

Sensores Inerciais Fotônicos para Aplicações Aeroespaciais: Nível de Maturidade Tecnológica

VILSON Rosa de Almeida Ten Cel Av

Instituto de Estudos Avançados (IEAv), Rod. Tamoios, km 5,5. São José dos Campos – SP.
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Marechal Eduardo Gomes, 50. São José dos Campos – SP.

Resumo — A mensuração do nível de maturidade tecnológica fornece uma importante informação métrica para o gerenciamento de risco tecnológico das atividades e projetos voltados para aplicações aeroespaciais de interesse do Comando da Aeronáutica. Mensura-se o nível de maturidade tecnológica de sensores inerciais fotônicos nacionais, como acelerômetros e girômetros. Adota-se o *Technology Readiness Level (TRL)* como metodologia de mensuração do nível de maturidade tecnológica e o software *TRL Calculator* como ferramenta computacional adequada ao respectivo processo de mensuração. Conclui-se que os estudos apresentados e os resultados obtidos permitem obter o nível de maturidade tecnológica de sensores inerciais fotônicos nacionais.

Palavras-chaves — Sensores inerciais; girômetros; acelerômetros; maturidade tecnológica.

I. INTRODUÇÃO

A Navegação Inercial pode ser definida como o processo autônomo de direcionamento e controle dos movimentos de um corpo móvel (veículo ou sistema) para guiá-lo através de um caminho desejado; esse processo depende da obtenção de informações da posição inicial, velocidade, direção e/ou orientação espacial desse corpo móvel com relação a um referencial inercial. Tais informações são obtidas, direta ou indiretamente, por intermédio de sensores inerciais. Analogamente, a Estabilização Inercial pode ser definida como o processo autônomo de direcionamento e controle de um corpo, visando manter sua orientação espacial e/ou posição em relação a um referencial inercial [1]. Os Sistemas de Navegação/Estabilização Inercial – também conhecidos sob a denominação genérica de Sistemas Inerciais – são capazes de prover informações de orientação espacial e/ou posição de veículos em geral, bem como de sistemas de aplicação na área de Defesa ou de uso em ambientes aeroespaciais, como foguetes e satélites; essas informações devem ser independentes de quaisquer sinais externos e, ainda, suficientemente confiáveis e precisas, mesmo quando esses veículos/sistemas se encontram atuando sob condições operacionais e/ou ambientais adversas. Os dispositivos essenciais de um Sistema Inercial são os sensores inerciais denominados girômetros e acelerômetros, que provêm as informações fundamentais de rotação e aceleração, respectivamente.

Vilson Rosa de Almeida, wilson@ieav.cta.br, Tel +55-12-39475460.

Este artigo objetiva apresentar a mensuração do nível de maturidade tecnológica dos sensores inerciais fotônicos nacionais, demandados por Sistemas Inerciais usados em aplicações aeroespaciais de interesse do COMAER, priorizando o estudo e a análise do processo e das ferramentas de mensuração do nível de maturidade tecnológica, bem como o levantamento de dados que possam retratar o nível de domínio científico e tecnológico nacional desses sensores [2].

No âmbito da Universidade da Força Aérea (UNIFA), observa-se que, no período de 1996 a 2007, foram realizados apenas alguns poucos trabalhos monográficos que se encontram proximamente relacionados com o tema deste artigo. Esses trabalhos prévios abordaram brevemente algum sensor inercial específico ou a relevância estratégica de Sistemas Inerciais em aplicações aeroespaciais de interesse do COMAER [3-5]. No entanto, nenhum desses trabalhos buscou mensurar o nível de maturidade tecnológica associado a sensores inerciais específicos, nem tampouco isso foi feito para os Sistemas Inerciais como um todo.

II. NÍVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA

Dentro do conceito geral de mensuração do nível de maturidade tecnológica, há uma grande variedade de trabalhos realizados nos Departamentos de Defesa dos Estados Unidos da América (EUA), do Reino Unido, do Canadá e da Austrália; por outro lado, na seara aeroespacial, a mensuração do nível de maturidade tecnológica encontrou aplicação obrigatória na agência espacial norte-americana *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, onde teve origem, bem como em outras agências espaciais [6-9]. Como resultado desse esforço, alguns diferentes conceitos e sistemas foram criados com a finalidade de mensurar a maturidade sistêmica, funcional ou tecnológica de equipamentos/sistemas, especialmente daqueles desenvolvidos para aplicações militares e espaciais [6,7]. Podem-se citar os seguintes: *Technology Readiness Levels (TRL)*, *Interface Maturity Levels (IML)*, *System Readiness Levels (SRL)*, *Integration Readiness Levels (IRL)*, *Design Maturity Levels (DML)*, *Manufacturing Readiness Levels (MRL)*, *Programmatic Readiness Levels (PRL)* e *Technology Maturity Level (TML)*, além de processos e ferramentas associadas ao conceito em estudo [6,8]. Existem, ainda, propostas do uso de indicadores do grau de dificuldade que se espera encontrar durante o processo de maturação de projetos de P&D de uma determinada tecnologia [10,11].

O indicador de nível de maturidade tecnológica que tem o conceito mais amplamente difundido mundialmente, além de ser o mais adotado para uso institucional, é o *Technology Readiness Level*, aqui designado de Indicador TRL e apresentado em detalhes a seguir.

A. Indicador TRL

O Indicador TRL foi inicialmente proposto em 1989 com sete níveis de maturidade [12], para atender às necessidades específicas da NASA. Em 1995, a escala de níveis foi aperfeiçoada em sua descrição, e o Indicador TRL passou a apresentar nove níveis [13]. A *United States Air Force* adotou o uso do Indicador TRL em 1990. Em 1999, o então chamado *United States General Accounting Office (GAO)* produziu um artigo de grande influência, o GAO/NSIAD-99-162 [14], onde foram examinadas as diferenças entre o *Department of Defense (DoD)* dos EUA e a indústria privada relativas à implementação de transição de uma determinada tecnologia; esse documento concluiu que o DoD assumia riscos maiores, bem como tentava realizar transições para tecnologias com graus de maturidade menos elevados, em relação ao que a indústria privada realizava. O GAO concluiu que o uso de tecnologias imaturas aumentava o risco geral dos programas e recomendou que o DoD adotasse o uso do Indicador TRL da NASA, como um meio de avaliar a maturidade tecnológica previamente à uma opção por transição tecnológica.

Atualmente, o Indicador TRL encontra-se amplamente difundido, tendo sido aceito ou incorporado pela maioria das instituições diretamente ligadas à área de Defesa e a atividades espaciais, bem como por diversas instituições e empresas ao redor do mundo; por exemplo, citam-se instituições como o *Federal Aviation Administration (FAA)* e o *Department of Energy (DOE)* dos EUA. Há, inclusive, uma conferência anual, atualmente designada como *Technology Maturity Conference (TMC)*, idealizada para tratar exclusivamente de assuntos de caráter ostensivo relacionados com a maturidade tecnológica, onde as características e aplicações do Indicador TRL despontam dentre os principais tópicos dos trabalhos ali apresentados.

Existem, atualmente, duas vertentes principais do Indicador TRL amplamente utilizadas, sendo apenas ligeiramente distintas entre si: a primeira foi desenvolvida pela NASA [13]; a segunda, mais recente, foi elaborada pelo DoD, tendo sido essencialmente baseada na primeira. Paralelamente, o DoD preconiza a dicotomia de variantes operacionais do Indicador TRL, em função da natureza do sistema a ser mensurado: uma para hardware e outra para software; essa dicotomia parece ser apenas sutil, mas é necessária para melhor classificar o sistema em estudo [7,15].

