



Planejamento de atividades de desenvolvimento de sistemas complexos utilizando índices de maturidade em um modelo de minimização de recursos de projeto associado à matriz de verificação de requisitos

REZENDE, B. K.¹, CHAGAS JR., M. F.²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Aluno de Mestrado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

bkrezende@gmail.com

Resumo. Construir cronogramas de desenvolvimento de sistemas complexos utilizando apenas como informação a disponibilidade de recursos para execução de atividades pode acarretar em resultados financeiros desastrosos ao desenvolvimento de sistemas complexos. Criar cronogramas que consideram a maturidade tecnológica atual do sistema e que distribuem as evoluções de maturidade dos elementos tecnológicos por intermédio da alocação de recursos financeiros e humanos da forma mais otimizada reduz significativamente os riscos de fracasso do desenvolvimento. Nesse cenário, a inclusão de níveis de maturidade dos elementos tecnológicos a cada requisito contido na matriz de verificação de requisitos do sistema é proposta para a criação de tal cronograma de desenvolvimento. Uma vez criado, a correlação direta entre o cronograma de evolução de maturidade do sistema e a matriz de verificação de requisitos modificada irá fornecer o planejamento de emissão de relatórios de verificação que concede o caminho mais otimizado de evolução de maturidade do sistema.

Palavras-chave: Gerenciamento; Maturidade; Sistemas Complexos;

1. Introdução

Propôs-se que a maturidade de um sistema complexo em desenvolvimento seja denominada como *System Readiness Level* (SRL) e, para mensurá-la, seja realizado um cálculo matricial das escalas *Technology Readiness Level* (TRL) e *Integrated Readiness Level* (IRL) [Sauser et al., 2008]. O valor de SRL fornecerá o estado de maturidade do sistema por correlacionar matricialmente as maturidades isoladas dos elementos tecnológicos às suas maturidades de integração com outros elementos tecnológicos. Ao se substanciar matematicamente o cálculo da maturidade de um sistema pelo índice SRL, um



X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

7 a 9 de agosto de 2019

algoritmo baseado na teoria de descobertas de soluções ótimas PSDA (*Probabilistic Solution Discovery Algorithm*) denominado SCODmin foi desenvolvido com a finalidade de encontrar o custo financeiro e horas de trabalho mínimos necessários para fornecer um determinado aumento de SRL [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010]. O algoritmo pode ser executado quando as seguintes informações são fornecidas:

- SRL inicial do sistema;
- Aumento desejado de SRL do sistema;
- Alocação de valores de custo financeiro e horas de trabalho para avanço de cada nível de TRL e IRL.

Esse modelo de minimização de custos reconhece que o avanço de maturidade de elementos tecnológicos compete por recursos e que um avanço de SRL otimizado pode ocorrer devido à alocação ótima destes recursos. Ressalta-se que não se pode provar que a solução encontrada pelo algoritmo seja a solução ótima, porém testes prévios indicaram que os resultados do PSDA tendem a ser melhores que os resultados de métodos meta-heurísticos alternativos [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010].

Como contribuição à metodologia de utilização do algoritmo SCODmin, o presente artigo propõe a utilização de uma matriz de verificação de requisitos que inclui, para cada requisito, o elemento tecnológico associado e o nível de maturidade TRL ou IRL para o qual a verificação do requisito contribui. Isso irá permitir estimar as matrizes de custo financeiro e de horas de trabalho utilizadas como informações de entrada para utilização do algoritmo SCODmin. Uma vez executado o algoritmo poder-se-á planejar a emissão de todos os documentos de verificação associados a cada requisito de forma a cumprir com o planejamento otimizado de evolução de maturidade.

2. Metodologia

A metodologia aplicada neste estudo consiste em uma pesquisa bibliográfica com análise qualitativa [Willians, 2007] dos resultados obtidos no estudo de caso teórico apresentado pelos autores do algoritmo SCODmin [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010]. A presente pesquisa foi dividida em duas etapas: revisão da literatura aplicável sumarizada na introdução, fornecendo referências aos autores que propuseram o algoritmo SCODmin no meio científico (abordando escalas de maturidade e avaliação de níveis de escala de maturidade); e estudo de caso teórico de três tecnologias e duas integrações que propõe uma execução ilustrativa do algoritmo SCODmin associada à uma matriz de verificação de requisitos modificada.

