

Nível de Maturidade Tecnológica: uma sistemática para ordenar tecnologias

Sérgio Roberto Knorr Velho¹, Marcos Leandro Simonetti², Carlos Roberto Pinto de Souza³ e Márcio Yoshiro Ikegami⁴

Resumo

A tecnologia, desde o momento em que é criada ou conceitualizada, necessita passar por diversas etapas de evolução, até a sua plena operação, de modo que esteja pronta para o uso ou a comercialização. O Nível de Maturidade da Tecnologia (NMT) é uma sistemática métrica, com nove etapas, desenvolvida pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) [Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos] em 1974 e que permite ordenar as novas tecnologias, com os objetivos fundamentais de possibilitar a comparação com

Abstract

The technology since the time it was created or conceptualized can evolve until it is ready for use or sale, as it needs to go through several levels from concept to its full operation. The Technology Readiness Level (TRL) is a systematic metric, with nine levels, developed by NASA since 1974, which allows you to sort the new technologies with the ultimate goal of understanding the current state of the same, perform the comparison with other technologies, to support resource development

- 1 Mestre em Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Engenheiro Químico pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) e Bacharel em Ciências Contábeis pela UFRGS. Especialista em Administração da Produção e em Engenharia de Segurança do Trabalho. Tecnologista Pleno no Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC).
- 2 Engenheiro mecânico pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho e mestre em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Tem experiência na área de Engenharia Produção, com ênfase Automação de Montagem Estrutural Aeronáutica. Atua na Embrapii.
- 3 General de Brigada R1 do Exército Brasileiro, mestre em Altos Estudos Militares pela Escola de Comando e Estado Maior do Exército (Eceme). Atua junto ao MCTIC.
- 4 Engenheiro de Produção pela Universidade de São Paulo (USP) e pós-graduado em Administração de Empresas pela Fundação Getúlio Vargas de FGV de São Paulo. Gerente do Departamento de São Paulo da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep).

outras e de facilitar o entendimento sobre o estágio atual de desenvolvimento, além de sustentar decisões de fomento de recursos para a inovação e aquelas relacionadas à transição da tecnologia.

decisions for innovation and support decisions related to the transition of technology.

Palavras-chave: Tecnologia. Maturidade tecnológica. Métrica. Inovação.

Keywords: *Technology. Readiness. Metric. Innovation.*

1. Introdução

A tecnologia não “nasce” pronta para uma aplicação imediata, pois se tem, no início, apenas uma ideia de seu possível emprego. Após, há um desenvolvimento dinâmico e em curso da tecnologia para customizá-la ao seu emprego. Imagine o desenvolvimento da roda, que teve início a partir do deslocamento de pedras sobre troncos, até o sistema atual, de eixo, rolamentos e pneu. O propósito foi do deslocamento de materiais e pessoas até o movimento de máquinas, como os moinhos. Desde que uma nova tecnologia é inventada ou concebida, ela deve estar sujeita a experimentação, simulação, refinamento, prototipagem e ensaios de desempenho, até que a mesma esteja preparada para o uso e a comercialização. Há setores e produtos regulamentados que visam a informar e proteger o consumidor no que diz respeito à saúde, segurança e ao meio ambiente e que também contam com esses níveis de maturidade da tecnologia claramente delimitados, descritos e normalizados.

Assim, há vários níveis que a tecnologia deve superar até fazer parte de sistemas ou subsistemas e ser utilizada com segurança no mercado. Atualmente, há um claro foco na comercialização dos resultados das pesquisas. O Nível de Maturidade Tecnológica⁵ (NMT) é uma sistemática métrica utilizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) [Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço], agência espacial americana, originada inicialmente com sete níveis, por Stan Sadin, em 1974 (BANKE, 2010), que permite avaliar, em um determinado instante, o nível de maturidade de uma tecnologia particular e, em uma comparação consistente de maturidade entre diferentes tipos de tecnologia, todo o contexto de um sistema específico, sua aplicação e seu ambiente operacional (MANKINS, 1995). Muitas vezes, um mesmo componente, para aplicações distintas, possui diferentes NMT. Essa métrica tem sido adotada por diversas

5 Nível de Maturidade Tecnológica foi traduzido da expressão em Inglês Technology Readiness Level (TRL).

instituições no Brasil, como a Associação Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii), o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), entre outras, com o objetivo de identificar se o projeto é aderente às etapas que são apoiadas por essas instituições e como indicador de que o recurso utilizado efetuou um avanço nos níveis da tecnologia.

Este artigo pretende apresentar e discutir esse sistema métrico, aperfeiçoado pela NASA com nove níveis, de modo que possa ser utilizado por coordenadores de projetos de inovação, pois, uma vez definido o NMT, é possível elaborar um planejamento adequado, com uma melhor definição de escopo, prazos e riscos envolvidos para cada nível e, principalmente, quais os recursos necessários, com foco na viabilidade do produto ou processo. A utilização crescente da ferramenta permite aos tomadores de decisão executar benchmarking, gerenciar riscos e deliberar sobre financiamento para prever quando lançar uma tecnologia ou produto no mercado.

A Organização de Padrões Internacionais [do Inglês, *International Organization for Standardization* (ISO)] dispõe de uma norma, a ISO 16290:2013, que trata da definição de Nível de Maturidade Tecnológica e de seu critério de avaliação para sistemas espaciais e operações. O escopo da norma prevê sua aplicação primariamente a sistemas de hardware espaciais, mas as definições podem ser usadas em um domínio mais abrangente.

Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) (BRASIL, 2014) o Nível de Maturidade Tecnológica é definido como: *“Um sistema de medição e uma métrica sistemática empregada na avaliação da maturidade de uma tecnologia particular, assim como na comparação da maturidade de diferentes tipos de tecnologias, ou seja, trata-se de um avaliador do nível de maturidade de uma tecnologia.”*

É, segundo Whelan (2008), um modelo para uma linguagem comum, com o objetivo de quantificar a maturidade de uma tecnologia ou, ainda, um *framework* para avaliar tecnologias que gerem grande potencial de riscos, quando de sua inclusão em um programa novo ou já existente.

