

Considerações sobre gerenciamento tecnológico e de recursos humanos na área espacial

Thyrso Villela¹, Alessandra de Moura Brandão², Jackson Max Furtunato Maia³

Resumo

Neste artigo são apresentados resultados do estudo desenvolvido pelo CGEE sobre gerenciamento tecnológico e de recursos humanos para o setor espacial brasileiro. São discutidos critérios e ferramentas de gerenciamento tecnológico e de recursos humanos com potencial de utilização por esse setor. Os critérios referem-se a processos de avaliação de níveis de maturidade tecnológica e de graus de criticidade de tecnologias. Por sua vez, a ferramenta usa técnicas de análise de redes complexas com base em coautorias e similaridade semântica entre *curricula* para realizar buscas automáticas de recursos humanos na Plataforma Lattes. Finalmente, apresenta-se o Observatório de Tecnologias Espaciais e suas propostas e serviços a serem oferecidos ao setor espacial brasileiro.

Abstract

In this paper we present results of a study conducted by CGEE on management of technology and human resources for the Brazilian space sector. We discuss criteria and tools employed for such managements. The criteria are related to processes to assess technology readiness and criticality levels. The tool employs complex network analysis techniques. It is based on co-authorships and semantic similarity between curricula in the Plataforma Lattes in order to perform automatic searches of professionals with potential to work for the Brazilian space sector. We also present a proposal for a Space Technology Observatory in Brazil.

- 1 Pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e assessor técnico do CGEE. Foi diretor de Satélites, Aplicações e Desenvolvimento da Agência Espacial Brasileira (AEB) e presidente da Sociedade Astronômica Brasileira. É doutor em Ciências (Astronomia) pela Universidade de São Paulo.
- 2 É assessora técnica do CGEE. Foi coordenadora interina de Satélites e Aplicações da Agência Espacial Brasileira (AEB) e assessora técnica do Conselho Nacional de Ciência Tecnologia (CCT). Doutora em Ciências do Comportamento pela Universidade de Brasília.
- 3 Analista em Ciência e Tecnologia Sênior do Inpe e assessor do CGEE. Foi coordenador técnico da Coordenação de Apoio à Pesquisa, Desenvolvimento e Aplicações (COAPD) do CNPq e da Coordenação de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da AEB. É doutor em Ciências (Física) pela Universidade de São Paulo.

Palavras-Chave: Gerenciamento tecnológico para o setor espacial. Tecnologias críticas para o setor espacial. Análise de criticidade de tecnologias espaciais.

Keywords: *Space technology management. Critical space Technologies. Space technologies criticality analysis.*

1. Introdução

Hoje em dia, é clara a influência das tecnologias espaciais na vida das pessoas. A previsão meteorológica, o funcionamento da internet, o monitoramento ambiental e de fronteiras, as comunicações e os sistemas de navegação por satélite, entre outros exemplos fortemente dependentes dessas tecnologias, mostram que as aplicações espaciais constituem uma realidade irreversível. Poder utilizar várias dessas aplicações em benefício próprio é uma aspiração de vários países, mas, atualmente, são poucas as nações que têm o domínio tecnológico necessário para concretizar esse objetivo.

O mercado espacial, que engloba desde o desenvolvimento de artefatos espaciais até os serviços deles provenientes, movimenta em torno de 310 bilhões de dólares por ano [18], fato que, aliado ao caráter dual das aplicações espaciais, faz do setor um campo fértil no qual estratégias de domínio tecnológico florescem continuamente. Ser um ator importante do setor espacial traz inúmeras vantagens para um país, que vão desde o atendimento das necessidades básicas de uso das aplicações espaciais em proveito próprio, passando pelo aumento do prestígio internacional, que traz ganhos secundários interessantes, e chegando à possibilidade de ser um exportador de produtos de alto valor agregado.

Em especial, o Brasil, com uma vasta extensão territorial, precisa monitorar o seu território para proteger o meio ambiente, conhecer as riquezas minerais e vegetais e proteger as fronteiras e o mar territorial, entre outras necessidades. Assim, torna-se essencial que as aplicações espaciais estejam constantemente ao dispor do Estado brasileiro. Para isso, é necessário ao País ter uma capacidade mínima de acesso às tecnologias de seu interesse e não ficar sujeito a cerceamentos tecnológicos de países que as dominam e restringem sua exportação.

Apesar de ter um dos programas espaciais mais antigos do mundo, o Brasil ainda não conseguiu dominar as tecnologias necessárias para usufruir autonomamente das atividades espaciais de seu interesse. Quais seriam as razões para essa situação? Uma primeira aproximação para responder a essa questão é formular outras duas perguntas:

- O que os países que dominam as tecnologias espaciais fizeram no passado e o Brasil não fez?
- O que os países que dominam as tecnologias espaciais fazem hoje e o Brasil não faz?

Naturalmente, tanto essas perguntas quanto suas respostas não são suficientes para resolver o problema posto, mas certamente podem fornecer informações importantes para entender algumas das razões para as dificuldades do Programa Espacial Brasileiro (PEB). Além disso, não se trata de, apenas, adotar

práticas gerenciais empregadas por esses países desconsiderando a realidade brasileira. Problemas relacionados aos recursos financeiros disponibilizados ao longo do tempo para o PEB e ao arcabouço jurídico no qual as instituições do setor espacial estão imersas são óbices que precisam ser explicitados, mas não são os únicos que devem ser considerados para explicar a falta de domínio tecnológico no setor espacial. Dentre os aspectos que precisam ser mencionados, certamente se encontram aqueles relacionados ao gerenciamento tecnológico e à necessidade de engajamento do capital humano qualificado atualmente disponível no País no esforço de dominar tecnologias essenciais para o uso das aplicações espaciais de interesse nacional.

Para a primeira pergunta, a resposta engloba diversos fatores. Por exemplo, vários desses países sempre tiveram um planejamento consistente, com programas de apoio ao treinamento de cientistas e engenheiros e ao desenvolvimento tecnológico. Alguns desses países sempre usaram o potencial humano disponível nas suas universidades no esforço de avançar na área espacial. Um exemplo dessa prática é o dos Estados Unidos da América (EUA) que, no início da década de 1960, fizeram uma análise das necessidades do seu programa espacial e das competências instaladas nas universidades norte-americanas à época [1]. É conveniente notar que a *National Aeronautics and Space Administration (Nasa)*, desde o seu início, sempre se apoiou no capital humano das universidades de forma a evitar a duplicação de esforços e ter sempre à disposição de seus programas o pessoal altamente qualificado das universidades.

Para a segunda pergunta, uma das respostas reside no fato de esses países, ao se depararem com dificuldades para desenvolver ou ter acesso a tecnologias que os habilitassem a ter seus próprios artefatos espaciais, implantaram em seus programas ações voltadas para desenvolver tecnologias e treinar pessoal. Essas ações incluem, por exemplo, o uso de programas que permitem elevar a maturidade de tecnologias espaciais de uma forma objetiva, como é o caso de programas suborbitais, de satélites tecnológicos, entre outros. Além disso, alguns programas têm ações específicas de domínio de tecnologias essenciais ao seu desenvolvimento, as ditas tecnologias críticas, como é o caso da *European Space Agency (ESA)*.