3. Resultados e Discussão

Um exemplo de três tecnologias e duas integrações, denominado SAT1, é apresentado na Figura 1 e será utilizado para demonstrar:



X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

7 a 9 de agosto de 2019

- A matriz de verificação de requisitos como ferramenta de estimativa de custos financeiros e horas de trabalho para avanço nas escalas de maturidade TRL e IRL para posterior execução do algoritmo SCODmin;
- A utilização do resultado fornecido pelo algoritmo SCODmin para planejamento da emissão dos relatórios de verificação listados na matriz de verificação de requisitos.

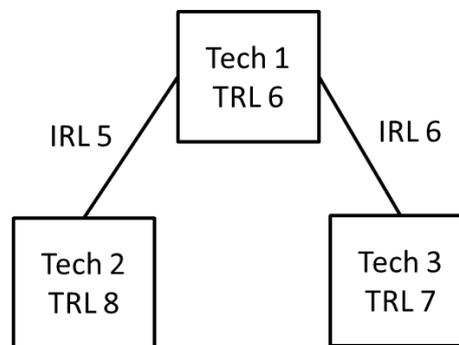


Figura 1 - Diagrama conceitual do Sistema SAT1: Tech 1—Battery System; Tech 2—Solar Panel System; Tech 3—Converters System. [Fonte: o autor]

Para estimar-se os valores de custo financeiro e de horas de trabalho para cada avanço de nível de maturidade TRL e IRL propõe-se a utilização da matriz de verificação de requisitos que relaciona cada requisito ao seu elemento tecnológico crítico (*Critical Technology Element* ou CTE) ou elemento crítico de integração (*Critical Integration Element* ou CIE) [Magnaye et al. 2014]. Também se definem os níveis de maturidade para os quais a verificação de cada requisito irá contribuir, fazendo com que sua verificação seja necessária para garantir o nível de maturidade aplicável e garanta o avanço de maturidade adequado do sistema. A Tabela 1 apresenta uma matriz de verificação de requisitos ilustrativa do sistema SAT1 que inclui a associação descrita previamente.

O valor de SRL atual calculado para o sistema SAT1 é de 0.60. Ao se avaliar os esforços associados para se verificar cada requisito associado a um determinado nível de maturidade a partir da Tabela 1, estimam-se os custos financeiros e as horas de trabalho necessárias para cada evolução de TRL conforme apresentado na Tabela 2 e para cada evolução de IRL conforme apresentado na Tabela 3 (valores ilustrativos).

Percebe-se que o custo total estimado para a finalização do desenvolvimento do sistema é de \$4,505 (soma de todos os custos financeiros apresentados na Tabela 2 e Tabela 3) e o total de horas de trabalho estimadas para realizar todo o ciclo remanescente de desenvolvimento é de 1,189 horas de trabalho (soma de todas as horas de trabalho da Tabela 2 e Tabela 3).



X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

7 a 9 de agosto de 2019

Tabela 1 – Matriz de verificação de requisitos ilustrativa do Sistema SAT1. [Fonte: o autor]