2. Os níveis de maturidade tecnológica

O NMT reúne, em sua métrica, nove níveis escaláveis de maturidade da tecnologia, como exposto na Tabela 1, sendo o mais baixo o primeiro e o mais alto o nono. Cada setor econômico apresenta sua especificidade na definição dos níveis tecnológicos. Setores fortemente regulados apresentam etapas tecnológicas mais definidas e somente se avança para a etapa posterior com evidências cumpridas no nível anterior. Assim, o tempo e o esforço para mover-se de um nível de NMT para outro são dependentes da evolução da tecnologia, podendo ser mais longos e difíceis quando se comparam projetos diferentes. A experiência demonstra que podem variar muito de acordo com o produto ou sistema a ser considerado (ISO 16290:2003). Por exemplo, (Figura 1): o nível dos testes clínicos em seres humanos, com novas moléculas de fármacos, somente pode ocorrer se os estudos não-clínicos, em modelos *in vitro* e/ou *in vivo*, em animais de experimentação, tiverem sido realizados, com avaliação do potencial mínimo de toxicidade e observação sobre a ocorrência de carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade (ANVISA, 2013). Assim, a escala NMT é uma ferramenta apropriada para a avaliação do status da maturidade tecnológica em um determinado momento e não oferece, entretanto, indicação do esforço ou custo a ser despendido para alcançar o próximo nível (ISO 16290:2003).

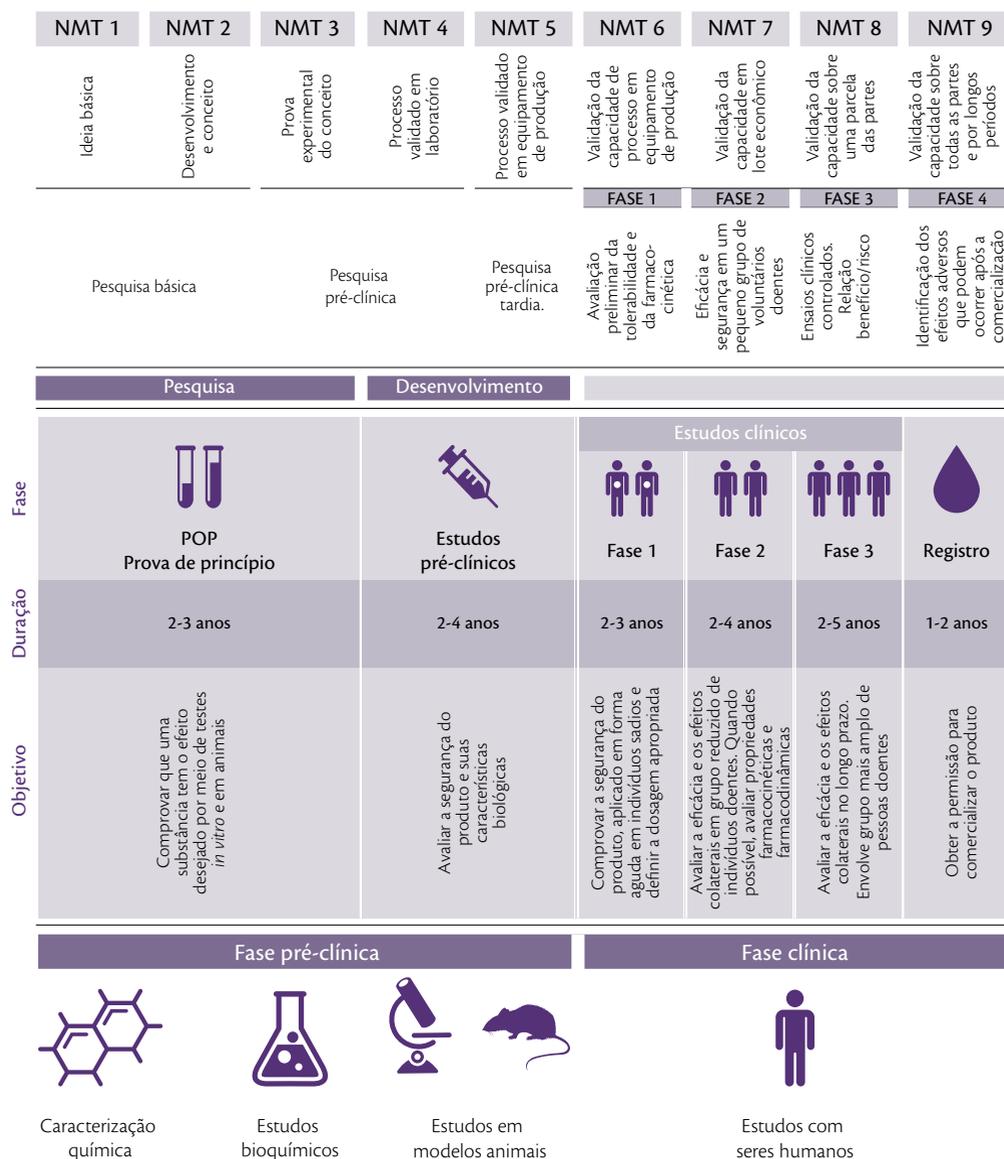


Figura 1. Exemplo do uso do NMT para o desenvolvimento de fármacos.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 1. Níveis de Maturidade Tecnológica

	NMT	Descrição	Evidência Objetiva
1	Princípios básicos observados e descritos	Nível mais baixo da maturidade da tecnologia. Neste nível, inicia-se a pesquisa científica por meio da observação de fenômenos e do desenvolvimento de princípios. Exemplos: estudos das propriedades básicas dos materiais; descoberta dos Raios-X.	Artigos científicos publicados que identificam princípios da tecnologia ou conceito.
2	Conceito tecnológico ou formulação da aplicação	Início da atividade inventiva. Uma vez que princípios físicos foram observados, aplicações práticas dessas características podem ser inventadas ou identificadas. A aplicação ainda é especulativa, não há ensaio experimental ou análise detalhada para suportar a conjectura. Exemplo: estudos analíticos; o conceito de usar o efeito fotoelétrico para construir geradores de células solares.	Publicações ou outras referências de aplicações que fornecem análise para sustentar o conceito.
3	Função crítica analítica e experimental ou teste do conceito	Início da atividade de pesquisa e desenvolvimento, incluindo estudos investigativos e laboratoriais para validar fisicamente se as previsões analíticas estão corretas. Validação do teste de conceito das aplicações formuladas no NMT 2. Exemplo: a integração de novos componentes que não existiam previamente; princípio do sistema de injeção de um motor de propulsão química usando O ₂ e H ₂ é demonstrado em um teste de conceito.	Resultados de testes laboratoriais executados para medição de parâmetros e comparação das previsões analíticas formuladas. Referências de quem, onde e quando esses testes e essas comparações foram executados.
4	Validação laboratorial de componente ou placa de ensaio ("breadboard")	Sucessão da etapa anterior, do teste de conceito, onde os elementos tecnológicos básicos são integrados para funcionarem juntos, habilitando o desempenho de um componente, ou de uma placa de ensaio, ou da matriz de contato. Essa validação de "baixa fidelidade" deve suportar o conceito formulado anteriormente e também ser consistente com os requisitos das potenciais aplicações do sistema. Exemplo: ensaio de algoritmos correspondentes a uma função; protótipo de motor de propulsão química de dois líquidos tem seu desempenho demonstrado em um ambiente laboratorial pressurizado.	Conceitos dos sistemas que foram considerados e resultados dos testes das placas de ensaio. Referências a quem fez e quando.
5	Validação do componente ou da placa de ensaio em um ambiente de simulação	Os componentes tecnológicos básicos podem ser integrados com elementos reais e testados em um ambiente de simulação. Incluem integração de alta fidelidade de componentes em laboratório. Exemplos: um novo tipo de material, com melhores características, é utilizado numa determinada aplicação simulada; a demonstração do gerenciamento do propelente para foguetes, com estágios, é conseguida no solo, ainda na escala de protótipo.	Resultados laboratoriais da integração de componentes, inclusive os de suporte, em ambiente de simulação. Modelos volumétricos ou <i>mock-ups</i> .