Ações similares no PEB têm acontecido de forma esparsa no tempo. Assim, tendo em vista o contexto mundial e a situação em que se encontra o Brasil atualmente em termos de desenvolvimento de tecnologias da área espacial, fica claro que é necessário introduzir metodologias de gerenciamento de tecnologias e incorporar os recursos humanos disponíveis no País, principalmente nas universidades brasileiras, para o domínio de tecnologias de interesse do PEB.

De forma a colaborar com esse esforço, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) conduziu, entre 2012 e 2014, estudos especificamente nesse sentido. Como resultados desses estudos, foram desenvolvidas metodologias de avaliação dos graus de maturidade e de criticidade de tecnologias, além de uma ferramenta de busca automática de recursos humanos disponíveis no Brasil que possam colaborar com o esforço de dominar tecnologias críticas para o PEB.

A metodologia de avaliação de níveis de maturidade de tecnologias seguiu os conceitos mundialmente aceitos, com base na norma ISO 16290 [11], mas acrescentou alguns elementos ao processo de avaliação, que, embora não alterem os critérios da métrica estabelecida por essa norma, incorporam informações importantes para o gestor ou gerente de projetos espaciais ao explicitar a forma de dependência do exterior de insumos, componentes, materiais, serviços, etc. [4]. Por sua vez, a metodologia de avaliação de criticidade de tecnologias é capaz de definir os graus de criticidade de uma dada tecnologia, tendo por base uma série de critérios [5]. Ao se combinar essas duas metodologias e a ferramenta de busca de recursos humanos para suprir as lacunas tecnológicas do PEB com diferentes programas de acesso ao espaço, é possível delinear uma proposta de plano de domínio tecnológico para o setor espacial.

2. Algumas considerações sobre gerenciamento tecnológico e de pessoal na área espacial

2.1. Aspectos gerais

É óbvio pensar que programas que envolvam alto risco, alto custo e longo prazo para alcançar seus objetivos sigam passos bem estabelecidos para as suas consecuições, como é o caso de programas espaciais. Esses passos são bem documentados na literatura do setor e envolvem planejamento, organização, coordenação e controle (e.g., [19]). É necessário garantir, de forma clara, que os objetivos e requisitos de um dado projeto espacial sejam alcançados dentro dos prazos estabelecidos. Para tanto, na fase de organização, deve ser feita uma avaliação criteriosa dos meios disponíveis, como infraestrutura e pessoal, para atender às necessidades do projeto. O artefato espacial a ser construído deve ser decomposto em seus respectivos subsistemas para que o trabalho seja distribuído entre os especialistas da forma mais eficiente possível. Na fase de coordenação, as atividades previstas para o desenvolvimento do projeto devem ser dirigidas de forma a fazer com que haja efetivamente uma sintonia entre elas. Na fase de controle, são estabelecidos procedimentos e regras para aferir os resultados obtidos durante o desenvolvimento do projeto, de forma a mitigar possíveis desvios do cronograma definido inicialmente. Essas fases são seguidas por todos os projetos dos programas espaciais do mundo, incluindo o brasileiro, porém algumas ferramentas não são ainda de uso disseminado no Brasil, como a análise dos graus de maturidade tecnológica e de criticidade de tecnologias.

Partindo de um conjunto de missões espaciais já definidas em uma etapa anterior de planejamento, podemos descrever uma forma simples de gerenciamento tecnológico que poderia ser aplicada ao PEB: a partir das informações oriundas do processo de definição das demandas, um comitê de especialistas, composto por representantes dos principais atores do PEB, deve elaborar um documento com as especificações preliminares das missões que devem ser levadas a cabo para contemplar as demandas levantadas. A seguir, um comitê que tenha como missão prover informações sobre a política industrial adotada pelo Brasil para a área espacial, cuja composição deve incluir representantes das indústrias nacionais, examinaria o documento produzido e daria um parecer sobre as capacidades da indústria

nacional para atender os requisitos definidos. As próximas atribuições desse comitê seriam examinar os planos tecnológicos do PEB e da indústria e verificar se as diretrizes da Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (ENCTI) e da Estratégia Nacional de Defesa (END) estariam sendo atendidas, para produzir um documento consolidado com as especificações finais da missão e a estratégia de participação da indústria nacional.

Esse processo deve ser dinâmico e constantemente alimentado por informações provenientes de um arranjo institucional com o propósito de coletar dados e produzir estudos sobre o setor espacial, nos moldes de um Observatório de Tecnologias Espaciais (OTE). Tal componente, no entanto, ainda não está implantado no PEB. Ele deveria ser o responsável pela busca contínua de novas informações de interesse da área espacial e gerar informações que guiassem as tomadas de decisão durante todo o processo de gerenciamento tecnológico. As informações oriundas das observações do OTE seriam compiladas e documentadas em forma de boletins informativos, relatórios, alertas, etc. As tarefas do OTE seriam:

- monitorar as ações do maior número possível de agências espaciais;
- monitorar no mundo o desenvolvimento e a evolução de tecnologias espaciais;
- monitorar, tanto no Brasil quanto no mundo, o desenvolvimento e a evolução de tecnologias que tenham potencial de aplicação na área espacial;
- obter informações sobre os processos e as estratégias de desenvolvimento e gerenciamento dessas tecnologias;
- identificar e analisar tendências tecnológicas mundiais;
- identificar e analisar lacunas, oportunidades e sinergias tecnológicas na área espacial no Brasil;
- utilizar ferramentas de mapeamento de redes de conhecimentos e de colaboração para auxiliar o esforço de domínio de tecnologias para a área espacial no Brasil;
- identificar e acompanhar novas oportunidades de parcerias técnicas e institucionais nos âmbitos nacional e internacional;
- gerar informações estratégicas e dados estatísticos sobre os principais resultados encontrados no processo de monitoramento e análise de tecnologias;
- auxiliar na estruturação de uma plataforma de ação de longo prazo, com a finalidade de subsidiar a formulação, o acompanhamento e a avaliação de políticas e programas da área espacial no Brasil;
- ampliar o processo de construção de competência em inteligência estratégica e análise de informações na área espacial.

De forma a estabelecer um programa que vise ao domínio das tecnologias necessárias para o desenvolvimento das missões definidas pelo processo relatado anteriormente, é imperativo que haja uma metodologia de gerenciamento tecnológico no PEB. Nesse sentido, será delineada a seguir

uma proposta de gerenciamento tecnológico para o setor espacial que tem como objetivo principal definir um plano de domínio de tecnologias críticas (PDTC). Porém, inicialmente, é importante conceituar o termo “tecnologia crítica”.

2.2. Tecnologias críticas

O tema tecnologia crítica (TC) já foi bastante explorado ([3], [15], [9]). Ele tem alguns aspectos inerentes aos ambientes e contextos em que é utilizado. De uma forma geral, pode-se dizer que tecnologias críticas da área espacial no Brasil são aquelas essenciais para atender algum objetivo estratégico do PEB. O PEB necessita de tecnologias que, seja por sua importância para o alcance de requisitos operacionais para um determinado projeto, seja pela dificuldade de sua aquisição no exterior, são consideradas como críticas.

O PEB, assim como outros programas espaciais do mundo, sofre cerceamentos tecnológicos, que são medidas que impactam o custo e o tempo de desenvolvimento dos projetos. Restrições relacionadas ao *Missile Technology Control Regime (MTCR)* e ao *International Traffic in Arms Regulation (Itar)*, instrumentos legais para limitação de exportação de tecnologia, impactam negativamente os projetos nacionais. Assim, é imperativa a adoção de medidas para minimizar os resultados desses impactos. É necessário também ter uma noção exata de quais elementos tecnológicos são críticos em um dado projeto, e que ações devem ser tomadas para que esses elementos não estrangulem os desenvolvimentos nos quais são imprescindíveis.

