenvolvimento do suporte integrado do sistema. Com base nesses requisitos, as metas de confiabilidade iniciais são definidas para o sistema e seus componentes. Esses valores são a base para auxiliar em tomadas de decisão de projeto, aquisição de peças, definição de programa de manutenção, avaliações de custos do ciclo de vida, etc.

Os testes e avaliações de crescimento de confiabilidade devem ser realizados continuamente durante todas as fases do desenvolvimento integrado e ciclo de vida do produto. Uma curva de crescimento de confiabilidade deve ser definida como um meio de identificar a meta de confiabilidade e avaliar o seu progresso. Outro fator importante é a seleção de fornecedores e a obtenção do seu compromisso com o processo de crescimento de confiabilidade, uma vez que a confiabilidade requerida do item deve ser atingida no desenvolvimento do sistema final a ser entregue aos primeiros clientes.

As avaliações e as ações corretivas podem ser feitas no componente (item), no sub-sistema ou de maneira sistêmica. A maturidade da confiabilidade do sistema deve aumentar com a evolução das fases de desenvolvimento, e isto é refletido na modelagem da confiabilidade adotado:

- Nos estudos preliminares e conceituais, a alocação de confiabilidade para cada sistema é baseada na confiabilidade teórica dos componente, ou nos dados de campo levantados de uma aplicação similar;
- Durante o desenvolvimento, conforme o sistema é definido e os testes são realizados, o modelo é atualizado para incorporar os valores reais atingidos;
- Antes da entrada em serviço as metas de confiabilidade podem e devem ser aprimoradas por meio dos dados de teste e avaliações das aeronaves protótipo e das primeiras aeronaves de série, possibilitando a correta inclusão dos parâmetros logísticos ao sistema.

No entanto, em muitos casos, a curva de crescimento de confiabilidade prevista pode escorregar para a fase de "operações e suporte" e se tornar um pesadelo para os primeiros clientes. Os problemas geralmente derivam da incerteza relacionada aos fatores de Confiabilidade, Disponibilidade, Manutenção e Segurança (RAMS - do Inglês *Reliability, Availability, Maintainability and Safety*) com impactos no suporte ao produto, tais como, na otimização de suprimentos e alocação de custos adequada; planejamento de manutenção preventiva; alocação de recursos de mão de obra e treinamento; provisionamento de equipamento de apoio no solo (GSE - do Inglês *Ground Support Equipment*) e ferramentas; desafios da engenharia de sustentabilidade durante o ciclo de vida, problemas contratatuais e de garantias.

Entre as causas mais comuns no atraso do amadurecimento da confiabilidade estão: a complexidade relacionada a necessidade da abordagem sistêmica de integrar todas os

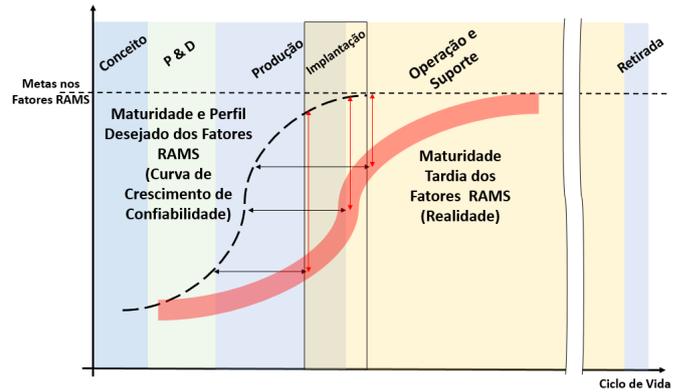


Fig. 1 - Curva de Crescimento de Confiabilidade no Desenvolvimento de Sistemas Complexos. A curva vermelha (direita) representa a realidade para primeiros clientes com o amadurecimento tardio já na fase de operações e suporte. Fonte: [3]

requisitos de suporte logístico de todos os subsistemas; a falta de compreensão sobre os impactos dos fatores RAMS no gerenciamento de suporte ao ciclo de vida; o custos elevados de testes; e falta de comprometimento com o problema de desenvolvimento da suportabilidade do produto. A Fig. 1 resume e apresenta os problemas de suporte discutidos e sugere uma série de análises (setas) para a correção na curva de crescimento de confiabilidade.