O principal propósito de uso do Indicador TRL é auxiliar no gerenciamento de tomada de decisões relacionadas com o processo de desenvolvimento e de transição de tecnologias. Algumas vantagens do uso do Indicador TRL advêm do fato de que o mesmo: provê um entendimento comum do status de uma determinada tecnologia; facilita o gerenciamento de riscos tecnológicos; e pode ser usado na tomada de decisões referentes a financiamento ou transição de uma determinada tecnologia. Analogamente, algumas desvantagens que podem ser levantadas decorrem do fato de que esse indicador: demanda maior volume de documentação; pode necessitar de tempo para influenciar alguns sistemas, visto que é um

conceito relativamente novo; e encontra-se ainda em fase de consolidação em diversas áreas, como em engenharia de sistemas [9].

A Fig. 1 mostra uma ilustração esquemática sucinta dos níveis de maturidade tecnológica do Indicador TRL, segundo a representação atual adotada pela NASA, onde se observa, além das definições básicas para cada nível (texto à direita da escala central de níveis), um agrupamento que descreve o trabalho de desenvolvimento em termos gerais (texto à esquerda da escala central de níveis); esse agrupamento descritivo é útil para descrições amplas do tipo de esforço de desenvolvimento ao qual a tecnologia está sendo submetida [8]. Cabe ressaltar que o Indicador TRL mensura a maturidade tecnológica em um único eixo – o eixo da demonstração da capacidade tecnológica – isso fica evidente na representação gráfica representada na Fig. 1. Uma mensuração completa da maturidade tecnológica corresponde a uma métrica multidimensional; há referências a doze ou mais dimensões (eixos) relacionadas com a maturidade de tecnologia ou produto [6]. Apesar disso, o Indicador TRL aparenta ser o mais apropriado para o escopo deste artigo, pela sua relativa simplicidade, aceitabilidade e utilidade em relação às demais opções atualmente disponíveis.

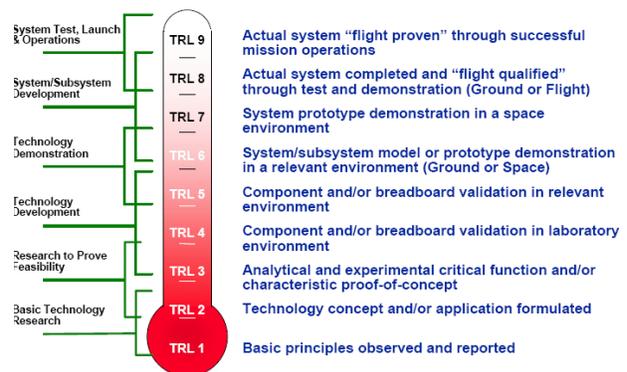


Fig. 1. Ilustração esquemática sucinta dos níveis de maturidade tecnológica do Indicador TRL. Fonte: NASA.

Os diversos níveis de maturidade tecnológica possíveis, representado pelo Indicador TRL, estão associados aos estágios iniciais do ciclo de vida tecnológico de um determinado sistema ou produto tecnológico. A associação do Indicador TRL ao ciclo de vida tecnológico de um sistema ou produto evidencia a importância do papel desse indicador no processo de gerenciamento de risco tecnológico [16]. O Indicador TRL tem sido usado primordialmente para aperfeiçoar o tempo de transição ou inserção de uma determinada tecnologia, podendo abranger desde a fase de demonstração até a fase de desenvolvimento do produto [15].

O INPE já adota o Indicador TRL nas avaliações de suas atividades atuais de P&D, bem como pretende adotá-lo também para o gerenciamento e mensuração da evolução do próprio processo de P&D [17]. O processo adotado para a realização da mensuração do Indicador TRL em cada projeto não foi explicitado nesse documento. Adicionalmente, no setor aeronáutico brasileiro, existem evidências de que a empresa EMBRAER também utiliza o Indicador TRL no processo de prospecção de seus projetos [18].

No âmbito do COMAER, a concepção de níveis de maturidade tecnológica enquadra-se perfeitamente na

descrição das fases iniciais do ciclo de vida de sistemas e materiais aeronáuticos, quais sejam: concepção, viabilidade, definição e desenvolvimento/aquisição [19].