Para se chegar a um consenso sobre o termo tecnologia crítica, equipes do CGEE, do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), em estudos desenvolvidos em colaboração, propuseram a definição do termo “elemento tecnológico crítico” para o setor espacial brasileiro, tendo como referências documentos produzidos pelo *Department of Defense (DoD)* dos EUA [20] e pela ESA [6]. Em particular, a ESA utiliza um termo interessante que é a definição de *não-dependência tecnológica*, que se traduz pela circunstância de a Europa, embora possa não ter a capacidade de produzir dentro do seu próprio território uma dada tecnologia de que necessita para tornar operacional um dado sistema, ter acesso livre e irrestrito a essa tecnologia. Esse conceito de *não-dependência* pode ser aplicado ao caso brasileiro, como uma primeira estratégia de gerenciamento tecnológico. Para sermos mais precisos, é conveniente explicitar os demais termos utilizados na Europa para definir a situação de independência, que é quando uma dada tecnologia é produzida e se encontra disponível na Europa, e dependência, que é quando não há a disponibilidade de uma dada tecnologia na Europa e há restrições à sua livre aquisição e ao seu uso irrestrito. Assim, nesse contexto, foi definido como elemento tecnológico crítico aquele que:

- é fundamental para que o sistema espacial a ser desenvolvido alcance requisitos operacionais (dentro de limites aceitáveis de cronograma e custo);

- exige um desenvolvimento tecnológico⁴ novo ou se insere em uma área com grande risco tecnológico na fase de projeto ou de demonstração;
- está sujeito a embargo para sua aquisição (ou existe grande possibilidade de haver embargo).

Uma definição única de TC proporciona um entendimento comum entre os gerentes e desenvolvedores de projetos espaciais acerca da identificação destas tecnologias. Tendo definido o conceito de TC, é necessário que haja uma metodologia para determinar como uma dada tecnologia ou elemento tecnológico seriam considerados críticos.

Novamente, uma estreita colaboração entre o CGEE e os principais executores do Programa Nacional de Atividades Espaciais, IAE e Inpe, produziu uma metodologia baseada em conceitos utilizados na Europa, como a necessidade de uma “abordagem orientada para o desenvolvimento de componentes estratégicos, concentrando-se nos componentes críticos selecionados, para os quais a dependência da indústria europeia dos fornecedores internacionais deve ser evitada, a fim de alcançar o equilíbrio ideal entre a independência tecnológica, a cooperação estratégica com os parceiros internacionais e a confiança nas forças de mercado” [6].

Várias tecnologias espaciais são dominadas pelo PEB. Algumas estão se tornando obsoletas e outras ainda são atuais. Nos dois casos, são necessárias ações que garantam a sua sustentabilidade e manutenção.

Além dessas tecnologias dominadas, tecnologias críticas não dominadas podem ser classificadas, quanto ao seu impacto na evolução do PEB, como niveladoras, avançadas ou disruptivas. As niveladoras são aquelas já dominadas por outros países e necessárias para o desenvolvimento de sistemas e subsistemas essenciais para missões e projetos do PEB, mas que não são dominadas de forma suficiente ou não são disponibilizadas de forma adequada pela indústria e por centros de pesquisa nacionais ou sofrem restrições para ser adquiridas no exterior, a ponto de comprometer o desenvolvimento autônomo de veículos lançadores e satélites.

Tecnologias críticas avançadas são aquelas alinhadas com a visão de futuro do PEB ou relacionadas direta ou indiretamente às necessidades das missões e dos projetos existentes, mas que ainda estão em desenvolvimento em nível mundial. Portanto, caso seja implantado um programa de gerenciamento tecnológico na área espacial, com ações de apoio ao desenvolvimento tecnológico e de treinamento de pessoal, as empresas brasileiras terão melhores condições de competir no mercado internacional.

Por fim, tecnologias críticas disruptivas estão relacionadas ao surgimento de uma inovação tecnológica radical que tenha o potencial de induzir uma mudança substancial nos roteiros estratégicos em vigor, mantendo a aderência aos objetivos do Programa Nacional de Atividades Espaciais (Pnae). A Figura 1 ilustra essas definições.

⁴ Se o desenvolvimento a ser realizado é uma aplicação de tecnologia já existente ou disponível e está dentro da base de experiência do desenvolvedor, ele é considerado desenvolvimento de engenharia. Se o desenvolvimento está fora da base de experiência do desenvolvedor, ele se torna desenvolvimento tecnológico [2].

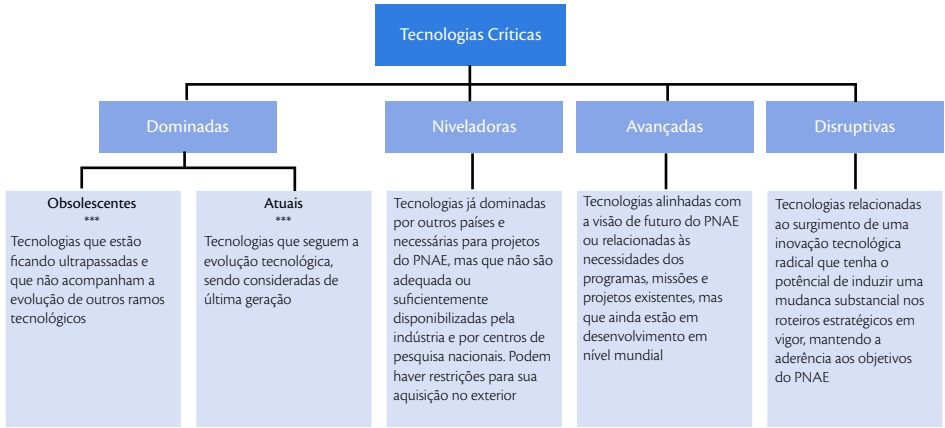


Figura 1. Definições de classes de tecnologias críticas.

Os critérios para a definição de uma tecnologia como crítica deverão contemplar aspectos como importância para sistemas ou serviços espaciais considerados estratégicos para o Pnae e dificuldade de aquisição nos âmbitos nacional e internacional. Critérios adicionais como tempo e custo de desenvolvimento, valor comercial para a indústria nacional, competências e infraestrutura disponíveis no País para o desenvolvimento necessário, potencial de aplicação em outros setores de atividade econômica, entre outros, podem ser usados como subsídios para uma tomada de decisão mais sólida quanto ao desenvolvimento ou à compra de um determinado componente tecnológico, processo conhecido como “make or buy”.

2.3. Métricas de avaliação de tecnologias

Metodologias objetivas para avaliar tecnologias certamente são importantes para a montagem de um plano de domínio tecnológico para o PEB. Há desde propostas metodológicas universais, como é o caso da relacionada ao grau de maturidade tecnológica - ou prontidão tecnológica [technology readiness level (TRL)] -, até casos específicos que dependem das circunstâncias de cada país, como na definição de criticidade de uma dada tecnologia. O CGEE, no âmbito dos estudos mencionados anteriormente, desenvolveu uma metodologia de avaliação de níveis de maturidade tecnológica baseada na norma ISO 16290, na qual foi adicionada a explicitação do grau de dependência do exterior para o alcance do grau de maturidade dessa tecnologia [4].