III. ANÁLISE CUSTO-EFICIÊNCIA NA AQUISIÇÃO DE ITENS SOBRESSALENTES PARA SISTEMAS COMPLEXOS

Itens podem ser classificados, segundo à viabilidade técnica ou econômica de restaurar a sua operacionalidade, como reparáveis e não-reparáveis. Os itens reparáveis são aqueles para os quais é técnica e economicamente conveniente efetuar ações de manutenção [4].

O presente estudo focará em frotas de sistemas complexos cuja demanda de itens reparáveis possui características estocásticas. Estes itens são projetados para serem substituídos quando falham, uma vez que o reparo do item instalado em uma aeronave, por exemplo, além de possivelmente inviável, causaria o aumento da complexidade das ações de manutenção na linha de voo e uma diminuição significativa da disponibilidade do sistema. Disponibilidade, neste contexto, é uma medida de desempenho declarada em termos de percentual do tempo em que um sistema está em condições operacionais. Neste caso, troca-se o item degradado para manter o sistema em estado operacional e faz-se as medidas de manutenção no item em local adequado.

Conseqüentemente, há que se ter um número extra de itens, além dos instalados em cada sistema, para que este não entre em espera, reduzindo a sua disponibilidade. Dado que tais itens geralmente apresentam um tempo de reparo/reposição elevados, o estudo da variabilidade dos tempos e da demanda torna-se importante para a tomada de decisão na aquisição de itens extras, chamados de "itens de giro".

Será abordada a análise de determinação da quantidade de itens sobressalentes reparáveis que devem ser adquiridos antes da fase inicial de operação de um sistema complexo e como

a alteração dos valores de confiabilidade de projeto (entenda-se a taxa de falhas) influencia no custo do ciclo de vida do produto para os primeiros clientes.

A. Modelagem da Demanda de Reparáveis

A determinação da quantidade de itens sobressalentes pode ser feita por meio de uma abordagem por item ou sistêmica [5]. Uma das vantagens da abordagem sistêmica em comparação à abordagem por item é que apenas a primeira informa ao decisor uma relação de custo e eficiência do sistema. Desta maneira o tomador de decisão pode responder perguntas tais como: "Como podemos reduzir a incerteza de não termos uma disponibilidade abaixo de 90% na utilização de uma frota por falta de itens reparáveis? Quanto mais dinheiro precisaremos para incrementar a disponibilidade de 90% para um índice superior? A abordagem sistêmica permite calcular que quantidade de giro por item nos possibilitaria um maior índice de disponibilidade, dado um limite orçamentário, custo de aquisição unitário, taxas de falha e tempos médios de reparo dos itens [5].



Fig. 2 - Diagrama Disponibilidade X Custo, gerado a partir da otimização de inventário na abordagem sistêmica.

A abordagem sistêmica apresenta ao gestor de inventário uma curva de eficiência disponibilidade-custo de alternativas de inventário, segundo o valor disponível para investimento na aquisição de itens de giro. A Fig. 2 exemplifica uma curva ótima da disponibilidade-custo [5]. Estar abaixo do resultado ótimo representado pela curva significa perda de eficiência logística.

Com o objetivo de focar a análise na variabilidade das taxas de falhas de itens reparáveis durante o ciclo de amadurecimento da confiabilidade do sistema estaremos utilizando o modelo de Único Escalão. Caso utilizássemos o modelo de Múltiplos Escalões teríamos de inserir a análise de tempo de transporte entre os diversos níveis, o que poderia alterar profundamente a demanda por itens de giro. O modelo de Escalão Único possui as seguintes premissas:

- sistema de reparo e armazenagem encontra-se em um único local;
- em hipótese alguma, o reparo será feito em outro local ou deixará de ser feito;

- tempos de transporte são desprezíveis;
- regra FIFO - *first-in-first-out* (primeira demanda em espera [BO - *backorder*] será atendida primeiro);
- capacidade de reparo é ampla, logo o tempo de reparo independe do número de itens que já estão sendo reparados;
- a demanda é de Poisson com média constante, independente do número de unidades em reparo/aquisição.