Faz-se necessário salientar que um ponto negativo do Indicador TRL que tem sido freqüentemente enfatizado é a subjetividade de sua escala de níveis; no entanto, isso é de fato necessário, uma vez que é difícil quantificar o desenvolvimento de uma tecnologia em termos absolutos [8]. No entanto, existe uma ferramenta eficiente para auxiliar no cálculo do nível de maturidade tecnológica, a qual é apresentada e discutida a seguir.

B. *TRL calculator*

Existe uma variedade de processos usados pelo DoD e outras instituições para auxiliar no processo de quantificação do Indicador TRL. Duas abordagens merecem destaque: o *checklist* (lista de verificações) de níveis de TRL, criado pelo *Missile Defense Agency* (MDA) dos EUA, e o *TRL Calculator*, criado pelo *Air Force Research Laboratory* (AFRL) dos EUA [20]. Neste artigo, optou-se por detalhar e utilizar apenas o *TRL Calculator*, em decorrência de esse apresentar maior acessibilidade, facilidade de uso, flexibilidade e funcionalidade, em relação à outra opção.

O software *TRL Calculator* é uma ferramenta computacional gratuita, amigável ao usuário, criada para ser usada na quantificação do Indicador TRL associado a projetos de desenvolvimento tecnológico [21-23]; consiste de uma planilha eletrônica, baseada no programa Microsoft Excel®, que permite ao usuário selecionar, dentre os muitos itens descritivos (questões) relacionados aos diversos níveis do Indicador TRL, aqueles que melhor representam o estágio atual de maturidade da tecnologia sendo avaliada. Assim que os itens descritivos aplicáveis ao estágio evolutivo do projeto tecnológico em análise sejam selecionados (respondidos), o *TRL Calculator* apresenta o nível do Indicador TRL global mais apropriado. Uma vez que o mesmo conjunto de opções é apresentado a cada vez que se utiliza o *TRL Calculator*, essa ferramenta provê um processo repetível e padronizado para avaliar a maturidade de qualquer tecnologia de hardware ou software em desenvolvimento e, portanto, essa ferramenta representa um grande auxílio para o gerenciamento de risco tecnológico.

O resultado final calculado para o nível de maturidade é mostrado por meio de um sistema de convenção de cores (verde, amarelo e vermelho, assim definidos em ordem decrescente de completude de consecução dos itens descritivos) para cada nível existente, ao invés da designação de um único nível para a maturidade tecnológica (TRL-1 a TRL-9); no entanto, a cor verde indica o nível mais acreditado, devendo ser usado como o resultado principal do processo de mensuração. Essa escala de cores está associada ao grau de realização de cada item descritivo (0 a 100%), à uma visão de alto nível (*Top Level View*) do ambiente de demonstração da tecnologia, e à proporção de itens descritivos selecionados para cada nível do Indicador TRL. O critério de atribuição de uma determinada cor a um nível do Indicador TRL utiliza um algoritmo decisório específico, a fim de proporcionar um significado amplo, gradual e representativo para o nível de maturidade tecnológica. Considerando-se os parâmetros originais do *TRL Calculator*, a cor verde corresponde a 100% dos itens descritivos selecionados na íntegra; similarmente, a cor amarela

corresponde a um percentual entre 67% e 99%, e a cor vermelha a um percentual não-nulo inferior a 67%; esses valores podem ser editados pelo usuário, dentro de certas faixas de valores. O leitor pode encontrar maiores detalhes sobre as regras, algoritmos e potencialidades do *TRL Calculator* nas instruções de uso desse software [23], e nos comentários de Nolte, Kennedy e Dziegiel Junior [21,22], notando-se que estas últimas referências reportam-se a uma versão anterior desse software.

Tendo-se apresentado as informações essenciais acerca dos sensores inerciais fotônicos nacionais, bem como os conceitos e aplicações associados ao Indicador TRL, incluindo o *TRL Calculator* como software de mensuração do nível de maturidade tecnológica, têm-se, portanto, todos os elementos necessários para estimar o nível de maturidade tecnológica de cada um dos sensores inerciais fotônicos, o que é realizado a seguir.

III. NÍVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA DE SENSORES INERCIAIS FOTÔNICOS NACIONAIS

Inicialmente, reitera-se que, no âmbito aeroespacial nacional, o INPE já adota o Indicador TRL nas avaliações de suas atividades atuais de P&D [17]. Em particular, considerando-se apenas os projetos de sensores inerciais nacionais, o INPE reporta que o projeto intitulado Dispositivos Micro-Eletrônicos Mecânicos para Guiagem e Controle (DMGC) encontra-se em TRL-2, estimando que seriam necessários recursos da ordem de R\$ 500.000,00 para chegar em TRL-8, havendo, no entanto, restrição de recursos humanos disponíveis no INPE para serem alocados no programa. Adicionalmente, o projeto de um giroscópio mecânico (designado pela sigla GCG), semelhante aos giros usados no CBERS, encontra-se em TRL-3, podendo chegar, havendo disponibilidade de recursos, em TRL-6 (com testes no LIT) em 1 ano [17]. No entanto, cabe ressaltar que nenhum desses projetos de sensores inerciais do INPE utiliza tecnologia fotônica, permanecendo a lacuna de uma análise dessa natureza, a ser preenchida pelo presente artigo. Ademais, com relação às atividades e projetos desenvolvidos no âmbito da Comando da Marinha do Brasil, este artigo não identificou documentos ostensivos que permitam mensurar o nível de maturidade tecnológica dos respectivos sensores inerciais.

Enfatiza-se que grande parte das informações demandadas pelos níveis iniciais do Indicador TRL (TRL-1 a TRL-3), usualmente associadas a estudos e procedimentos teóricos relativos a sensores inerciais fotônicos, conforme demandado durante o preenchimento dos diversos itens descritivos mostrados no *TRL Calculator*, encontram-se na literatura técnica internacional e em documentos e artigos de análise situacional tecnológica [1,24-27]. Portanto, essas informações são de domínio público, necessitando apenas da existência de grupos de pesquisadores nacionais atuantes na área de sensores inerciais fotônicos, para que se caracterize o domínio tecnológico nacional correspondente. Em particular, a EFO-IEAv tem mantido grupos de pesquisadores atuantes na área de sensores inerciais fotônicos desde a década de 80 [28].

Faz-se relevante enfatizar que este artigo buscou usar dados técnicos ostensivos disponíveis na literatura técnica, e em relatórios e documentos institucionais, a fim de tornar o acesso aos resultados aqui obtidos acessíveis ao público em geral. Ratifica-se, ainda, que o objetivo precípua deste artigo

volta-se primordialmente para o uso do Indicador TRL no processo de mensuração do nível de maturidade tecnológica de sensores inerciais fotônicos nacionais, consolidando as bases para que um levantamento completo das informações referentes ao estágio de desenvolvimento em que esses se encontram possa ser realizado em trabalhos futuros.

Dessa forma, tomando-se como base as informações específicas contidas nas seções anteriores, apresentam-se a seguir os resultados da mensuração dos níveis de maturidade tecnológica dos sensores inerciais fotônicos nacionais.

A. Girômetro Fotônico de Aplicação Tática

O preenchimento dos diversos itens descritivos do *TRL Calculator* para esse caso foi realizado utilizando-se os dados específicos, diretos e indiretos, provenientes do projeto GIROMAR. As fontes de dados selecionadas são apenas as de caráter ostensivo, em virtude da natureza sigilosa dos resultados técnicos completos. Além das fontes de dados descritas anteriormente, destacam-se os dados constantes dos relatórios técnicos reportados à FINEP, via Fundação Casimiro Montenegro Filho (FCMF).

Considerou-se que os rigorosos ensaios ambientais a que esses sensores foram submetidos sejam representativos de um ambiente relevante, conforme interpretação do texto descritivo geral atribuído para o TRL-6.