2.3.1. TRL

Essa métrica, usada há um tempo ([13], [12], [16], [14]) por várias organizações ao redor do mundo, trouxe uma forma objetiva para estimar o grau de desenvolvimento em que se encontra um dado elemento tecnológico. O uso dessa metodologia é extremamente importante em diversos campos da engenharia, mas, em particular, no setor espacial (e.g. [10], [7], [17], [8]), no qual se originou.

Em uma missão espacial, não é conveniente o emprego de tecnologias que não tenham sido desenvolvidas suficientemente, seja no caso de satélites ou de foguetes. Diferentemente de outras áreas tecnológicas, como a automobilística, por exemplo, na área espacial a prática do recall não é exatamente uma forma eficiente de resolver problemas tecnológicos a posteriori, apesar de ter havido alguns poucos exemplos na área, como os reparos de satélites realizados em algumas ocasiões. Dessa forma, elementos tecnológicos com altos graus de maturidade tecnológica devem ser empregados em uma missão espacial operacional.

Ademais, ter o conhecimento exato do estágio de desenvolvimento de um dado elemento tecnológico é uma informação importante para que o gestor de um projeto possa avaliar os recursos materiais e humanos que devem ser utilizados para o completo domínio desse elemento, além, naturalmente, de permitir uma estimativa mais objetiva do tempo necessário para esse domínio. Também com esse conhecimento, é possível elaborar um cronograma e uma previsão de custo realistas para o projeto como um todo e antever, caso seja apropriado, se haverá em um horizonte próximo a superação dessa tecnologia por outra mais eficiente e menos onerosa. A tabela abaixo mostra os níveis de maturidade tecnológica e as condições que devem ser satisfeitas para que eles sejam alcançados.

Tabela 1. Níveis de maturidade tecnológica para o setor espacial (adaptado de [11]).

Nível	Condições necessárias para o alcance do nível de maturidade tecnológica
TRL-1	Princípios básicos da ideia terem sido observados e documentados
TRL-2	Concepção geral da tecnologia ter sido formulada e documentada
TRL-3	Ter sido comprovado o conceito do produto tecnológico que se quer desenvolver
TRL-4	Modelo funcional do produto ter sido verificado em laboratório
TRL-5	Funções críticas do produto terem sido verificadas com modelos operando em ambientes representativos do ambiente real em que o produto operará
TRL-6	Modelo funcional avançado, compatível com o subsistema ou sistema real, ter sido testado e comprovado em ambiente representativo do ambiente real ou no espaço
TRL-7	Protótipo ou modelo de qualificação do produto final, compatível com o sistema real, ter sido testado e comprovado para funcionamento em ambiente operacional (se necessário, no espaço)
TRL-8	Produto final (modelo de voo) ter sido qualificado e aceito para voo espacial
TRL-9	Produto ter sido empregado com sucesso em voo espacial operacional

Atualmente, não há no País disponibilidade de todos os insumos necessários para os projetos espaciais em andamento. Muitas vezes, essa indisponibilidade é ditada por razões técnicas ou até mesmo econômicas. Assim, o desenvolvedor de um elemento tecnológico para o PEB pode se ver obrigado a importar alguns insumos para levar a cabo o projeto, caso esse insumo seja indispensável. Igualmente, pode haver casos em que seja necessária, por exemplo, a realização de testes ou tratamentos no exterior. Caso a importação desses insumos ou a realização desses processos sejam

negados ou fortemente controlados por algum país, temos, obviamente, um caso de dependência tecnológica do exterior.

Nesses casos, teremos situações de baixa dependência quando o insumo e/ou procedimento estiverem disponíveis no Brasil, mesmo não sendo produzidos aqui ou dominados por instituições brasileiras. Há os casos de dependência média quando há restrições acerca do uso desses insumos ou processos e, de dependência total, quando não é possível a importação desses insumos ou a realização de procedimentos no exterior, situação que se configura como cerceamento tecnológico. A figura a seguir ilustra essas situações. Naturalmente, para cada um dos casos de dependência do exterior, deve haver a previsão de ações que visem o domínio tecnológico desses elementos.

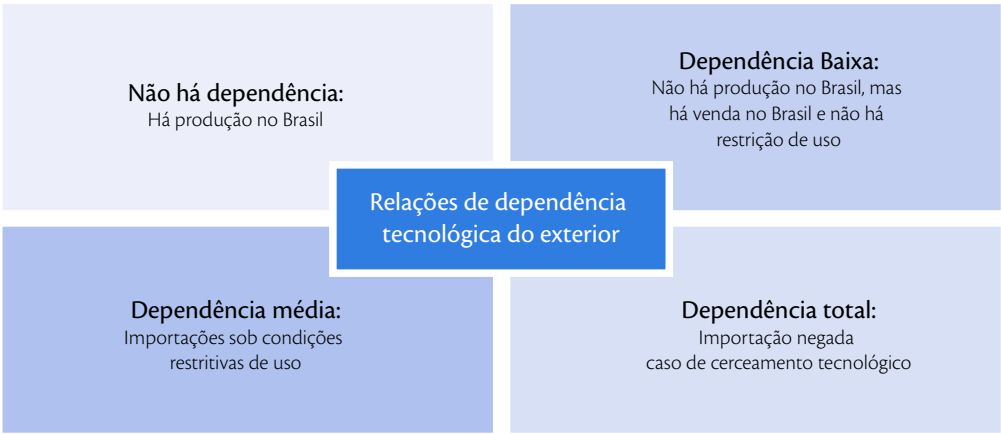


Figura 2. Graus de dependência do exterior para TRL (adaptado de [4]).

Agregar a determinação dos TRL às práticas de gerenciamento de projetos atualmente em vigor no País, como aquelas relacionadas ao uso do padrão de gerenciamento da ESA, *European Cooperation for Space Standardization (ECSS)*, e de classificação de componentes e materiais em graus de qualificação, certamente fará com que a busca de domínio tecnológico seja mais bem conduzida, com ações mais eficazes e eficientes.

2.3.2. Análise de criticidade

Tendo em vista as definições sobre tecnologias críticas, passamos a propor uma metodologia que pode ser empregada para determinar o grau de criticidade de uma dada tecnologia ou elemento tecnológico. Inicialmente, deve ser feita uma análise que indique se o elemento tecnológico em questão é potencialmente crítico ou não. Para isso, deve ser analisada a relevância do elemento tecnológico para o projeto a ser desenvolvido e avaliado o seu grau de desenvolvimento tecnológico ou, em outras palavras, o grau de maturidade tecnológica em que ele se encontra. Uma análise

complementar examina a viabilidade de desenvolvimento desse elemento em termos de custo e prazo. A Figura 3 representa a etapa de definição de elemento tecnológico crítico.



Figura 3. Processo de definição de elemento tecnológico potencialmente crítico (adaptado de [5]).

Caso seja considerado um elemento potencialmente crítico, ele seguirá para o segundo passo da metodologia, que é uma análise na qual diversas variáveis são consideradas, como disponibilidade e quantidade de fornecedores, tanto no Brasil quanto no exterior, entre outras. Como resultado dessa análise pode-se ter as seguintes possibilidades: a) o elemento considerado potencialmente crítico não se revelou crítico; b) o elemento se revelou crítico, porém o seu grau de criticidade é baixo, c) o elemento se revelou crítico e tem grau médio de criticidade e d) o elemento é crítico e seu grau de criticidade é alto. Associam-se a essas possibilidades ações de domínio tecnológico que variam de acordo com o grau de criticidade encontrado, podendo ser de curto, médio e longo prazos, além de preverem o uso de programas do plano de domínio de tecnologias críticas mostrado na última seção desse trabalho.