Para este modelo, as variáveis de interesse são a demanda por itens aos longo do tempo m e o tempo de reparo t . Sendo considerada a demanda por um item como um processo de Poisson, a distribuição de probabilidade para o número de itens em reparo tem a forma de uma distribuição de Poisson, pelo Teorema de Palm [6], com média:

$$\lambda = m \times t \quad (1)$$

Considerando-se X como o número de itens em reparo que não estão em estoque e S a quantidade de itens de giro, define-se *expected backorders* como uma estimativa da quantidade de itens faltantes em uma frota [5], pela equação:

$$EBO(S) = \sum_{x=S+1}^{\infty} (x - S)Pr(X = x) \quad (2)$$

De maneira alternativa de calcularmos o EBO sem nos preocuparmos com somatórios ao infinito iremos utilizar a seguinte equação para as análises:

$$EBO(\lambda, S) = \lambda - S + \sum_{x=0}^S (S - x)Pr(X = x) \quad (3)$$

Ainda, sendo i um item em específico e c o custo, temos como objetivo minimizar o número total esperado de itens em emergência no sistema (EBO), estabelecendo níveis adequados de estoque para cada um deles:

$$\min \sum_{i=1}^I EBO(S_i) \quad (4)$$

sujeito à restrição de orçamento:

$$\sum_{i=1}^I c_i S_i \leq \$Orçamento \quad (5)$$

A demanda média m dos itens por hora é proporcional à taxa de falha (FRT - do Inglês *Failure Rate*), a taxa de utilização (UTIL), a quantidade de itens por aeronave (QPA) e a quantidade de sistemas operando no local de interesse (QTYSYS):

$$m = FRT \times UTIL \times QPA \times QTYSYS \quad (6)$$

Para resolvermos o problema de otimização, faremos uma análise marginal, calculando primeiro a razão custo-benefício (BCR - do Inglês *benefit-cost ratio*) de ter uma unidade a mais de um item:

$$BCR = \frac{[EBO(S - 1) - EBO(S)]}{c} \quad (7)$$

A fim de obtermos a disponibilidade (A) do sistema, iremos ignorar manutenções programadas, sendo o único tempo de espera o de reparo das peças:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + \frac{EBO}{m} \times UTIL} \quad (8)$$

onde

$$MTBF = \frac{1}{FRT} \quad (9)$$

Consideraremos que a taxa de falhas do sistema é igual ao somatório das taxas de falhas dos itens i :

$$FRT = \sum_{i=1}^I FRT_i \quad (10)$$

IV. ESTUDO DE CASO

Como estudo de caso, temos uma base aérea com uma frota de 10 aeronaves (QTYSYS) onde cada aeronave voe em média 2.190 horas por ano (UTIL). Cada item reparável que falha pode ser reparado na oficina da própria base, não havendo condenações dos itens. Baseando-nos nas premissas do modelo de Escalão Único, definiremos as características dos itens a partir dos dados da Tabela I.

TABELA I
DADOS DOS ITENS

Item	FRT(MH)	QPA	m (itens/H)	t (H)	$\lambda = m.t$	C_i (\$)
1	400,00	1	0,0010	1.000	1	5.000
2	200,00	1	0,0005	8.000	4	1.000
3	1.300,00	1	0,00325	2.000	6,5	1.200
4	300,00	1	0,00075	3.000	2,25	2.000
5	1.000,00	1	0,0025	500	1,25	4.000
6	150,00	1	0,000375	250	0,09375	500

Na Tabela I a coluna m foi calculada a partir de (6). Os valores de FRT significam o número de falhas em 1 milhão de horas voadas. As tabelas de II até VII foram obtidas a partir de (7).

A partir da análise, faz-se a enumeração em ordem decrescente de BCR dos itens, computando-se o custo de se adicionar o item cujo BCR foi encontrado na sequência. Assim, para cada item acrescentado obtém-se a nova taxa esperada de disponibilidade e custo do conjuntos de itens a ser adquirido, possibilitando identificar que itens impactam mais na disponibilidade do sistema. Pelas tabelas visualizadas, percebe-se que os itens que mais impactam são os itens 2 e 3. O item 6 é o que menos produz impacto na disponibilidade do sistema, como era de se esperar, por possuir FRT mais baixa,

TABELA II
ANÁLISE BCR DO ITEM 1

S	$EBO(S_1)$	BCR_1
0	1,00	
1	0,37	0,126
2	0,10	0,053
3	0,02	0,016
4	0,00	0,004

TABELA III
ANÁLISE BCR DO ITEM 2

S	$EBO(S_2)$	BCR_2
0	4,00	
1	3,02	0,9817
2	2,11	0,9084
3	1,35	0,7619
4	0,78	0,5665
5	0,41	0,3712
6	0,20	0,2149
7	0,08	0,1107
8	0,03	0,0511
9	0,01	0,0214
10	0,00	0,0081
11	0,00	0,0028