	NMT	Descrição	Evidência Objetiva
6	Modelo do sistema ou demonstração de protótipo em um ambiente de simulação	Modelo representativo ou sistema do protótipo testado em um ambiente laboratorial de alta fidelidade ou ambiente operacional simulado, que pode ser real. Nem todas as tecnologias são submetidas a esse NMT, pois, a partir desse ponto, a maturação tecnológica é dirigida mais pelo gerenciamento da avaliação da conformidade do que pelos requisitos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Exemplo: a demonstração do gerenciamento de propelente, descrito no estágio NMT 5, é testada na escala real e em gravidade zero, com voos parabólicos.	Demonstração bem sucedida do protótipo em um ambiente laboratorial de alta fidelidade. Resultados do protótipo estão próximos da configuração desejada em termos de desempenho, peso, volume, etc.
7	Demonstração do protótipo em um ambiente operacional	O protótipo deve estar próximo ou na escala do sistema operacional planejado e a demonstração deve ocorrer em um ambiente operacional previsto. Pretende-se assegurar a confiança na engenharia e de gestão do sistema, por meio da validação. Este nível é importante para sistemas ou componentes críticos ou de alto risco. Exemplos: confirmação do funcionamento de um componente em um ambiente específico (alto vácuo); veículos lançadores (foguetes) são testados após o primeiro voo, para verificação do desempenho.	Demonstração bem sucedida do protótipo em um ambiente operacional. Relato de quem executou os ensaios, quando, onde e, a análise crítica dos dados observados.
8	Sistema atual pronto e qualificado por meio de ensaios e demonstrações	A tecnologia foi testada como viável em sua forma final e sob determinadas condições. Os objetivos, o ambiente operacional e os requisitos de desempenho estão estabelecidos e acordados entre os interessados. Ensaios de avaliação da conformidade do sistema ou produto foram executados com sucesso. Pode incluir a integração de uma nova tecnologia num sistema existente. Todas as tecnologias aplicadas passam por esse nível, que representa a fase final do desenvolvimento do sistema para a maior parte dos elementos tecnológicos. Exemplo: teste de um novo algoritmo de controle num computador que monitora um sistema.	Resultados de ensaios do sistema ou produto em sua configuração final, sob a variação das condições operacionais onde vai funcionar. Resultados de ensaios da avaliação da conformidade do produto.
9	Sistema atual aprovado com sucesso em missões operacionais.	Por definição, todas as tecnologias a serem aplicadas nos sistemas atuais passam por esse nível. Os objetivos, o ambiente operacional e os requisitos de desempenho estão estabelecidos e acordados entre os interessados, levando em conta a integração em todo o sistema. Aplicação atual da tecnologia em sua forma final e sob condição de sua missão operacional. Pode incluir a integração da nova tecnologia em sistemas já existentes. Não inclui melhorias planejadas de produtos já existentes ou sistemas em reuso.	Resultados de ensaios operacionais e de conformidade do sistema ou produto.

Fonte: Adaptada de Mankins, 1995 e Gil et al., 2014.

Essa sistemática métrica NMT já está consolidada no Departamento de Defesa Americano (DoD). Por sua vez, o Ministério da Defesa (MD) brasileiro, por meio de estudos conduzidos pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), vem desenvolvendo essa métrica de análise da maturidade para seus projetos estratégicos, com o objetivo de minimizar riscos e estimar os recursos necessários, até que a tecnologia esteja pronta para o seu pleno uso operacional em sua missão (CGEE, 2016). A sistemática também tem sido recomendada e utilizada em diversas iniciativas de fomento à inovação, como no Programa da Comunidade Europeia, *Horizon 2020* e, no Brasil, vem sendo desenvolvida e colocada em uso em projetos como os fomentados pela Embrapii. Como benefícios dessa sistemática, podem ser destacados (DAWSON, 2007):

- Facilidade de entendimento comum sobre o status atual da tecnologia para uma determinada aplicação;
- Comparação de tecnologias em seus estágios atuais (instantâneo);
- Gerenciamento de riscos;
- Tomada de decisões relacionadas ao financiamento da tecnologia;
- Tomada de decisões relacionadas à transição da tecnologia;
- Avaliação métrica da maturidade do programa de tecnologias de projetos, antes que o seu desenvolvimento se inicie.

Mankins (1995) cita que, para ser utilizado e até melhor entendido, o modelo pode agrupar 6 níveis:

- a) Pesquisa básica em novas tecnologias e conceitos, almejando identificar metas, mas não sistemas específicos. Inclui os níveis 1 e 2 (Figura 2).
- b) Desenvolvimento focado de tecnologia, abordando tecnologias específicas para uma ou mais aplicações potenciais identificadas. Pesquisa para provar a viabilidade da tecnologia. Inclui os níveis 2 a 4 (Figura 2).

6 Esse conceito de agrupar diversos níveis de NMT é utilizado por diversas organizações, com diferença de estágios. A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) distingue, por exemplo, quatro estágios de pesquisa: Pesquisa Básica (NMT 1-3); Desenvolvimento (NMT 3-5); Demonstração (NMT 6-7); e Implantação Antecipada (NMT 8-9) (EARTO, 2014).

- c) Desenvolvimento tecnológico e demonstração para cada aplicação específica, antes de iniciar o pleno desenvolvimento de sistema dessa aplicação. Inclui os níveis 3 a 7 (Figura 2).
- d) Desenvolvimento de sistema por meio da primeira unidade de fabricação. Inclui os níveis 6 a 9 (Figura 2).
- e) Lançamento do sistema ou produto e operação (comercialização). Inclui os níveis 8 e 9 (Figura 2).