Alta - A	• Elemento crítico • Devem ser analisadas alternativas que viabilizem o seu desenvolvimento
Alta - B	• Elemento crítico • Ações imediatas de domínio tecnológico devem ser tomadas
Alta - C	• Elemento crítico • Já existem ações em andamento que devem ser monitoradas
Média	• Elemento ainda não é crítico • Em curto prazo, ações de domínio tecnológico devem ser tomadas
Baixa	• Elemento ainda não é crítico • Em médio e longo prazos, ações visando domínio tecnológico devem ser iniciadas
Não Crítico	• Elemento não é considerado crítico

Figura 4. Graus de criticidade tecnológica (adaptado de [5]).

O processo de análise de criticidade e de definição de ações que visem ao domínio tecnológico está resumido esquematicamente na Figura 5. Nessa figura, os passos de 1 a 3 referem-se à formalização do processo de definição do elemento tecnológico a ser analisado. O passo 4 é o que vai efetivamente iniciar o processo de identificação de elementos que têm potencial de ser críticos. O passo 5 representa o processo de análise propriamente dita de criticidade do elemento tecnológico definido no passo 1, que deve ser validado no passo 6. Já o passo 7 envolve o emprego da metodologia de análise de maturidade tecnológica que segue a métrica da norma ISO 16290, mas que agrega as informações sobre dependências do exterior definidas na Figura 2. Os passos 8 e 9 referem-se à definição das ações necessárias para o efetivo domínio tecnológico e devem fazer uso da ferramenta de busca de recursos humanos e do plano de domínio de tecnologias críticas que serão mostrados a seguir.

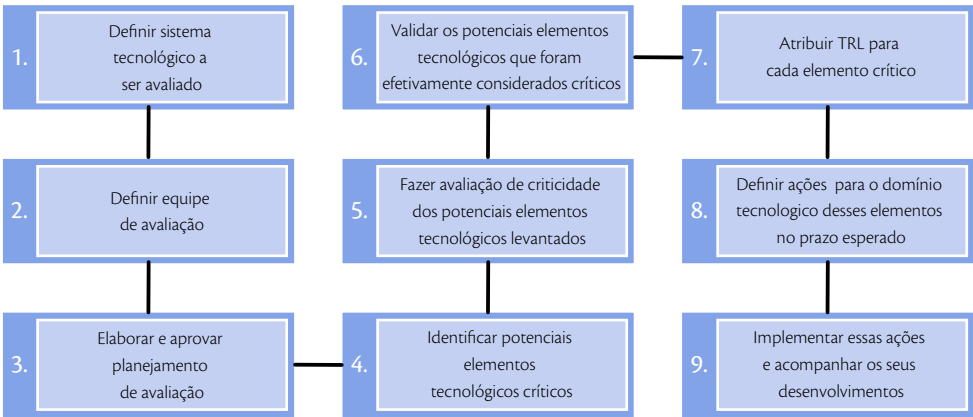


Figura 5. Fluxo de análise de criticidade de elementos tecnológicos e de definição de ações de domínio tecnológico (adaptado de [5]).

2.4. Ferramenta de busca de recursos humanos para o setor espacial

No âmbito dos estudos mencionados anteriormente, foi desenvolvida uma ferramenta de busca de recursos humanos que pudessem contribuir para o esforço de dominar tecnologias críticas para o PEB. Basicamente, são analisadas as coautorias e os temas de especialidades dos profissionais registrados na Plataforma Lattes, de forma a identificar redes de colaboração ou redes de conhecimento. Para formar as redes de conhecimento, essas análises são feitas tendo por base a similaridade semântica entre os temas de pesquisa a partir dos títulos de artigos listados nos *curricula* das pessoas. Essa ferramenta foi desenvolvida com o objetivo de selecionar pessoas que tivessem experiência em temas relacionados a algumas tecnologias de interesse do PEB. Foram realizados vários ensaios com diferentes tecnologias e os resultados foram bastante promissores, tendo sido possível identificar competências que estão hoje dispersas por várias instituições brasileiras. Agregar essas competências ao esforço nacional de dominar tecnologias críticas da área espacial é um desafio importante que deve constar de um plano de domínio tecnológico.

A figura a seguir mostra um exemplo de redes que se formaram tendo por base o tema “sistemas inerciais”. Os nomes foram omitidos, mas a ferramenta proporciona identificar os nomes das pessoas, as instituições em que elas atuam e as palavras-chave que caracterizam os seus respectivos campos de atuação. As linhas azuis significam que há trabalhos em conjunto feitos pelas pessoas, sendo que a largura da linha está relacionada à quantidade de trabalhos publicados conjuntamente. A ferramenta permite escolher entre vários tipos de publicação, como artigos em periódicos, anais de congresso, resumos e capítulos de livros. A linha cinza significa que há proximidade semântica entre as pessoas, apesar de não haver publicação em comum. A largura da linha identifica o grau de proximidade: quanto mais larga a linha, mais diretamente ligadas ao tema de busca as pessoas estão. A linha preta significa que há trabalhos em conjunto entre as pessoas (coautorias) e que elas estão também próximas semanticamente. Embora possa parecer óbvio, nem sempre a existência de coautorias define uma proximidade de temas de pesquisa entre as pessoas. Publicações que foram originadas da combinação de conhecimentos específicos para produzir um dado trabalho não necessariamente indicam que haja proximidade de campos de trabalho (especialidades) entre as pessoas. O diâmetro dos círculos representa a produção da pessoa e as cores dos círculos identificam as sub-áreas do tema em que elas atuam. A análise das redes obtidas por essa ferramenta é fundamental para selecionar os profissionais que efetivamente são de interesse para o desenvolvimento da tecnologia que se quer dominar.

No exemplo da figura, a busca foi feita para o tema “sistemas inerciais”. É possível ver vários grupos que atuam nesse tema em áreas como indústria automobilística, robótica, microeletrônica, etc. Investigar detalhadamente os componentes desses grupos é uma das tarefas que precisam ser feitas para definir que profissionais podem ser incorporados ao processo de domínio de uma dada tecnologia do setor espacial, uma vez que, independentemente de suas áreas de atuação, eles podem ter conhecimentos importantes para o desenvolvimento de tecnologias de interesse do setor espacial.

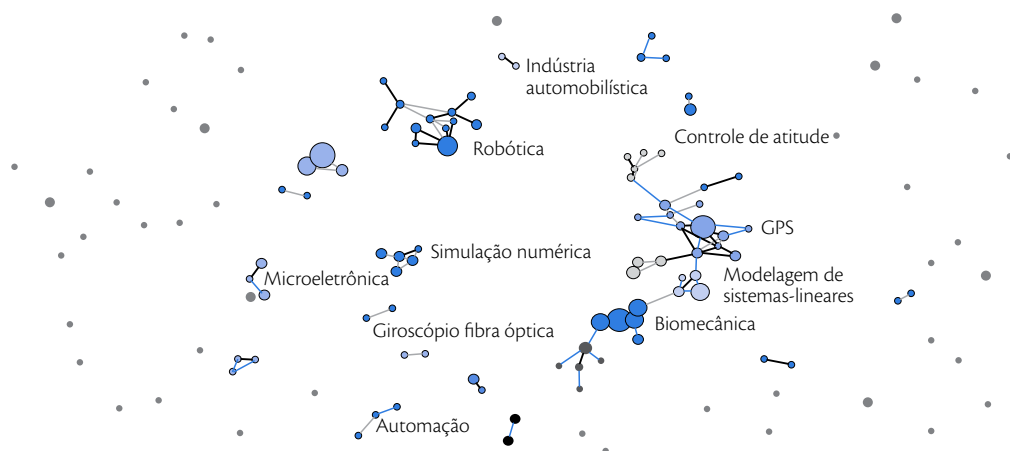


Figura 6. Rede de conhecimento relativa ao tema sistemas inerciais.