A Fig. 2 mostra um resumo condensado do resultado da mensuração do nível de maturidade tecnológica dos girômetros fotônicos nacionais de aplicação tática, considerando-se os dados de preenchimento do *TRL Calculator*.

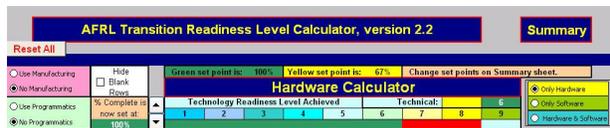


Fig. 2. Resumo condensado do *TRL Calculator* para a os girômetros fotônicos nacionais de Aplicação Tática.

Conclui-se que os girômetros fotônicos nacionais de aplicação tática encontram-se em um nível de maturidade tecnológica TRL-6 (cor verde), com poucos itens descritivos preenchidos nos níveis TRL-7 e TRL-8 (cor vermelha).

B. Girômetro Fotônico de Aplicação Estratégica

O preenchimento dos diversos itens descritivos do *TRL Calculator* para esse caso foi realizado utilizando-se os dados específicos, diretos e indiretos, provenientes do projeto SIA. As fontes de dados selecionadas são apenas as de caráter ostensivo, em virtude da natureza sigilosa dos resultados técnicos completos. Além das fontes de dados descritas anteriormente, destacam-se os dados dos relatórios técnicos reportados à FINEP, via Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP).

Os níveis TRL-1 a TRL-7 foram integralmente preenchidos; o nível TRL-9 não teve qualquer item preenchido. A Fig. 3 mostra um resumo condensado do resultado da mensuração do nível de maturidade tecnológica dos girômetros fotônicos nacionais de aplicação estratégica, considerando-se os dados de preenchimento do *TRL Calculator*. Conclui-se que os girômetros fotônicos nacionais de aplicação estratégica encontram-se em um nível de maturidade tecnológica TRL-7

(cor verde), com alguns poucos itens descritivos completos nos níveis TRL-8 (cor vermelha).



Fig. 3. Resumo condensado do *TRL Calculator* para a os girômetros fotônicos nacionais de Aplicação Estratégica.

C. Acelerômetros Fotônicos

Em virtude do fato de este artigo ter restringido a gama de acelerômetros fotônicos representativos aos projetos e trabalhos de potencial emprego em aplicações aeroespaciais de interesse do COMAER [29,30], buscou-se realizar o preenchimento dos diversos itens descritivos do *TRL Calculator* utilizando-se os dados específicos provenientes da capacidade combinada dessas duas referências.

Os níveis TRL-1 a TRL-4 foram integralmente preenchidos; os níveis TRL-7 a TRL-9 não obtiveram qualquer item preenchido. A Fig. 4 mostra um resumo condensado do resultado da mensuração do nível de maturidade tecnológica dos acelerômetros fotônicos nacionais, considerando-se os dados de preenchimento do *TRL Calculator*, concluindo-se que os acelerômetros fotônicos nacionais encontram-se em um nível de maturidade tecnológica TRL-4 (cor verde), com alguns poucos itens descritivos completos nos níveis TRL-5 e TRL-6 (ambos na cor vermelha).

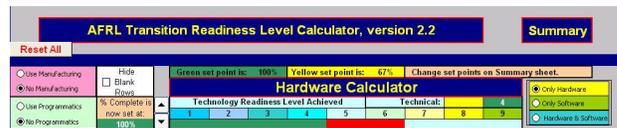


Fig. 4. Resumo condensado do *TRL Calculator* para os acelerômetros fotônicos nacionais.

IV. CONCLUSÃO

A mensuração do nível de maturidade tecnológica é uma importante ferramenta métrica para o gerenciamento de risco tecnológico e, por essa razão, de grande relevância para o correto direcionamento dos limitados recursos humanos, materiais e financeiros disponíveis para alocação nas atividades e projetos voltados para as aplicações aeroespaciais nacionais.

