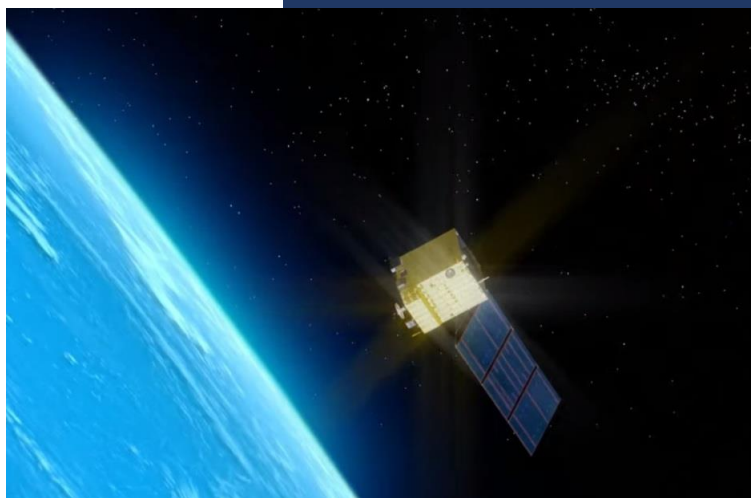


**Manual de aplicação da  
IMATEC para avaliação de  
projetos de caráter  
tecnológico (v 0.1)**

# Relatório



AGENCIA ESPACIAL BRASILEIRA

2017

<i>Autor</i>	<i>Cargo</i>	<i>Data finalização</i>	<i>Comentário e assinatura</i>
Ademir Xavier Jr	Tecnologista - DSAD	6/2/2017	Primeira versão

## Sumário

1. Introdução .....	3
1.1. Justificativas para adoção do IMATEC.....	4
2. Controle de risco à luz da IN 001.....	4
2.1. Ferramenta IMATEC para controle de risco de projetos de cunho tecnológico .....	7
2.2. Exemplo e justificativa de projetos internacionais .....	7
2.3. Principais causas de atraso em projetos.....	8
3. Conceitos fundamentais.....	9
4. O IMATEC .....	12
4.1. Resumo dos níveis IMATEC.....	12
4.2. Sobre quem faz a avaliação. ....	15
4.3. A relação entre o IMATEC e as metas de cada fase de um projeto ou missão. ....	15
4.4. Árvore hierárquica de questões para avaliação do índice .....	16
4.5. As dimensões forma, integração e função para descrição de um componente .....	17
4.6. Processo de geração da avaliação .....	18
4.7. Campos descritivos comuns.....	19
4.8. Questões específicas auxiliares para a determinação do índice no nível de sistema/produto 19	
4.9. Questões específicas auxiliares para a determinação do índice no nível de subsistema.....	20
4.10. Questões específicas auxiliares para a determinação do índice no nível de componente ou montagem.....	21
4.11. Tabela com definição, descritivo e local de cada índice .....	21
4.12. Diagrama esquemático das etapas do processo de indexação.....	23
5. Anexo A Questões auxiliares para identificação de maturidade tecnológica para hardware, software e manufatura (todos os índices). ....	24
5.1. IMATEC 1 .....	24
5.2. IMATEC 2 .....	25
5.3. IMATEC 3 .....	26
5.4. IMATEC 4 .....	27
5.5. IMATEC 5 .....	28
5.6. IMATEC 6 .....	30
5.7. IMATEC 7 .....	31
5.8. IMATEC 8 .....	32
5.9. IMATEC 9 .....	34
6. Referências .....	35