3. Proposta de um programa de domínio de tecnologias críticas

Um plano de domínio de tecnologias críticas (PDTC) para o setor espacial brasileiro que vise a dar respostas objetivas às perguntas colocadas no início desse artigo deve levar em conta vários programas e ações em diferentes áreas. Os primeiros fatores a serem considerados são o capital humano necessário para levar a cabo esse plano, a infraestrutura e os meios de acesso ao espaço disponíveis para que esse capital humano possa atuar de forma eficaz.

Formar e treinar pessoal, assim como buscar competências já existentes no País para trabalhar em projetos de interesse do PDTC são ações que deveriam ser incorporadas ao PEB. Usar, a exemplo do que é feito em outros países, metodologias e ferramentas de gerenciamento tecnológico, programas suborbitais e orbitais de baixo custo, entre outros, são fatores necessários para que o PDTC possa atingir o objetivo esperado, que é o de capacitar o País para usufruir das aplicações espaciais de seu interesse.

Inicialmente, convém fazer uma observação importante acerca do processo de domínio de tecnologia crítica. Em geral, há uma tendência em definir o processo de domínio de tecnologia crítica de uma maneira ampla, considerando apenas o campo no qual se inserem as tecnologias de interesse. Por exemplo, o domínio da tecnologia relacionada à propulsão líquida precisa ser mais explicitado em função do veículo no qual ela será empregada, com a definição do empuxo necessário, etc. Assim, buscar a competência em propulsão líquida pode ter duas abordagens: uma de curto e médio prazos, seguindo as necessidades de um determinado projeto atual, e uma de longo prazo, seguindo a busca do estabelecimento de competências básicas no setor que possam, no futuro, atender as necessidades de outros projetos. Naturalmente, haverá diferenças entre as ações para o domínio dessa tecnologia específica de acordo com a abordagem utilizada, que se traduzem na escala de tempo das ações. A figura abaixo ilustra esse processo.

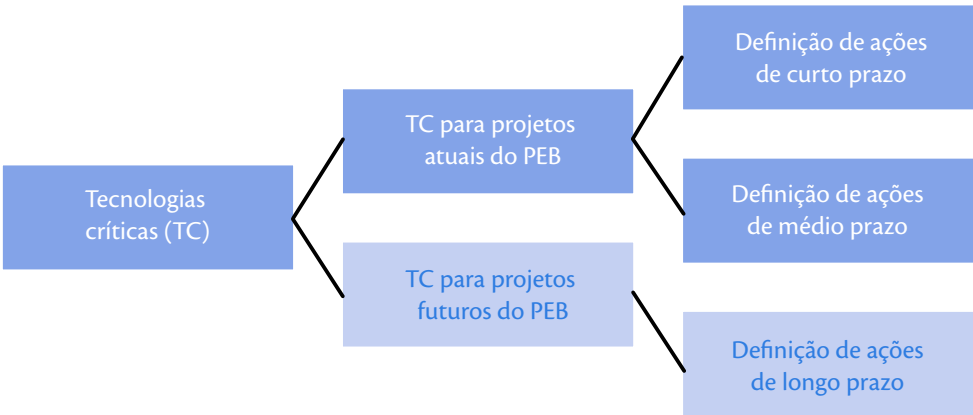


Figura 7. Tecnologias críticas e ações de domínio tecnológico.

Todas as ações propostas para domínios de tecnologias devem ser apoiadas, de forma integrada, por programas que levem em consideração a evolução contínua e, onde for possível, em paralelo, dos níveis de maturidade das tecnologias a serem desenvolvidos. A divisão de esforços (recursos humanos, financeiros, de infraestrutura, etc.) deve ser constantemente gerenciada. Essas ações e programas constituem o PDTC, que deve ser continuamente monitorado e avaliado de forma que essas ações sejam modificadas à medida que algumas das tecnologias críticas de interesse forem sendo dominadas. Essas ações devem contemplar o uso dos recursos humanos disponíveis e os que devem ser treinados ou formados, e o uso de programas de acesso com diferentes abordagens, que vão desde um acesso rápido e de baixo custo até os programas comumente utilizados de missões operacionais.

A definição de cooperações internacionais, outra dimensão importante do PDTC, deve ser feita de forma a encontrar, via acordos de colaboração internacional, as melhores oportunidades de fazer avançar rapidamente os TRL de interesse do PEB. É fundamental, portanto, que sejam conhecidas as possibilidades de se estabelecer cooperações com países que dominem tecnologias que sejam de interesse do PEB. Essa última capacidade deve ser estabelecida com as informações a serem obtidas pelo OTE, de maneira que as melhores oportunidades de parcerias sejam claramente identificadas. A seguir, serão descritos os programas e as ações que devem compor o PDTC.

3.1. Programa de acesso rápido e de baixo custo ao espaço (ARBE): TRL 5-8

O objetivo principal desse programa é proporcionar meios de teste para diferentes tecnologias que se encontram em níveis de maturidade entre 5 e 6 e têm níveis de criticidade médio e alto de forma a elevá-las ao TRL 7, no mínimo. Ele visa à utilização de plataformas orbitais e suborbitais de baixo custo para testes e demonstrações de tecnologias de forma a acelerar o processo de maturação de tecnologias. Permite também a realização de experimentos científicos e tecnológicos de forma rápida e com custos baixos, se comparados a um programa orbital convencional.

3.1.1. Programa suborbital (PSO): TRL 5-7

O programa suborbital engloba o uso de balões estratosféricos, foguetes de sondagem e aviões. O uso de balões estratosféricos, foguetes de sondagem e aviões acelera o alcance de vários objetivos de um programa espacial a custos mais baixos e com logísticas de missão menos complexas. Um programa desse tipo proporciona o treinamento de recursos humanos (alunos, cientistas, engenheiros, técnicos e gestores) de uma forma rápida e constante e permite o teste de várias tecnologias que serão ou poderão ser utilizadas em futuros programas de satélites. Além disso, permite que as equipes formadas sejam constantemente treinadas e a infraestrutura instalada seja constantemente testada e aperfeiçoada.

3.1.2. Programa orbital (PO): TRL 6-8

O programa orbital envolve o uso de satélites de pequeno porte (pico, nanosatélites, etc.) que devem ser colocados à disposição de pesquisadores e alunos das universidades, profissionais de instituições de ciência e tecnologia (ICT) e empresas, para testes e demonstrações de tecnologias e realização de experimentos científicos e tecnológicos. Ele deve ser utilizado também para formar e treinar

recursos humanos (nos níveis de graduação e pós-graduação) e manter ativas equipes científicas e técnicas e infraestruturas construídas. Em geral, esses satélites devem utilizar componentes comerciais [*Commercial off-the-shelf component (Cots)*]. Onde couber, deverão ser utilizadas também plataformas de reentrada atmosférica.