TABELA IV
ANÁLISE BCR DO ITEM 3

S	$EBO(S_3)$	BCR_3
0	6,50	
1	5,50	0,8321
2	4,51	0,8239
3	3,56	0,7975
4	2,67	0,7401
5	1,89	0,6469
6	1,26	0,5258
7	0,79	0,3946
8	0,46	0,2727
9	0,25	0,1737
10	0,13	0,1022
11	0,06	0,0557
12	0,03	0,0282
13	0,01	0,0134
14	0,00	0,0059
15	0,00	0,0025

TABELA V
ANÁLISE BCR DO ITEM 4

S	$EBO(S_4)$	BCR_4
0	2,25	
1	1,36	0,4473
2	0,70	0,3287
3	0,31	0,1953
4	0,12	0,0953
5	0,04	0,0390
6	0,01	0,0137
7	0,00	0,0042
8	0,00	0,0011

TABELA VI
ANÁLISE BCR DO ITEM 5

S	$EBO(S_5)$	BCR_5
0	1,25	
1	0,54	0,1784
2	0,18	0,0888
3	0,05	0,0329
4	0,01	0,0096
5	0,00	0,0023

TABELA VII
ANÁLISE BCR DO ITEM 6

S	EBO(S ₆)	BCR ₆
0	0,09	
1	0,00	0,1790
2	0,00	0,0083

menor custo unitário de aquisição e um tempo médio de reparo menor que todos os demais. Itens com esta característica só serão impacto se no início da produção forem produzidos em pequena quantidade ou estiverem na proximidade de entrar em obsolescência, ou ainda, se pertencerem à lista de equipamentos mínimos para liberação de voo (MEL - do Inglês *Minimum Equipment List*).

O resultado da análise pode ser visualizado a partir da curva disponibilidade-custo, conforme a Fig. 2. Este resultado foi utilizado como parâmetro para a alteração da FRT de um item de cada vez, mantendo-se os parâmetros dos demais conforme anteriormente definido pela Tabela I. Seguindo-se a orientação de um expert da Força Aérea Brasileira definiu-se uma variação de 25% para mais e para menos na taxa de falhas de cada item. O resultado das variações podem ser visualizadas a partir da Fig. 3.

Considerando-se a hipótese de análise com aumento de 25% da FRT do item 3, conforme apresentado na Fig. 4, compararemos as duas curvas disponibilidade-custo. A curva superior é a inicialmente estimada, sendo que cada ponto de análise (em forma de triângulo na cor azul) evidencia um custo de aquisição baseado em uma lista de itens sobressalentes otimizada a partir da análise BCR descrita anteriormente. A curva inferior representa o deslocamento da taxa de disponibilidade para menos, devido à hipótese e cada ponto de análise (em forma de círculo na cor vermelha) também representa um custo de aquisição da nova lista otimizada pelo novo parâmetro do Item 3.

O ponto verificado na curva superior (estimação inicial) que nos exhibe o custo de \$40.500,00 sugere uma taxa de disponibilidade de 91,88%, com a aquisição de sobressalentes de 01 item 1, 07 itens 2, 10 itens 03, 04 itens 4, 02 itens 5 e 01 item 6. Caso evidencie-se um amadurecimento da confiabilidade do produto que nos mostre uma redução na confiabilidade, ou seja, um aumento na FRT em 25% conforme a hipótese, para o exemplo em estudo, ter-se-ia que adquirir mais 02 dois itens 3, a um custo conjunto de \$2.400,00, para manter-se uma taxa sugerida de disponibilidade próxima de 91,75%, ainda aquém do ponto da curva inicialmente estimada. A aquisição de sobressalentes totalizaria \$42.900,00, um incremento de 6% no custo de aquisição, incremento de 10 para 12 itens 3 e redução de 91,88% para 91,75% de disponibilidade esperada. Caso o orçamento disponível não pudesse ser incrementado neste valor, o sistema teria disponibilidade esperada abaixo de 90%, o que poderia impactar na sua operação.