A transição entre níveis, ou seja, a “fronteira” entre os mesmos, muitas vezes não está bem definida e pode variar, principalmente em setores onde as etapas de certificação de produto e seu desenvolvimento não estão ainda bem definidos. Temos que considerar, ainda, a possibilidade de recuo nos níveis, pois, mesmo os mais altos requerem pesquisa adicional (EARTO, 2014).

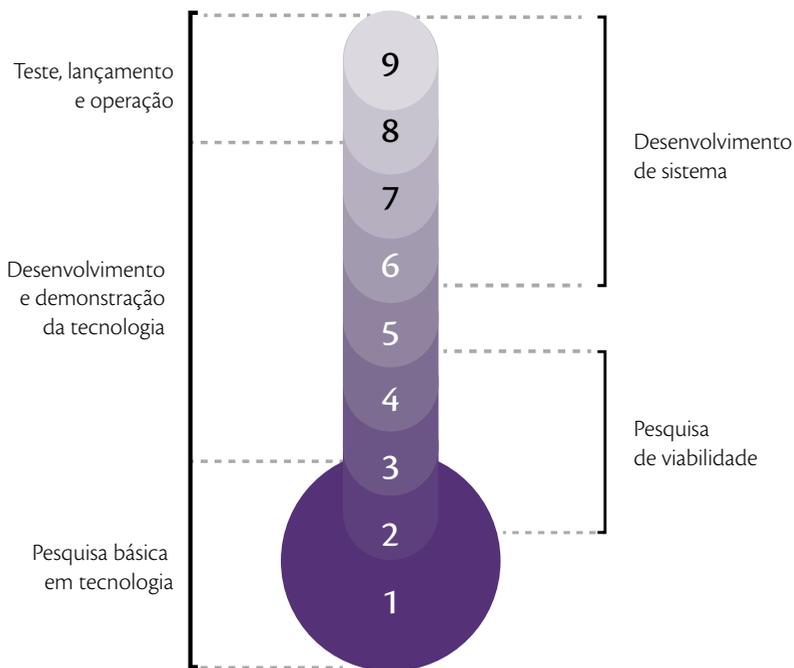


Figura 2. Níveis de Maturidade da Tecnologia

Fonte: Adaptado de <<http://web.archive.org/web/20051206035043/http://as.nasa.gov/aboutus/trl-introduction.html>>.

A métrica NMT afere a maturidade num determinado momento, ao longo de um único eixo, o da capacidade de demonstração da tecnologia (GIL *et al.*, 2014). Há várias adaptações da ferramenta para setores⁷ distintos, com pequenas diferenças na descrição dos estágios, deixando os níveis mais claros para os coordenadores de projetos.

Descrever apenas uma métrica para a tecnologia não garante que a mesma chegará ao mercado para atender a uma demanda de cliente. Portanto, é pertinente que existam outras métricas, como o Nível de Maturidade da Inovação (NMI)⁸, de Tao *et al.*, (2010), e o Nível de Maturidade de Fabricação (NMF), desenvolvido pelo Departamento de Defesa Americano (DoD). Assim, é levada em conta mais de uma dimensão para avaliar os projetos e sua maturidade frente à tecnologia e à manufatura.

O modelo de métrica de NMI considera que o ciclo de vida da inovação tem duas fases: o desenvolvimento tecnológico (NMI 1-3) e a evolução mercadológica (NMI 4-6). O modelo utilizado para o gerenciamento de inovações incrementais considera cinco aspectos chave descritos da seguinte forma:

- a) Tecnologia: é o processo pelo qual os homens modificam a natureza para satisfazer suas necessidades e desejos, incluindo a infraestrutura e o conhecimento necessários para o projeto (*design*), a manufatura, a operação e o reparo de produtos/sistemas tecnológicos;
- b) Mercado: refere-se a grupos de consumidores ou organizações interessados na inovação tecnológica ou no produto e que possuem os recursos e a permissão, por lei ou regulamento, para adquiri-lo;
- c) Organização: corresponde às partes da organização envolvidas no processo de inovação;
- d) Parcerias: dizem respeito à gama de relacionamentos interorganizacionais, como fornecedores, revendedores e parceiros de pesquisa;
- e) Risco: trata-se de um conceito combinado que demonstra o impacto potencial negativo na inovação no nível do negócio.

⁷ Por exemplo, o Departamento de Energia dos EUA utiliza um processo semelhante, denominado Technology Readiness Assessment (TRA), mas também com nove níveis, onde aspectos de biotecnologia e energia são incluídos (EARTO, 2014).

⁸ Nível de Maturidade da Inovação foi traduzido da sigla em Inglês Innovation Readiness Level (IRL).

Esse modelo de Nível de Maturidade da Inovação, como representado na Figura 3, levou em consideração seis níveis, nos cinco aspectos apresentados, sendo os mesmos descritos como: NMI 1 – Conceito (equivalente aos NMT 1-3); NMI 2 – Componentes (equivalente aos NMT 4-6); NMI 3 – Realização (equivalente aos NMT 7-9); NMI 4 – Mercado, referente aos desafios e dificuldades quando a inovação é introduzida no mercado pela primeira vez; NMI 5 – Competição, referente à fase madura do mercado, quando alcança o estado de equilíbrio em razão da ausência do crescimento significativo da inovação; e NMI 6 – Mudança ou obsolescência, referente a renovação da tecnologia, inauguração de novos mercados, transformação do modelo de negócio e reinvenção para perseguir e desenvolver uma vantagem competitiva ou, ainda, o abandono e a obsolescência da inovação.