Requirement ID	Requirement Text	Verification Method	Verification Venue	Verification Procedure (if applicable)	Verification Results	Critical Technology Element/Integration	Readiness Work Package
ELEC-1	The battery charging system shall control the Battery bank charging rates.	Test Analysis	Electrical Model	TP-1000	TR-1000 AR-100	CTE1	TRL7, TRL8, TRL9
ELEC-2	The battery discharging system shall control the Battery bank discharging rates.	Test Analysis	Electrical Model	TP-1000	TR-1000 AR-100	CTE1	TRL7, TRL8, TRL9
ELEC-3	The Battery monitoring system shall provide information to telemetry in case the battery is sensed in a failed condition.	Test Analysis	Electrical Model	TP-1000	TR-1000 AR-100	CTE1	TRL7, TRL8, TRL9
ELEC-4	The Solar Panel (...)	Test Analysis	Electrical Model	TP-1001	TR-1001 AR-101	CTE2	TRL9
ELEC-5	The Solar Panel (...)	Test Analysis	Electrical Model	TP-1001	TR-1001 AR-101	CTE2	TRL9
ELEC-6	The Solar Panel (...)	Test Analysis	Electrical Model	TP-1001	TR-1001 AR-101	CTE2	TRL9
ELEC-7	The Converters (...)	Analysis	None	Not applicable	AR-102	CTE3	TRL8
ELEC-8	The Converters (...)	Analysis	None	Not applicable	AR-102	CTE3	TRL9
ELEC-9	The Converters (...)	Analysis	None	Not applicable	AR-102	CTE3	TRL8, TRL9
ELEC-10	The Converters (...)	Analysis	None	Not applicable	AR-102	CTE3	TRL8, TRL9
ELEC-11	The Solar Panel Controller shall provide a message to the battery charging system whenever the Solar Panel is detected in a failed condition	Test Analysis	Electrical Model	ITP-1000	ITR-1000 IAR-100	CIE1,2	IRL6, IRL7, IRL8, IRL9
ELEC-12	The Solar Panel Controller shall provide a message (...)	Test Analysis	Electrical Model	ITP-1000	ITR-1001 IAR-101	CIE1,3	IRL7, IRL8, IRL9
ELEC-13	The Solar Panel Controller shall provide a message (...)	Test Analysis	Electrical Model	ITP-1000	ITR-1001 IAR-101	CIE1,3	IRL8, IRL9

Tabela 2. Custo Incremental Estimado (× 1000) e Tempo para cada esforço Tecnológico. [Fonte: o autor]

Technology Level Effort	CTE1		CTE2		CTE3	
	Cost	Time	Cost	Time	Cost	Time
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7	\$100	50				
8	\$230	110			\$59	48
9	\$400	120	\$200	153	\$78	69

Semelhante ao estudo de caso teórico apresentado em [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010], descreve-se uma situação em que se deseja aumentar a maturidade do sistema em 80%, o que significa calcular o remanescente de maturidade total a ser obtida ($1,00 - 0,60 = 0,40$) e aplicar o fator de aumento desejado, nesse caso de 0,80, que irá conferir um incremento de maturidade SRL final de ($0,60 + 0,32 = 0,92$).



X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

7 a 9 de agosto de 2019

Tabela 3 - Custo Incremental Estimado ($\times 1000$) e Tempo para cada esforço de Integração. [Fonte: o autor]

Integration IRL Level	CIE1,2		CIE1,3	
	Cost	Time	Cost	Time
1				
2				
3				
4				
5				
6	\$475	52		
7	\$625	75	\$143	68
8	\$741	95	\$245	81
9	\$853	140	\$356	128

Os resultados de utilização do algoritmo são ilustrativos e representam uma execução teórica do algoritmo para exemplificar a criação do planejamento de emissão dos relatórios de verificação de requisitos. Conforme descrito em [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010], quando um aumento de 80% do SRL é desejado, uma restrição de soluções ao algoritmo é também aplicada a um máximo de 80% do total de horas de trabalho disponíveis ($1,189 \times 0,80 = 951.2$), descartando possíveis soluções em que o dispêndio de horas de trabalho seja superior a 80% do total disponível de horas para um aumento de 80% no SRL. Para o exemplo de um aumento de 80% de SRL, [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010] o algoritmo SCODmin obteve um custo financeiro mínimo associado de 63,55% (valor percentual em relação ao custo financeiro total estimado para o projeto) e uma quantidade de horas de trabalho de 59,14% (valor percentual em relação ao número total de horas de trabalho estimadas para o projeto), sendo essa a solução de convergência para os últimos cinco ciclos do algoritmo. Expandindo o mesmo conceito para outros aumentos percentuais de SRL, os resultados para o estudo de caso são apresentados na Tabela 4, que fornece valores de custo financeiro e horas de trabalho percentuais associados especificamente para o exemplo apresentado em [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010].