Toda missão científica apoiada por esse programa deve contemplar, necessariamente, pelos menos um item tecnológico de acordo com as prioridades definidas pelo programa de gerenciamento tecnológico do PEB. Será incentivada a industrialização de satélites de pequeno porte a partir de plataformas desenvolvidas nesse programa para aproveitar nichos de mercado competitivos para a indústria nacional.

3.2. Programa de acesso de médios prazo e custo ao espaço (Ampe): TRL 6-9

Esse programa tem como objetivos: 1) proporcionar à comunidade tecnológica nacional oportunidade de realizar testes e desenvolvimentos de tecnologias em ambiente relevante antes de usá-las em uma missão operacional, e 2) proporcionar à comunidade científica nacional oportunidades de abordar problemas que necessitem de dados obtidos a partir do espaço para serem resolvidos.

3.2.1. Programa de missões tecnológicas (MT): TRL 6-8

Esse programa de desenvolvimento tecnológico deve ter como objetivo o estabelecimento de um vigoroso programa de testes de tecnologias em ambiente espacial, como é feito, por exemplo, no programa espacial japonês, que utiliza satélites dedicados para testes tecnológicos⁵. Devem ser oferecidas oportunidades de voo com a utilização de pequenos satélites lançados a cada dois anos ou de satélites de maior porte lançados a cada três ou quatro anos, por exemplo. Essas oportunidades de voo serão oferecidas a institutos de pesquisa, universidades e empresas. Obrigatoriamente, contemplarão apenas o desenvolvimento de tecnologias de interesse do PEB. Deverá ser estabelecida uma programação que faça com que o envolvimento desses atores se dê de forma coordenada fazendo com que os objetivos traçados pelo programa de gerenciamento tecnológico do PEB sejam plenamente alcançados.

3.2.2. Programa de missões científicas (MC): TRL 6-9

O programa de missões científicas não deve ter um objetivo isolado apenas no caráter científico. Ao contrário, esse programa deve levar consigo uma visão estratégica importante, uma vez que, por suas características e seu público alvo, permite que vários objetivos estratégicos do PEB sejam simultaneamente alcançados. Esse programa é uma das formas mais eficientes de incorporar de maneira definitiva o capital humano disponível nas universidades e institutos de pesquisa brasileiros ao PEB, proporcionando treinamento eficaz para as novas gerações de cientistas, engenheiros e técnicos do setor espacial. A exemplo do programa Arbe, as missões científicas do Ampe deverão contemplar itens da lista do programa de tecnologias críticas do PEB.

⁵ <http://global.jaxa.jp/projects/engineering/research/>

O programa MC pode proporcionar a participação brasileira em grandes projetos espaciais internacionais, o que faz com que haja grande possibilidade de absorção e transferência de tecnologias, tanto de uma forma induzida quanto por meio das interações entre cientistas e engenheiros envolvidos nesses projetos. De uma forma geral, essa é uma maneira eficiente de sustentar um programa de desenvolvimento tecnológico. Há várias experiências bem sucedidas de participações brasileiras em missões científicas que se revelaram importantes para o treinamento de recursos humanos em vários níveis e áreas do conhecimento, seja das ciências ou das engenharias.

3.3. Programa de longo prazo de acesso ao espaço (ALPE): TRL 8-9

Esse programa é a forma clássica para acomodar missões de aplicação e missões científicas mais complexas, que sejam de interesse do País. Missões de aplicações, como sensoriamento remoto, e científicas são formas muito eficientes de atrair o interesse de parceiros internacionais que podem contribuir por meio de aportes tecnológicos e com a divisão de custos para o alcance dos objetivos das missões.

3.4. Programa de recursos humanos (RH)

O objetivo desse programa é promover a atração, formação, capacitação e fixação no país (em universidades, centros de pesquisa e indústrias) de recursos humanos para atender às necessidades do PEB. Entre as ações possíveis de serem implantadas, podem ser citadas a criação de um programa de bolsas de pós-graduação específicas para a área espacial, com valores atraentes; a criação de programa de treinamento de especialistas, com ênfase em áreas do conhecimento de interesse do setor espacial e foco em missões de baixo custo, com cronogramas de execução curtos; o apoio a intercâmbios acadêmicos com financiamento de visitas de especialistas estrangeiros a órgãos executores do PNAE e a instituições acadêmicas nacionais; assim como estágios de técnicos brasileiros no exterior e nas instituições executoras. É importante que haja um programa de incentivo de atração e fixação de competências estrangeiras para trabalhar em áreas de interesse do PEB.

Os programas Arbe e Ampe devem ser utilizados especialmente para o treinamento de estudantes de graduação e pós-graduação. Em geral, os alunos de graduação seriam ligados ao programa Arbe e os de pós-graduação ao programa Ampe. O uso dos programas Arbe, Ampe e Alpe pelos profissionais que atuam no setor é uma maneira objetiva de mantê-los constantemente atualizados e motivados e de proporcionar que os seus conhecimentos sejam repassados às futuras gerações.

3.5. Programa de cooperação internacional (CI)

Esse programa deve ter como objetivo acoplar a cada uma das iniciativas anteriores a vertente da colaboração internacional, de forma a acelerar o processo de domínio das tecnologias necessárias para o desenvolvimento pleno do PEB. Deve ser mantida uma atividade constante de análise dos potenciais parceiros internacionais em termos da disponibilidade de tecnologias de interesse do PEB. Para isso, é fundamental que o uso dos serviços providos pelo OTE seja explorado de forma eficiente.

Uma vez definida a necessidade de recursos humanos para o domínio de uma dada tecnologia, o uso dos programas PSO e PO é essencial, uma vez que permite atrair o interesse de diversos países, por meio do oferecimento de oportunidades de voos com objetivos tecnológicos e/ou científicos.

A Figura 8 mostra, esquematicamente, o PDTC e como os recursos humanos seriam empregados nos seus diferentes programas.

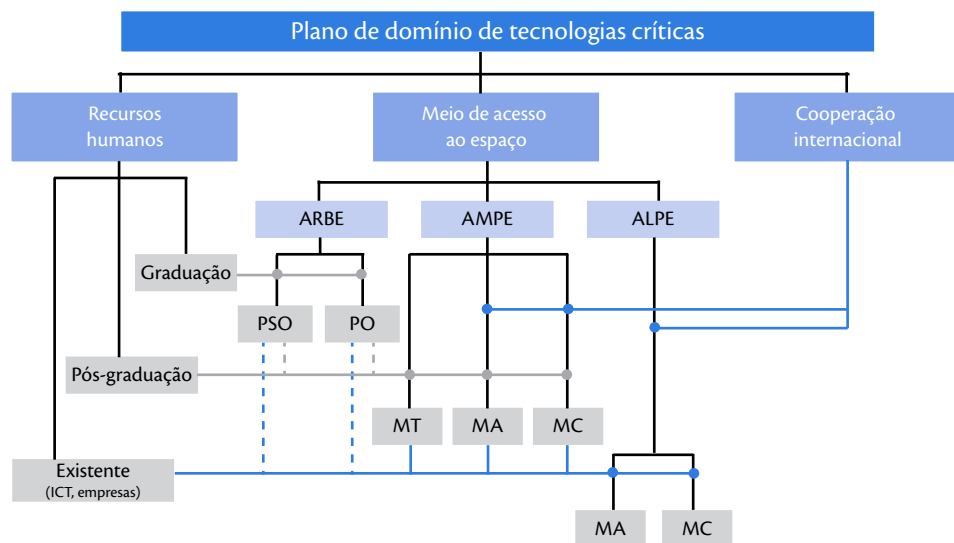


Figura 8. Diagrama esquemático simplificado do Plano de Domínio de Tecnologias Críticas.