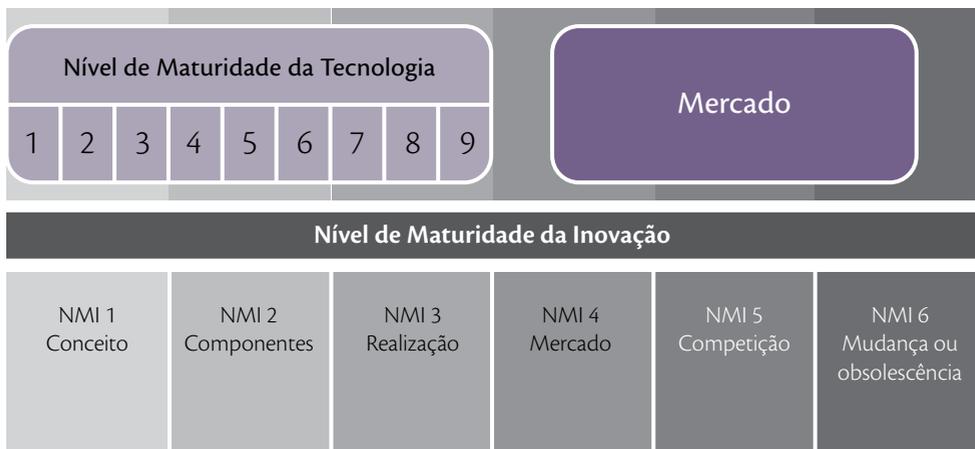


Figura 3. Entrelaçamento entre o Nível de Maturidade da Inovação e Nível de Maturidade da Tecnologia.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Por sua vez, o Nível de Maturidade de Fabricação (NMF) foi descrito pelo Escritório de Contabilidade do Governo dos Estados Unidos (EUA) [*Government Accountability Office (GAO)*], instituição equivalente à Controladoria-Geral da União (CGU) do Brasil, atualmente Ministério da Transparência e Controladoria-Geral da União, como a melhor prática para melhorar os resultados de aquisições. O modelo foi desenvolvido para avaliar a maturidade de fabricação do Programa de Armamentos e é centrado no conceito de conhecimento dos esforços de desenvolvimento de novos produtos ou armamentos, incluindo as seguintes análises: de maturidade tecnológica, de maturidade de projeto (*design*) e de maturação da produção (Figura 4).

Dessa forma, quando a tecnologia é madura, significa que deve atender aos requisitos essenciais do produto e ser demonstrada em atividade em seu ambiente operacional (NMT 9) e isso requer combinação com os requisitos do cliente. Nesse cenário, o projeto (*design*) é confiável, denotando que as revisões de análise crítica deste foram atendidas e as melhores práticas sugerem um nível de atendimento de 90% dos sistemas inicialmente previstos. O processo de produção está maduro, indicando que todos os processos de manufatura estão sob controle estatístico (MRL *Guide*, 2007).

O NMF é, portanto, um modelo métrico da aptidão para adquirir capacidade operacional referente a manufatura, produção, garantia da qualidade e funções industriais que satisfazem as necessidades e os desejos do cliente.

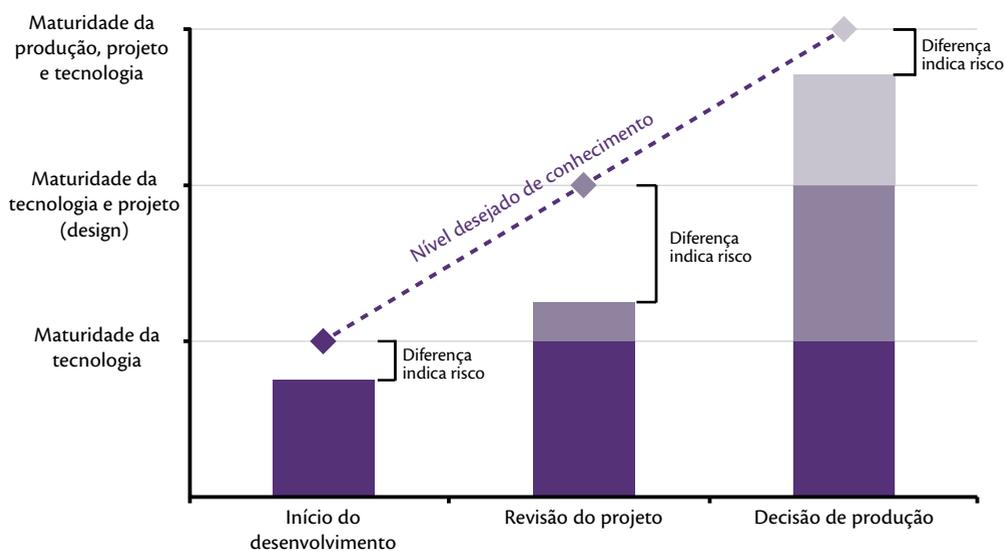


Figura 4. Obtenção do conhecimento do produto

Fonte: Adaptado do MRL *Guide*, 2007.

O relatório sobre os resultados de 2013 do Programa de Formação de Recursos Humanos em Áreas Estratégicas (RHAÉ)⁹ infere que as micro, pequenas e médias empresas (MPME) buscam

9 O Programa RHAÉ foi criado em 1987, em uma parceria do MCTIC e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Desde 2007, é destinado à inserção de mestres e doutores em empresas privadas, preferencialmente de micro, pequeno e médio porte. O Programa utiliza um conjunto de modalidades de bolsas de fomento tecnológico, especialmente criado para agregar pessoal altamente qualificado em atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nas empresas, além de formar e capacitar recursos humanos que atuem em projetos de pesquisa aplicada ou de desenvolvimento tecnológico. Fonte: <<http://cnpq.br/apresentacao-rhae>>.

desenvolver projetos de inovação onde essas iniciativas são mais incrementais e de menor risco, deixando as atividades de pesquisa básica (NMT 1 a 3) para serem desenvolvidas, prioritariamente, pelas universidades e pelos institutos de ciência e tecnologia (TEIXEIRA e MENEZES, 2014). Esse problema surge porque empresas geralmente decidem investir na inovação fazendo uma comparação de seus benefícios prováveis com os riscos de seu investimento. Assim, definiu-se como “Vale da Morte” a fase de demonstração e escalonamento pré-competitivo, ou seja, NMT de 4 a 7, onde o projeto de desenvolvimento tecnológico ainda apresenta riscos tecnológicos altos e necessita receber investimentos mais vultosos para transformar um conceito laboratorial (NMT 3) em um protótipo operacional (NMT 7). Nessa mesma fase, o projeto também precisa demonstrar que atende aos critérios de viabilidade econômica, praticabilidade funcional e desejabilidade por parte dos clientes para chegar ao mercado (GULBRANDSEN, 2009 e BROWN, 2010).

3. A experiência europeia no financiamento de projetos que utilizam a métrica NMT

A Comissão Europeia iniciou seu maior programa de pesquisa e inovação, o *Horizon 2020*, com financiamento de € 80 bilhões, por sete anos (2014 a 2020). O programa foca em seis desafios ou temas amplos: (i) saúde, alteração demográfica e bem-estar; (ii) segurança alimentar, agricultura sustentável, pesquisa marinha e marítima e bioeconomia; (iii) energia segura, limpa e eficiente; (iv) transporte inteligente, verde e integrado; (v) ação climática, eficiência de recursos e matérias-primas; e (vi) sociedades seguras, inclusivas e inovativas. Esse programa tem um instrumento para pequenas e médias empresas (PME), o *SME Instrument*, com cerca de € 3 bilhões de financiamento para o desenvolvimento de ideias inovadoras em produtos, processos ou serviços que estão prontos para enfrentar a competição global. Os projetos apoiados nesse instrumento - sob um projeto piloto de € 100 milhões, aberto no início de janeiro de 2015 - devem alcançar um NMT 6, no mínimo ou o equivalente, referente a inovações não tecnológicas, para receber o apoio do financiamento em até 6 meses (EUROPEAN COMMISSION, 2014). Os instrumentos oferecidos são:

- subvenção da inovação, de € 50.000 (70% do total do projeto), para propostas de avaliação da viabilidade (fase I, Figura 5), isto é, para financiamento das atividades de avaliação de risco; estudo de *design* ou mercado; e exploração da propriedade intelectual. Tais propostas devem ter como último propósito a colocação de novo produto, serviço ou processo no mercado, possibilitado por meio da aplicação inovativa de tecnologias existentes, metodologias ou processos de negócios. A entrega dessa fase corresponde a

um estudo de viabilidade (técnica e comercial), incluindo um plano de negócios. Essa fase tem duração de até 6 meses ou até o recebimento do apoio financeiro.