Tabela 4 – Correlação percentual dos resultados obtidos. [Fonte: o autor baseado no estudo de caso de Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010]

Aumento desejado de SRL	Custo calculado SCODmin (\$ x 1000)	Tempo calculado SCODmin (Homem-hora)	Porcentagem do custo total (\$26574M)	Porcentagem do tempo total (19122)
20%	2203	1654	8.29%	8.65%
40%	5914	3797	22.25%	19.86%
60%	11065	7667	41.64%	40.10%
80%	16888	11309	63.55%	59.14%



X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

7 a 9 de agosto de 2019

Serão utilizados, como referência e para fins ilustrativos, os valores percentuais de custo financeiro e horas de trabalho contidos na Tabela 4 para adaptar os valores de custo financeiro e quantidade de horas para outros aumentos percentuais de SRL do sistema SAT1, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Solução ilustrativa para valores de SRL desejados [Fonte: o autor]

Desired Improvement in SRL	SRL		Time (man-hrs)		Computed Minimum Cost (\$x1000)
	Targeted	Computed	Targeted	Computed	
0%	0.6	0.6	n.a	n.a	n.a.
20%	0.68	0.68	237.8	102.85	389.68
40%	0.76	0.76	475.6	236.14	894.69
60%	0.84	0.84	713.4	476.79	1806.5
80%	0.92	0.92	951.2	703.17	2664.28

A Tabela 6 apresenta resultados de uma execução ilustrativa do algoritmo SCODmin com a disposição dos valores de TRL e IRL que conferem o atingimento de SRL de cada aumento percentual. Os mesmos foram distribuídos anualmente e constituem, assim, um cronograma de desenvolvimento do sistema orientado ao avanço dos índices de maturidade aplicáveis.

Tabela 6 - Plano de Desenvolvimento otimizado [Fonte: o autor]

Year	Target SRL	TRL			IRL	
		CTE1	CTE2	CTE3	CIE1,2	CIE1,3
6	1.00	9	9	9	9	9
5	0.92	9	9	9	8	8
4	0.84	8	8	8	8	8
3	0.76	8	8	8	6	7
2	0.68	7	7	8	6	7
1	0.60	6	8	7	5	6

Portanto, para cada aumento anual de SRL, pode-se, em posse do plano de desenvolvimento otimizado, filtrar um nível de maturidade TRL ou IRL na coluna *Readiness Work Package* da matriz de verificação de requisitos modificada apresentada na Tabela 1 e determinar quais relatórios de verificação de requisitos precisam ser emitidos naquele ano. No ano 2, por exemplo, ao se filtrar os TRLs e IRLs apresentados para os elementos tecnológicos críticos CTE1 (TRL 7), CTE2 (TRL 7) e CTE3 (TRL 8) e elementos de integração críticos CIE1 (IRL 6) e CIE2 (IRL7), os seguintes relatórios contidos na matriz de verificação de requisitos deverão ser emitidos pra cumprir com o cronograma otimizado apresentado na Tabela 6:



X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

7 a 9 de agosto de 2019

- TR-1000 (TR - *Test Results*) e AR-100 (AR - *Analysis Results*) em uma versão capaz de verificar o requisito em nível de demonstração de protótipo do sistema em ambiente relevante (TRL 7);
- AR-102 em uma versão capaz de verificar o requisito em nível de demonstração de protótipo do sistema em ambiente relevante (TRL 7);
- ITR-1000 (ITR - *Integration Test Results*) e IAR-100 (IAR - *Integration Analysis Results*) em uma versão capaz de verificar o requisito em nível de integração de tecnologias que estruturam informações para a aplicação desejada (IRL 6);
- ITR-1001 e IAR-101 em uma versão capaz de verificar o requisito em nível de integração de tecnologias verificadas e validadas com detalhes suficientes para ser acionáveis (IRL 7).