Com uma lista de apenas 06 itens sobressalentes o impacto gerado na pior situação, onde há um item com taxa de falhas alta, custo unitário de aquisição e um tempo médio de reparo consideráveis, característica comum em sistemas complexos, não pode ser ignorado. Imagine-se uma aeronave

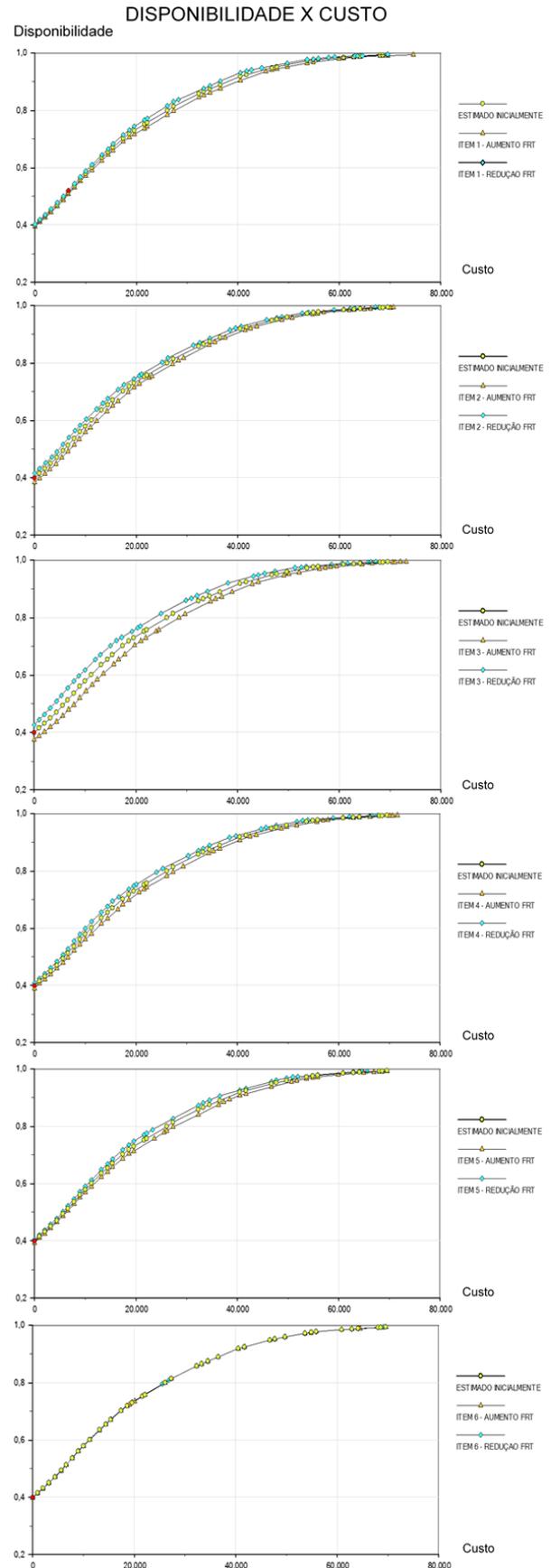


Fig. 3 - Diagrama Disponibilidade X Custo, a partir da variação da taxa de falha de cada item em 25 %, para mais e para menos, mantendo-se o parâmetro dos demais.