- subvenção da inovação, de € 500 mil a € 2,5 milhões (70% do total do projeto), com propósitos de desenvolvimento e demonstração (fase II, Figura 5), isto é, para financiamento de atividades de prototipagem; miniaturização; escalagem (*scale-up*); *design*; verificação do desempenho; ensaios e testes; demonstração; desenvolvimento de linhas piloto; e validação para replicação mercadológica; além de outras ações que proporcionem inovação voltada à maturação do investimento para uso do mercado.
- consultoria livre de taxas e opcional para as fases I e II, para apoiar a capacidade da empresa inovar, além de ajudar a alinhar a estratégia do projeto com as necessidades do negócio.
- acesso a diversos serviços de suporte à inovação e facilidade de acesso ao financiamento de risco (fase III, Figura 5) para promover a exploração comercial da inovação.

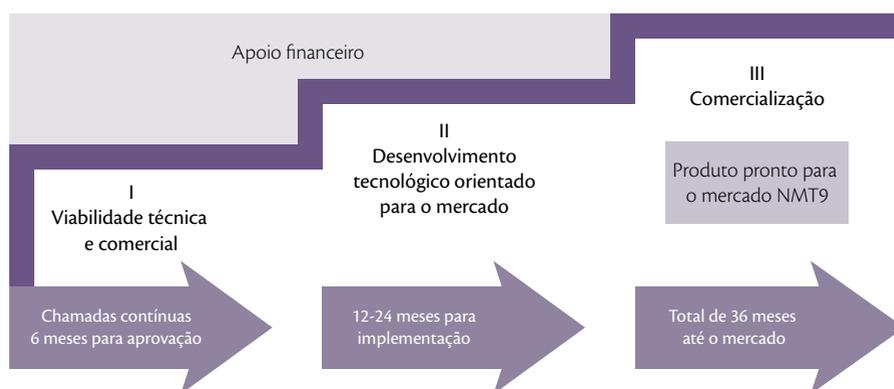


Figura 5. Escala do Projeto Piloto SME Instrument do programa europeu Horizon 2020

Fonte: Adaptado de EARTO, 2014.

As regras de auxílio do Estado Europeu (*European State Aid Rules*) fazem uma distinção entre diferentes atividades e intensidades de financiamento, estabelecendo que a pesquisa básica deve receber 100% de financiamento; a pesquisa industrial, 50%; e, o desenvolvimento experimental, 25%. Pode haver, ainda, distinção do suporte recebido impactando no nível do apoio financeiro, por exemplo, nos casos de grande empresa, PME e atividades cooperativas (EARTO, 2014). Assim, infere-se que é maior a participação do governo no financiamento de projetos nos estágios iniciais do NMT, enquanto é maior a participação da empresa nos estágios finais da métrica do

NMT. Isso leva a uma preocupação de construir pontes sobre o “Vale da Morte” (NMT de 4 a 7), onde há a necessidade crescente de recursos para projetos demonstradores e os riscos, como a viabilidade econômica, ainda são altos.

É importante acrescentar que as empresas de base tecnológica¹⁰, por suas características, apresentam muitos projetos nas fases iniciais de NMT e conseguem alguma reserva de mercado devido às patentes depositadas. Essas empresas, entretanto, necessitam evoluir rapidamente para aproveitar as janelas de oportunidade dadas pelo mercado. Desse modo, outra dimensão métrica é utilizada em conjunto com a NMT, ou seja, o Nível de Maturidade da Manufatura (NMF), tendo em vista a necessidade de evolução do produto nos níveis de maturidade na produção.

4. Exemplos de classificação do NMT

Para melhor entendimento, são citados, neste item, alguns exemplos de uso da sistemática do NMT. O primeiro, mencionado por Ilas (2013), diz respeito ao desenvolvimento da tecnologia da memória flash.

a) O desenvolvimento da memória flash

A memória flash é um tipo de dispositivo de armazenamento de dados eletrônicos que permite que múltiplos endereços sejam eletricamente apagados e reprogramados numa só operação e que, além disso, preserva o seu conteúdo sem a necessidade de fonte de alimentação, sendo utilizado em cartões de memória, flash drives USB (pen drives), tocadores de MP3, câmeras digitais, celulares, etc (WANG *et al.*, 2016). O conceito foi inventado por Masuoka, quando trabalhava para a Toshiba, durante o período de 1980 a 1984 (IEEE Spectrum, 2017). Essa fase correspondeu aos NMT de 1 a 3, até que ele conseguiu criar um chip de prova de conceito como uma indicação de que a tecnologia poderia funcionar. Um protótipo de chip com uma funcionalidade básica foi apresentado no Encontro Internacional de Desenvolvedores de Eletrônicos, em São José (EUA), em 1984, correspondendo ao NMT de 5 ou 6. Como sabido, diversas empresas se mostraram interessadas e a Intel investiu significativamente para reproduzir o conceito e especialmente para melhorar a tecnologia, de modo a torná-la mais manufaturável e acessível. Nesse caso, os NMT

¹⁰ Empresa de qualquer porte ou setor que tenha na inovação tecnológica os fundamentos de sua estratégia competitiva. Fonte: <http://download.finep.gov.br/politicaOperacional/politica_operacional_completa2012_2014.pdf>.

de 5 a 8 não diferenciam o ambiente no qual a tecnologia é aplicada ou testada, mas seu nível de desempenho, reprodutibilidade, custo e sua confiabilidade em diferentes protótipos, que são, no exemplo descrito, testes de chips. O NMT 8 corresponde, aqui, à qualificação da tecnologia, ou seja, o último passo antes que o chip possa ser homologado e produzido com a nova tecnologia. Finalmente, a Intel projetou um produto de memória (NOR flash) utilizando a tecnologia e o introduziu no mercado em 1988, validando, assim, a tecnologia, e movendo-a para o NMT 9. A Toshiba, por seu lado, trabalhou na criação de uma nova versão de memória flash, a NAND. O desenvolvimento de protótipos e testes ocorreu no período de 1986 a 1989 e a nova tecnologia foi anunciada em 1989. Durante o início da década de 90, diversas empresas lançaram produtos utilizando a memória flash, mas houve necessidade de adaptação de novos protótipos para outras diversas aplicações que envolveram os NMT de 4 a 9.