Este artigo buscou realizar a mensuração do nível de maturidade tecnológica de sensores inerciais fotônicos nacionais – acelerômetros e girômetros de aplicações tática e estratégica – por meio de metodologia de pesquisa do tipo exploratória, com levantamento de dados com enfoque documental e bibliográfico de caráter ostensivo. Na medida em que a metodologia, o processo e a ferramenta de mensuração do nível de maturidade tecnológica foram compreendidos, e os dados relevantes dos sensores inerciais fotônicos nacionais foram levantados, procedeu-se à realização da mensuração objetivada por este artigo. Conclui-se, por meio da mensuração realizada, que os acelerômetros fotônicos nacionais encontram-se no nível de maturidade tecnológica TRL-4, enquanto que os girômetros fotônicos nacionais, de aplicação tática e estratégica, encontram-se,

respectivamente, nos níveis de maturidade tecnológica TRL-6 e TRL-7.

Vislumbra-se que este artigo possa servir de referência para balizar futuros desdobramentos e trabalhos científicos, especialmente para aqueles voltados às diversas áreas científico-tecnológicas e de gerenciamento de riscos tecnológicos. Finalmente, enfatiza-se a alta relevância do uso de metodologias de mensuração do nível de maturidade tecnológica, aqui exemplificado pelo Indicador TRL, para as atividades e objetivos do COMAER