## 1. Introdução

Quando uma tecnologia é inventada ou conceituada, ela não pode ser aplicada imediatamente. Ela deve inicialmente ser experimentada, refinada e submetida a testes realísticos. Uma vez validada e maturada, ela pode ser incorporada a um sistema. O Índice de Maturidade Tecnológico - IMATEC (baseado no original em inglês *Technology Readiness Level* – TRL inicialmente usado pela NASA) é um índice que AEB através da DSAD (Diretoria de Satélites, Aplicações e Desenvolvimento) propõe para medir a maturidade e usabilidade de uma tecnologia em evolução, notadamente ligada a projetos espaciais. Sua inspiração, o índice TRL, criado em 1974 por Stan Sadin inicialmente com sete níveis, passou a ser formalmente utilizado pela NASA em 1989. Mais tarde, a escala foi aperfeiçoada para nove níveis e, atualmente, é utilizada em diversos ramos tecnológicos para avaliação de mercado, gestão de risco e as decisões de financiamento em diversos países como Estados Unidos, Canadá, Reino Unido e países Europeus. O IMATEC em seu nível fundamental descreve a maturidade de certa tecnologia em relação ao seu ciclo tecnológico e se propõe a traduzir essa escala para avaliação de propostas de projetos e supervisão de projetos em andamento sob responsabilidade da AEB. Sua proposição ocorre no âmbito da Instrução Normativa IN 001 (CGU/MP 2016) que exige a definição e adoção de controles de risco por parte de instituições governamentais, sendo aqui proposta no acompanhamento das divisões finalísticas da AEB.

A determinação do IMATEC para um determinado produto ou sistema é um passo de vital importância no caminho de um programa ou projeto de sucesso, que tenha como objetivo aprimorar um produto ou sistema ou desenvolvê-lo. O índice IMATEC tem uma dimensão geográfica e política uma vez que o acesso ao conhecimento científico, técnico e industrial são afetados por barreiras de comunicação e proteção de propriedade intelectual. Pode-se imaginar que os níveis mais baixos dele; i. e., 1, 2 e 3 (ver Seção 4.11), são compartilhados e acessíveis a quase toda a comunidade de desenvolvimento. Isso se dá pela política de revisão por pares e de publicação em revistas científicas que dissemina e uniformiza o conhecimento tecnológico. Ainda assim, nesse nível, esse tipo de conhecimento pode estar protegido por patentes e outros dispositivos similares.

Os níveis intermediários do IMATEC, 4 e 5, normalmente desenvolvidos dentro de institutos de pesquisa públicos ou grandes instituições de pesquisa privada têm dimensão geográfica limitada, isto é, uma instituição de um país ou de uma região pode ter acesso a pesquisa de IMATEC intermediário desenvolvida em um instituto próximo através de parcerias que definem o que pode ser trocado em termos de conhecimento, ou de contratação de especialistas envolvidos previamente nessa pesquisa. O mesmo acesso é vedado a uma empresa estrangeira ou afastada dos grandes centros de desenvolvimento tecnológico. Conforme o tipo de tecnologia, pode-se assim falar em nível IMATEC para uma organização, um Estado ou um país.

Os níveis mais altos do IMATEC, acima de 6, são relativos a produtos específicos, e o controle e posse desse nível é vital para a competitividade e sobrevivência das empresas que os comercializam, o que tem impactos certos na economia dos países que as abrigam. É possível imaginar transferência de tecnologia em nível de desenvolvimento de produto, entretanto, isso é relativamente difícil, pois o conhecimento para fabricação e evolução de um produto caracterizam demasiadamente a organização que o criou, não sendo comum que tal conhecimento encontre-se disseminado.

Nesse contexto, a aplicação de uma metodologia de determinação do IMATEC terá como foco o contexto tecnológico específico das organizações parceiras, isto é, aquelas que se dedicam a pesquisa e desenvolvimento espacial no contexto da nova norma para gestão e controle de risco. No que segue abaixo, o que está sublinhado representa importantes princípios que fundamentam este manual.

### 1.1. Justificativas para adoção do IMATEC

O maior benefício da adoção do índice é a melhor compreensão das incertezas de um projeto e consequente redução do risco. É possível identificar uma correlação entre a diferença entre o tempo necessário para a realização de um projeto e o tempo estimado e o índice de maturidade tecnológica. Quanto maior o nível de maturidade tecnológica dos componentes que fazem parte de um determinado produto em desenvolvimento, menores são os atrasos no projeto. (DUBOS, 2008). Ademais, o nível é importante para identificar quais áreas demandam maiores investimentos para se alcançar o nível de maturidade necessária visando determinado alvo de projeto.