Disponibilidade x Custo

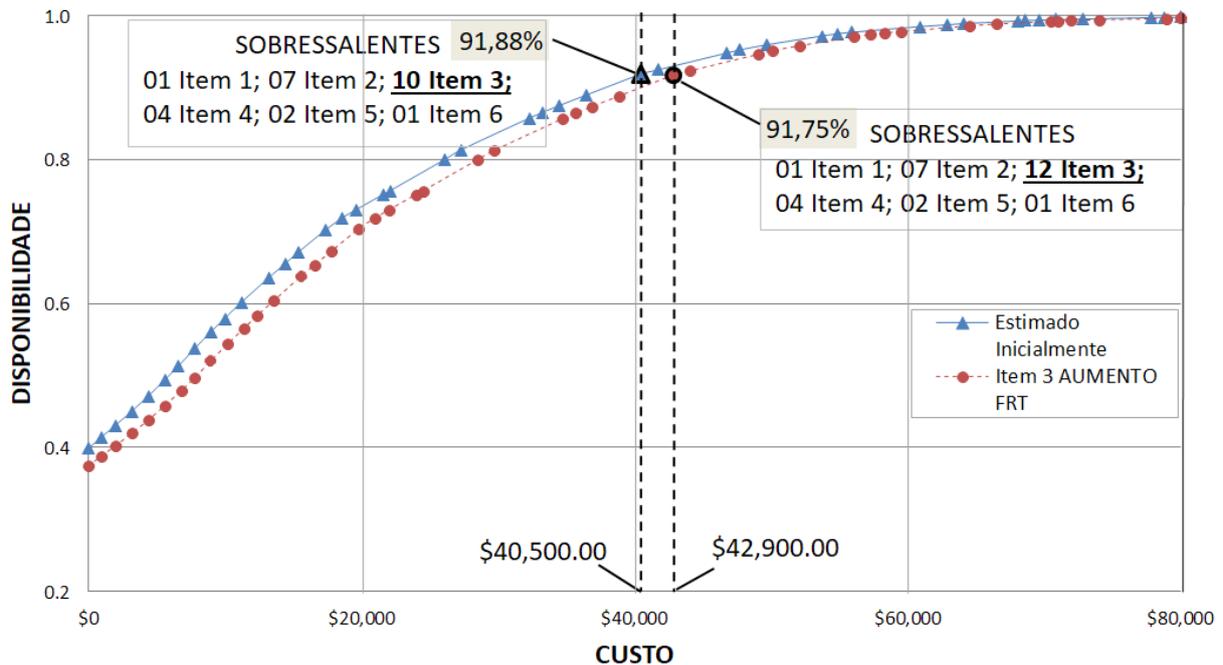


Fig. 4 - Diagrama Disponibilidade X Custo da comparação do aumento da FRT do Item 3 em 25%.

com milhares de itens o que poderia ocorrer, em termos de aquisição de sobressalentes, quando um produto entra em operação sem alcançar o amadurecimento de confiabilidade definidos em projeto. Caso a FRT tivesse uma melhora de 25%, haveria mais sobressalentes que o necessário, o que também não seria interessante em termos de eficiência logística. Os primeiros clientes deverão considerar opções de devolução de sobressalentes e/ou troca, para que não haja prejuízos na operação do sistema nas suas fases iniciais de operação.

V. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÃO

O amadurecimento da confiabilidade de sistemas em desenvolvimento produzem desafios logísticos de toda natureza. Embora alguns itens já possam ter a sua confiabilidade conhecida quando operando em um determinado contexto não se tem a certeza de que esta confiabilidade seja a mesma ao operar em circunstâncias e ambiente diferentes. Devido à esta característica há um processo de amadurecimento da confiabilidade, que demanda testes e simulações e podem produzir alterações no sistema durante o seu processo de desenvolvimento.

Ao se entregar um sistema para operação, estando ainda em amadurecimento da confiabilidade, pode-se esperar que a aquisição da Lista de Aprovisionamento Inicial (IPL) não atinja o valor esperado de disponibilidade da frota para o orçamento definido. Há que se realizar simulações de vários cenários para cada tipo de item da lista, pois há itens que geram um maior impacto que outros e deverão ser acompanhados mais de perto pelo Gerente de Suporte da Frota do operador para que este realize os ajustes necessários na

aquisição de novos itens sobressalentes para a manutenção da disponibilidade esperada.

Não foram considerados tempos de transporte entre bases e fornecedores na presente análise, o que poderia impactar ainda mais a quantidade de itens sobressalentes necessários. No evento de um sistema com milhares de itens, como aeronaves e sistema d'armas em geral, há que se ter um controle rígido sobre os sobressalentes para que não se gaste recursos nos itens que não promoverão aumento da disponibilidade ou da prontidão da frota.

REFERÊNCIAS

- [1] CROWE, D.; FEINBERG, A. *Design for Reliability*. CRC Press, 2001. (Electronics Handbook Series). ISBN 9781420040845. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Wou9BwAAQBAJ>>.
- [2] EBELING, C. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Waveland Press, 2010. ISBN 9781577666257. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=bX0iQgAACAAJ>>.
- [3] ABRAHÃO, F. T. M. *Tópico: Curva de Crescimento de Confiabilidade no Desenvolvimento de Sistemas Complexos*. Mar. 2017. Notas de Aula MB-249 Logística no Desenvolvimento de Sistemas Complexos.
- [4] ABNT. *NBR 5462 Confiabilidade e manutenibilidade*. Rio de Janeiro, Brasil, 1994.
- [5] SHERBROOKE, C. *Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques*. Springer US, 2004. (International Series in Operations Research & Management Science). ISBN 9781402078491. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=FTHA4HKBzLwC>>.
- [6] HEYMAN, D.; SOBEL, M. *Stochastic Models in Operations Research: Stochastic Processes and Operating Characteristics*. Dover Publications, 2003. (Dover Books on Computer Science Series). ISBN 9780486432595. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=IcV1wPS0qCwC>>.