Esse é um bom exemplo da necessidade de rapidez na evolução entre os níveis NMT quando a prova de conceito (NMT 3) é superada e apresenta fortes indícios de funcionalidade. A NAND flash utiliza um tipo de lógica diferente para desempenhar operações de leitura e deleção, é mais rápida e fácil para executar, entretanto não permite o acesso randômico a locais de memória, restringindo, assim, sua aplicação. A propriedade intelectual apresenta uma possibilidade de reserva de mercado, mas Illas (2013) não faz referência a esse caso.

b) Qual o nível de NMT apresentado por um projeto de desenvolvimento de sistema de realidade virtual para simulação de colhedora de cana-de-açúcar e trator transbordo, com possibilidade de ambiente interativo multiusuário destinado a treinamento de operadores e condutores?

Infere-se que seja o NMT 6, pois corresponde ao desenvolvimento de um modelo representativo ou sistema do protótipo testado ainda em um ambiente de simulação. A evidência objetiva desse nível é a demonstração bem-sucedida do protótipo em um ambiente simulado. A realidade virtual e os sistemas de simulação para motoristas de automóveis já são conhecidos e, assim, os níveis de maturação da tecnologia também já estão mais avançados.

- c) Qual o nível de NMT apresentado por um projeto de aplicações inovadoras baseadas em tecnologias de georreferenciamento, internet das coisas e big data, interoperáveis por meio de protocolos e padrões abertos?

Inferese que seja o NMT 3 - função crítica, analítica e experimental ou teste do conceito -, pois consolida-se, nessa fase, o início ativo da Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), incluindo estudos analíticos e de bancada para validar fisicamente se as previsões analíticas do sistema estão corretas. A internet das coisas [do Inglês, *Internet of Things (IoT)*] está evoluindo como uma revolução tecnológica que representa o futuro da computação e da comunicação, cujo desenvolvimento depende da inovação técnica dinâmica em campos tão importantes como as redes de sensores wireless, as etiquetas de identificação por radiofrequência [do Inglês, *Radio-Frequency Identification (RFID)*] e a eletrônica embarcada. Muitas dessas tecnologias já estão disponíveis e maduras (NMT 9), mas a integração das mesmas em um único sistema pode ainda nos levar ao teste de conceito (NMT 3). A evidência objetiva desse nível são os resultados de testes de bancada executados para medição de parâmetros e comparação das previsões analíticas formuladas.

Verifica-se que não há facilidade no uso da métrica sem o conhecimento profundo do projeto e da concretude das evidências que determinam o nível de maturidade tecnológico em que ele se encontra. Produtos, que são sistemas ou mesmo plataformas, como aeronaves ou veículos lançadores, são ainda mais complexos, pois é necessário analisar os diversos componentes, como subsistemas, isoladamente, com o objetivo de completar a missão com sucesso e não deixar que um componente faça tudo falhar. Como exemplo, um parafuso que, como fixação mecânica, apresenta um NMT 9, pode, para uma aplicação específica como a utilização em próteses humanas, ainda apresentar um NMT 6 (protótipo em um ambiente de simulação).

5. A utilização da métrica NMT para decisões de fomento de recursos

Mankins (1995) indica que projetos com NMT 6 ou superior, quando se inicia o desenvolvimento do sistema por meio da fabricação da primeira unidade e se estabelece o fim da pesquisa pré-competitiva, apresentam alta chance sucesso e, conseqüentemente, de proporcionar a inovação (Figura 6).

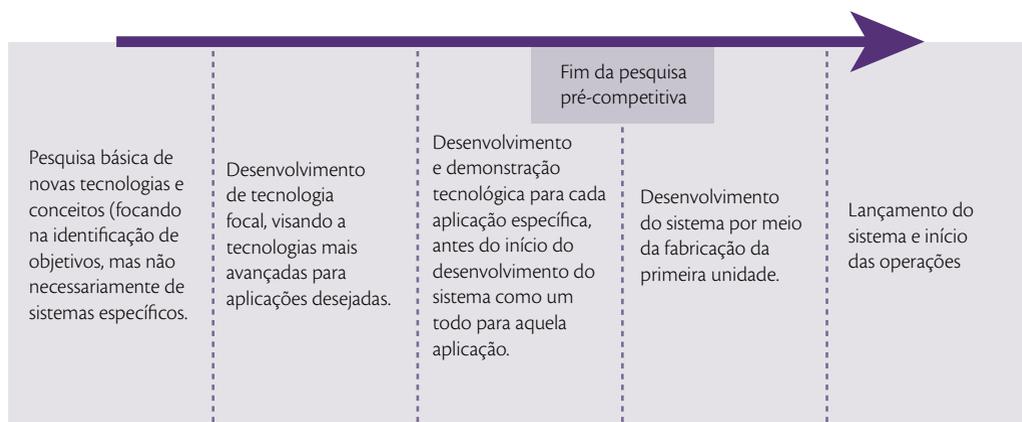


Figura 6. Modelo de maturação tecnológico

Fonte: Carvalho, 2012.

Uma das ações governamentais para a promoção da inovação no Brasil foi a consolidação do modelo da Embrapii baseado em um padrão institucional inovador no Sistema Nacional de Inovação. Essa consolidação ocorreu por meio da formação de uma rede de laboratórios credenciados, as Unidades Embrapii, cada uma com um foco claro em uma área de competência, para o atendimento das demandas empresariais por inovação. A iniciativa foi adotada com a finalidade de apoiar projetos em sua fase pré-competitiva (EMBRAPII, 2014). Isso significa apoiar projetos inovadores e dentro das áreas de competências das unidades, onde o teste de conceito tenha sido comprovado (NMT 3 ou superior). Assim, a melhor área de corte, onde são apresentados riscos tecnológicos menores, parece indicar o apoio a projetos inovadores com o NMT 3 ou superior. Por sua vez, os projetos inovadores com NMT inferiores permanecem sendo fomentados por projetos de pesquisa básica desenvolvidos em instituições de ciência e tecnologia e universidades, que podem receber o apoio governamental e onde as chances de potencializar a inovação ainda são grandes.