4. Conclusão

Infere-se que além de fornecer a gerentes de programas e engenheiros de sistemas a possibilidade de evitar gastos desnecessários até que as tecnologias e as interligações de integração sejam compreendidas de forma mais completa, a metodologia proposta também pode conduzir a um desenvolvimento mais eficaz e eficiente dos sistemas [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010]. A identificação de um plano ótimo de desenvolvimento para todo o sistema permite estabelecer um plano de emissão de relatórios de verificação que irá trazer mais margens de absorção de impactos de custos financeiros e de horas de trabalho adicionais para o desenvolvimento caso ocorram descobertas de informações não previamente consideradas ou estimadas no planejamento original. A metodologia também permite que o gerente do programa monitore e avalie o progresso da maturidade ao longo do desenvolvimento do sistema [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010].

Conforme demonstrado no presente artigo, os esforços de validação e verificação (V&V) também podem ser utilizados para estudar o grau de dificuldade associado ao avanço de nível nas escalas de maturidade. Sugere-se a utilização da matriz de verificação de requisitos modificada apresentada na Tabela 1 como uma forma de estimar custos associados à obtenção de cada nível de maturidade, uma vez que pode-se filtrar todos os requisitos associados à obtenção de um nível de TRL ou IRL e realizar-se uma estimativa das atividades a serem realizadas para verificar todos os requisitos associados.

O estudo de caso teórico contido em [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010] mostrou que é possível aumentar a maturidade do sistema em 80% sem necessariamente despende 80% do custo total e 80% de horas de trabalho totais estimados originalmente, uma vez que \$16.888 milhões e 11.309 horas de trabalho representam, respectivamente, 63,55% do orçamento total (\$26,574 milhões) e 59,14% do número total de horas estimadas (19,122) para o desenvolvimento. Esses valores percentuais do total não significam que a estimativa de custos e horas de trabalho inicial foi imprecisa e que se gastará menos que o planejado.



X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

7 a 9 de agosto de 2019

Se os valores originais foram estimados corretamente, esses mesmos valores ainda serão gastos até o final do projeto. Porém, o resultado do algoritmo SCODmin permite nortear o planejamento das atividades do desenvolvimento para se gastar o mínimo possível para um mesmo aumento percentual de SRL. O mesmo é aplicável para os outros valores percentuais apresentados na Tabela 4.

O uso de ferramentas de gerenciamento de projetos existentes, juntamente com a avaliação de maturidade tecnológica e de integração pode permitir o rastreamento do progresso individual dos elementos tecnológicos e suas respectivas integrações. Os relatórios individuais do projeto podem ser sintetizados em um sistema abrangente de monitoramento e avaliação que pode rastrear os valores planejados de SRL, de custo e horas de trabalho. Tal abordagem é denominada como *System Earned Readiness Management (SERM)* [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010].

Finalmente, o uso do SRL no algoritmo de otimização SCODmin permite que o gerente de programa examine diferentes cenários de plano de desenvolvimento. Por exemplo, um sistema em desenvolvimento pode ser melhorado tecnicamente ou economicamente se tecnologias alternativas e elementos de integração mais maduros, porém menos capazes tecnicamente são usados para substituir aqueles que são mais capazes, porém ainda experimentais. Arquiteturas de sistemas alternativos também podem ser avaliadas com maior clareza, uma vez que o SRL exige o exame crítico dos elementos tecnológicos, como eles se relacionam e se interconectam para formar o sistema [Magnaye, Sauser, Ramirez-Marquez, 2010]

Referências

- Magnaye, R. et al. (2014). Earned readiness management for scheduling, monitoring and evaluating the development of complex product systems, *Int. J. Proj. Manag.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.01.009>
- Magnaye, R. B.; Sauser, B. J.; Ramirez-Marquez, J. E. (2010). System development planning using readiness levels in a cost of development minimization model. *Systems Engineering*, v. 13, n. 4, p. 311–323.
- Sage, A. P. and Lynch, C. L. (1998). Systems Integration and Architecting: An Overview of Principles, Practices, and Perspectives. *Systems Engineering*, v. 1, n. 3, p. 176–227.
- Sauser, B. J. et al. (2008). A system maturity index for the systems engineering life cycle. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, v. 3, n. 6, p. 673–691.
- Willians, C. (2007). Research Methods. *Journal of Business & Economic Research*, v. 5, n. 3, p. 65-72