REFERÊNCIAS

- [1] A. Lawrence, *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control*. 2nd Edition, Springer, pp. 4-11, 1998.
- [2] V. R. Almeida, Monografia ECEMAR, *Sensores Inerciais Fotônicos para Aplicações Aeroespaciais: Nível de Maturidade Tecnológica*, CCEM 2008, UNIFA, Rio de Janeiro, 2008.
- [3] C. T. Miranda, *Desenvolvimento de Centrais Inerciais de Navegação – Uma Estratégia para o MAER*. Monografia ECEMAR, n. 4103MO01, CEM/CSC/96, UNIFA, Rio de Janeiro, 1996.
- [4] C. A. T. Moura, *Desenvolvimento de Acelerômetro a Laser – Conquistando Autonomia em Sensores Inerciais*. Monografia ECEMAR, n. 2302MO01, CCEM 1/2001, UNIFA, Rio de Janeiro, 2001.
- [5] R. C. Rabelo, *Central Inercial a Fibra Óptica – Sistema Nacional de Navegação Autônoma*. Monografia EAOAR, n. 270, CAP 1/2003, UNIFA, Rio de Janeiro, 2003.
- [6] Defence Research and Development - Canada. A Technology Maturity Measurement System for the Department of National Defence: The TML System. DRDC Atlantic CR 2005-279. 2006.
- [7] USA Department of Defense. Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook, Washington, D.C., 2005.
- [8] M. C. Largent. *A Probabilistic Risk Management Based Process for Planning and Management of Technology Development*. A Thesis presented in Partial Fulfillment of the requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Aerospace Engineering. Georgia Institute of Technology, 2003.
- [9] T. Moon, J. Smith, and S. C. Cook. Technology Readiness and Technical Risk Assessment for the Australian Defence Organisation. In: Proceedings of the Systems Engineering, Test & Evaluation Conference, SETE 2005 - A Decade of Growth and Beyond. Brisbane, Australia, 2005.
- [10] J. K. Bilbro and R. L. Sackheim. Managing a Technology Development Program. 2002. Disponível em: <[http://jbcconsultinginternational.com/Documents/Managing Technology Development LEC 12-2.doc](http://jbcconsultinginternational.com/Documents/Managing_Technology_Development_LEC_12-2.doc)>. Acesso em: 11 ago. 2008.
- [11] J. C. Mankins. Research & Development Degree of Difficulty (R&D3): A White Paper. Office of Space Flight. NASA Headquarters. 10 mar. 1998.
- [12] S. T. Sadin, F. P. Povinelli, R. Rosen. NASA Technology Push Towards Future Space Mission Systems. In: Space and Humanity Conference. Selected Proceedings of the 39th International Astronautical Federation Congress. Bangalore, Índia: Acta Astronautica, v. 20, p. 73-77, 1989.
- [13] J. C. Mankins. Technology Readiness Levels: A White Paper. Office of Space Access and Technology. NASA. 06 abr. 1995.
- [14] United States General Accounting Office. BEST PRACTICES: Better Management of Technology Development Can Improve Weapon System Outcomes, GAO/NSIAD-99-162, Washington, D.C., 1999.
- [15] C. P. Graettinger *et al.* Using the Technology Readiness Levels Scale to Support Technology Management in the DoD's ATD/STO Environments: A Findings and Recommendations Report Conducted for Army CECOM. Special Report CMU/SEI-2002-SR-027. 2002.
- [16] W. L. Nolte, N. Anderson, R. McCarty. AFRL Systems Engineering Initiative - Risk Management for Science and Technology. In: 8th Annual System Engineering Conference, 2005, San Diego. Anais eletrônicos, disponível em <<http://www.dtic.mil/ndia/2005systems/>> (acesso em: 03 ago. 2008). San Diego: NDIA, 2005.
- [17] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Roteiro de Desenvolvimento de Missões e Tecnologias Espaciais para o período 2008-2020 – Roteiro MTE: CPA-070-2008, v. 4.0 (28/06/2008). São José dos Campos, SP, 2008.
- [18] Documento disponível no endereço eletrônico: www.bndes.gov.br/conhecimento/seminario/CapitaisIntangiveis_15b.pdf.
- [19] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. Ciclo de Vida de Sistemas e Materiais da Aeronáutica: DCA 400-6. Brasília, DF, 2007.
- [20] W. S. Majumdar. System of Systems Technology Readiness Assessment. Tese de Mestrado. Master of Science in System Engineering Management. Naval Postgraduate School. Monterey. Set. 2007.
- [21] W. L. Nolte, B. C. Kennedy, and R. J. Dziegiel Junior. Technology Readiness Calculator. In: 6th Annual System Engineering Conference, 2003, San Diego. Anais eletrônicos disponível em <<http://www.dtic.mil/ndia/2003systems/nolte.ppt>> (acesso em: 03 ago. 2008). San Diego: NDIA, 2003.
- [22] W. L. Nolte, B. C. Kennedy, and R. J. Dziegiel Junior. Technology Readiness Level Calculator. In: 6th Annual System Engineering Conference, 2003, San Diego. Anais eletrônicos disponível em <<http://www.dtic.mil/ndia/2003systems/nolte2.pdf>> (acesso em: 03 ago. 2008). San Diego: NDIA, 2003.
- [23] W. L. Nolte. TRL Calc Ver 2_2.zip. Disponível em <<https://acc.dau.mil/CommunityBrowser.aspx?id=25811&lang=en-US>> (acesso em: 06 ago. 2008). Version 2.2. 2004.
- [24] W. K. Burns (Ed.). Optical Fiber Rotation Sensing. London: Academic Press, 1993.
- [25] Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE. Tecnologia Inercial no Brasil 2007-2010: a rota para seu estabelecimento na indústria. Brasília, DF: CGEE, dez. 2006.
- [26] H. C. Lefevre, The Fiber-Optic Gyroscope. Norwood: Artech House Publishers, 1993.
- [27] North Atlantic Treaty Organisation - NATO. Research and Technology Organisation (RTO) of NATO. Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO EDUCATIONAL NOTES, RTO-EN-SET-064, 2004.
- [28] Comando da Aeronáutica. Instituto de Estudos Avançados. EFO-S: Subdivisão de Sensores a Fibra Óptica. Disponível em: <http://www.ieav.cta.br/efo/efo_S.php> (acesso em: 18 jul. 2008). 2008.
- [29] R. M. Cazo, "Six Degree Freedom Optical Fiber Accelerometer". In: 1st Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications. Artigo aceito para apresentação. São Pedro, SP, ago. 2008.
- [30] S. R. K. MORIKAWA, *Acelerômetro Triaxial a Redes de Bragg*. Tese de doutorado. 2004, 109 p. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro, 31 maio 2004.