6. Conclusão

O NMT é uma ferramenta consolidada por diversos órgãos e instituições e vem estabelecendo seu pleno uso para classificar o estágio de maturação da evolução da tecnologia no País. A métrica é uma ferramenta que pode ser usada tanto para comparar tecnologias referentes a uma determinada aplicação quanto por órgãos de fomento, para apoiar projetos inovadores já em sua fase pré-competitiva, diminuindo, assim, os riscos dos projetos não chegarem à maturidade de aplicação (NMT 8). Pode auxiliar, ainda, na avaliação de programas de apoio governamental, como indicador na evolução de nível. Ela deve ser utilizada nas tecnologias portadoras de futuro (nanotecnologia, micro e nano eletrônica, fotônica, materiais avançados, biotecnologia industrial e sistemas avançados de manufatura), como forma de apoiar projetos mais proeminentes, dos NMT de 4 a 7, e auxiliando as empresas, principalmente as micro, pequenas e médias (MPME), a vencerem o “Vale da Morte” em sua cadeia de valor. A ferramenta deve ganhar espaço junto às agências brasileiras de fomento à inovação nos próximos anos.

Referências

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – ABDI. **Plataformas demonstradoras tecnológicas aeronáuticas, experiências com programas internacionais, modelagem funcional aplicável ao Brasil e importância da sua aplicação para o País**. Brasília: 2014. 122p. ISBN: 978-85-61323-17-2.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA - ANVISA. **Guia para a condução de estudos não clínicos de toxicologia e segurança farmacológica necessários ao desenvolvimento de medicamentos**. Brasília, 31 de janeiro de 2013 – versão 2. Disponível em: <<http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/eof1d9004e6248049dsfddd762e8a5ec/Guia+de+Estudos+N%C3%A3o+Cl%C3%ADnicos+-+vers%C3%A3o+2.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em: 21 jan. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PESQUISA E INOVAÇÃO INDUSTRIAL - EMBRAPII. **Relatório 1º Semestre de 2014**. Contrato de Gestão EMBRAPII/MCTI. Disponível em: <http://embrapii.org.br/sobre/Embrapii_Relatorio_Semestral_1_2014>. Acesso em: 23 jan 2015.

BANKE, J. **Technology readiness levels demystified**. NASA. 20 August 2010.

BROWN, T. **Design Thinking: uma metodologia poderosa para decretar o fim das velhas ideias**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2010. ISBN 978-85-508-0134-6.

CARVALHO, A.V.P. de. **Análise dos programas internacionais de plataformas demonstradoras tecnológicas no setor aeronáutico.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção. 2012. 131 p.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **CGEE apresenta ferramentas de inteligência tecnológica para o Ministério da Defesa.** Notícias de 26 fev. 2016. Acesso em: <<http://www.cgee.org.br/comunicacao/noticias>>. 2016.

DAWSON, B. **The impact of technology insertion on organisations.** Human Factors Integration Design Technology Centre. 31 Oct 2007.

EUROPEAN ASSOCIATION OF RESEARCH AND TECHNOLOGY ORGANISATIONS - EARTO. **The TRL scale as a research & innovation policy tool, EARTO recommendations.** 30 apr. 2014. Disponível em: <http://www.earto.eu/index.php?id=28&type=0&jumpurl=uploads%2Fmedia%2FThe_TRL_Scale_as_a_R_I_Policy_Tool_-_EARTO_Recommendations_-_Final.pdf&juSecure=1&locationData=28%3Att_content%3A2012&juHash=e11b28c87d23bfb626f77b46a594cd6530c12a98>. Acesso em: 05 fev. 2015.

EUROPEAN COMMISSION. **Horizon 2020.** The EU Framework Programme for Research and Innovation. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020>>. Acesso em: 04 fev. 2015.

FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS – FINEP. **Política operacional 2012-2014.** Rio de Janeiro: 2012. Disponível em: <http://download.finep.gov.br/politicaOperacional/politica_operacional_completa2012_2014.pdf>.

GIL, L.; ANDRADE, M.H.; COSTA, M. do C. Os TRL (Technology Readiness Levels) como ferramenta na avaliação tecnológica. **Ver.Ingenium.** jan/fev.2014.

GULBRANDSEN, K.E. **Bridging the valley of death: the rethoric of technology transfer.** 146p. (Graduate Theses and Dissertations 10740) - Iowa State University. Ames, Iowa. 2009.

HOUSE OF COMMONS. Science and Technology Committee. **Bridging the valley of death: improving the commercialisation of research.** Eight Report of Session 2012-2013. UK. 2013. 281 p.

IEEE SPECTRUM. **Chip hall of fame: Toshiba NAND flash memory.** Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/tech-history/silicon-revolution/chip-hall-of-fame-toshiba-nand-flash-memory>>. Acesso em: 30 Jun. 2017.

ILAS, C. Technology readiness impact on high-tech R&D projects. **U.P.B. Sci. Bull.** Series D, v. 75, Iss.2, 2013. ISSN 1454-2358.

ISO/TC 20/SC 14/FDIS 16290:2013. **Space systems – definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment**. 2013. 20p. Disponível em: <http://www.spacewx.com/Docs/ISO_FDIS_16290_%28E%29_review.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2015.

LIMA, G. S. de; FREITAS, L.F. **Pesquisa clínica e regulamentação da importação de medicamentos**. Fiocruz. 10p. Disponível em: <<http://www.ensp.fiocruz.br/portal-ensp/judicializacao/pdfs/517.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2015.

MANKINS, J.C. **Technology Readiness Levels**. A white paper. NASA. Office of Space Access and Technology. 6 apr. 1995.

MRL Guide (Draft). Joint Defense Manufacturing Technology Panel Manufacturing Readiness Level Working Group. 2007. 20 Mar. 2007. Disponível em: <<https://acc.dau.mil/CommunityBrowser>>.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. **Technology Readiness Levels: introduction**. Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20051206035043/http://as.nasa.gov/aboutus/trl-introduction.html>>.

SANTOS, B.V. dos; MARSHALL, P.M.; DARUIZ, V.T. Avaliação dos atrasos dos contratos industriais dos programas CBERS e Amazônia e os graus de maturidade tecnológica (TRL) e de fabricação (MRL). In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 4., ago.2013. **Anais...** 2013.

TAO, L.; PROBERT, D.; PHAAL, R. Towards an integrated framework for managing the process of innovation. **R&D Management**, v. 40, n. 1, 2010. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9310.2009.00575.x/pdf>>.

TEIXEIRA, C.B.; MENEZES, J.H. **Resultados do RHAe pesquisador na empresa, CNPq**. Brasília. 2014.

WANG, L.; CHEN, L.; HAO, X. LAB-LRU: A Life-aware buffer management algorithm for NAND flash memory. **The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers**. v. E99-D, n. 10. oct. 2016.

WHELAN, D. **Impact of Technology Readiness Levels on Aerospace R&D**. Fusion Energy Science Advisory Committee, 2008.