3.6. Implantação do PDTC

A implantação do PDTC deve levar em conta o atual estágio de desenvolvimento do PEB e suas necessidades de curto prazo. O objetivo primordial do PDTC é fazer com que o domínio tecnológico do PEB seja nivelado ao restante do mundo em relação ao uso das aplicações espaciais de interesse do País.

Por exemplo, na fase de busca por nivelamento, é natural supor que a maioria dos recursos financeiros e humanos (75%) seja aplicada no desenvolvimento de tecnologias que tenham esse objetivo. Por outro lado, é crucial que as tecnologias já dominadas sejam mantidas, de forma a evitar perda de capacidade tecnológica por falta de ações gerenciais. Assim, é natural supor que entre 5 e 10% dos recursos humanos e materiais sejam direcionados para essas ações.

Levando-se em consideração que tecnologias avançadas podem proporcionar saltos tecnológicos que representem uma mudança de patamar do conhecimento e acelerar o processo de nivelamento tecnológico do PEB, é igualmente natural supor que, em curto prazo, uma aplicação de 10 a 15%

dos recursos nesse objetivo seja uma boa estratégia, de forma a manter a motivação dos recursos humanos e fazer uso eficiente da infraestrutura laboratorial instalada. Uma vez alcançado o nivelamento tecnológico mínimo do PEB com os demais programas do mundo, deve ser feito um esforço para manter as tecnologias dominadas e os recursos humanos constantemente treinados e motivados. Assim, deverão ser investidos mais recursos na busca do domínio de tecnologias avançadas.

Tendo sido estabelecidas as práticas de manutenção das tecnologias dominadas e conquistadas, além das bases gerenciais de domínio de tecnologias avançadas, espera-se que a estratégia de longo prazo seja permeada por uma tendência de maiores investimentos no desenvolvimento de conhecimentos e processos que possam levar à conquista de tecnologias disruptivas. Estas colocariam, de forma definitiva, o PEB em igualdade de competição com os demais programas espaciais do mundo.

É importante notar que, nesse nível, o aumento proporcional da ênfase em cooperação internacional é algo a ser perseguido, uma vez que, via de regra, essa é uma das práticas adotadas por programas espaciais que buscam autonomia e liderança tecnológica. Novamente, é importante ressaltar que cooperações internacionais devem ser estabelecidas tendo como principal objetivo o desenvolvimento e o domínio de novas tecnologias de interesse do Programa Espacial Brasileiro.

4. Conclusão

O uso concomitante das metodologias e ferramenta apresentadas neste trabalho possibilita a definição de ações de domínio tecnológico bastante eficazes. O conhecimento claro do grau de criticidade de uma dada tecnologia e do capital humano disponível no País para desenvolver essas tecnologias, aliado ao uso dos vários programas do PDTC, proporciona um excelente apoio para a definição de rotas tecnológicas objetivas. A figura abaixo representa esse processo.

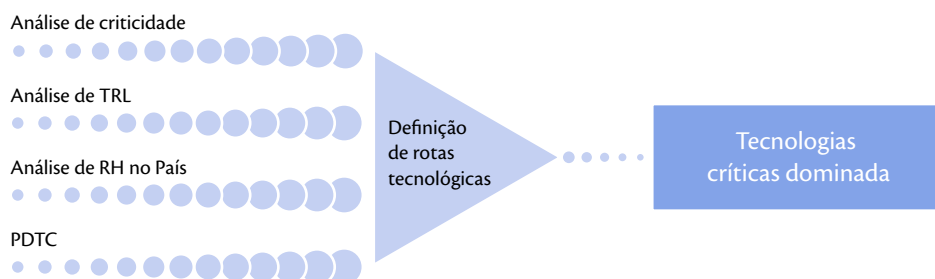


Figura 9. Diagrama esquemático da aplicação das metodologias e ferramenta de busca de RH apresentadas neste trabalho para apoio à definição de rotas tecnológicas.

Referências

- AD HOC COMMITTEE ON NASA/University Relationships. **Space Science Board**. National Academy of Sciences, National Research Council, 1962.
- BILBRO, J. **TRLs and system readiness**. J B Consulting International. Disponível em: <<http://www.jbconsultinginternational.com/Pages/SystemReadinessAssessment.aspx>>. Acesso em: 5 mai 2014.
- BIMBER, B.; POPPER, S.W. **What is a critical technology?** Santa Monica, California, EUA: RAND Corporation, 1994.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Recursos materiais e humanos para o PNAE – Relatório final: Proposta de uma metodologia de avaliação de níveis de maturidade tecnológica para projetos espaciais**. Brasília: 2014.
- _____. **Recursos materiais e humanos para o PNAE – Relatório final: Proposta de uma metodologia de avaliação de criticalidade de tecnologias para projetos espaciais**, 2014.
- CRITICAL space technologies for european strategic non-dependence list of urgent actions for 2012/2013.
- DE ALMEIDA, V.R. **Sensores inerciais fotônicos para aplicações aeroespaciais: nível de maturidade tecnológica**. ECEMAR, 5 set. 2008. (1202RP01 do Curso CCEM).
- DEPUTY UNDER SECRETARY OF DEFENSE FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY. **Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook**. Departament of Defense. 2005.
- EUROPEAN non-dependence on critical space technologies: EC-ESA-EDA list of urgent actions for 2009, 2009.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **Technology readiness levels handbook for space applications**. ESA document TEC-SHS/5551/MG/ap, issue 1, rev.6, Sep. 2008.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Space systems –definition of the Technology Readiness Levels (TRL) and their criteria of assessment**, ISO 16290:2013(E)/ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. **Systèmes spatiaux – Définition des Niveaux de Maturité de la Technologie (NMT) et de leurs critères d'évaluation**, ISO 16290:2013(F), 2013.
- MANKINS, J.C. Approaches to strategic research and technology (R&T) analysis and road mapping. *Acta Astronautica*, v. 51, p. 1-9, 2002.
- _____. **Technology readiness levels**, a white paper, NASA Office of Space Access and Technology, Advanced Concepts Office, April 1995.
- _____. **Technology readiness assessment: a retrospective**. *Acta Astronautica*, v. 65, 2009. NATIONAL critical technologies. 1995. Disponível em: <http://clinton1.nara.gov/White_House/EOP/OSTP/CTI/formatted/AppA/appa.html>.
- NOLTE, W.L. **Did I ever tell you about the whale?, or, measuring technology maturity**, Charlotte, NC : IAP, ISBN 978-1-59311-963-8, 2008.
- SANTOS, B.V.; MARSHAL, 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**. São José dos Campos: INPE, 2013.
- SPACE FOUNDATION. **The Space report 2013**. Washington, DC.: 2013. SPAGNULO, M.; FLEETER, R.; BALDUCCINI, M.; NASINI, F. **Space Program Management - methods and tools**. Springer, 2013.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Technology readiness assessment guide**. Washington, DC : s.n., 2009. DOE G 413.3-4.