De forma geral, dentre os benefícios de adoção de um índice de maturidade tecnológicas estão:

- A existência de uma ontologia para a avaliação dos componentes tecnológicos;
- A facilidade e sistematização na aplicação do índice;
- Sua aplicação sistemática permite que requisitos sejam progressivamente estabelecidos de forma a estarem de acordo com os recursos disponíveis para certo nível de risco aceitável;
- A possibilidade de reavaliação do índice em diversos estágios do projeto com fins de avaliação de projeto;
- Avaliação de status de projeto e dos riscos inerentes a sua execução, em termos da determinação de seu estágio de maturidade (FERNANDEZ, 2010).

Além disso, a metodologia de avaliação do índice pode ser feita para outros contextos além da área espacial, como, p.ex., o trabalho de desenvolvimento tecnológico de outras agências governamentais (ANA – Agência Nacional de Águas, ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, ANATEL etc). Entretanto, a adoção dessa metodologia para outras áreas deve sofrer adaptação quanto ao tipo de produto final, a se observar o contraste de desenvolvimento que existe entre “hardware” versus “software”, as peculiaridades de conhecimento científico de cada área etc. Sistemas espaciais requerem o grau máximo de cuidado na aplicação da abordagem por conta dos riscos existentes: necessidade de coordenação crítica entre sistemas de hardware e software, existência de sistemas que lidam com manutenção de processos vitais (e. g., sistemas de apoio a vida de astronautas em órbita), ambiente de aplicação final com características muito diferentes do ambiente de desenvolvimento (espaço x ambiente terrestre) e, finalmente, necessidade de coordenação entre diversos tipos de segmento: solo, aéreo e espacial para efetivo desempenho da missão final.

No objetivo da aplicação do índice, vivem também outros tipos de risco, principalmente presentes pela precariedade dos controles existentes, o que é o tem para a próxima seção.

## 2. Controle de risco à luz da IN 001

Com relação a IN 001 (CGU/MP 2016) observa-se que:

- Traz definições importantes para a questão do risco em seu Art. 2 Cap. I;
- Traz requisitos para implementação dos controles de risco conforme o Art. 3, no Cap. II; requisitos e fundamentos no Art. 8, Seção I; requisitos complementares para a estrutura dos controles internos no Art. 11 da Seção III; requisitos para a política de gestão de riscos na Seção IV, Art. 17 e trata de requisitos para o sistema de governança na Seção I do Cap. IV, Art. 21;
- Trata dos Objetivos dos controles internos na Seção II, Art. 9-10;

Em particular, no Art. 18, estão bem definidos os tipos de risco a que órgãos e entidades da administração (o que não se aplica exclusivamente aos públicos) estão sujeitos:

- Risco operacional;

- Risco de Imagem ou reputação da entidade (agência);
- Risco legal;
- Risco financeiro e orçamentário;

Entretanto, a IN 001 **não estabelece os mecanismos ou metodologias** através das quais seria possível implementar um processo de controle de risco, que é escopo de um trabalho de supervisão e fiscalização de contratos com entregáveis de base tecnológica. Obviamente, conforme a própria norma ISO 31000:2009 admite, não é possível definir esses controles ou método de implementação sem considerações específicas da missão da organização, sua razão de existir e contexto de existência.

Embora a norma forneça diretrizes genéricas, ela não pretende promover a uniformidade da gestão de riscos entre organizações. A concepção e a implementação de planos e estruturas para gestão de riscos precisarão levar em consideração as necessidades variadas de uma organização específica, seus objetivos, contexto, estrutura, operações, processos, funções, projetos, produtos, serviços ou ativos e práticas específicas empregadas. (ver “Escopo”, ISO 31000:2009, p. 1). Portanto, um dos objetivos deste manual é propor um método ou processo pelo qual se possa aprimorar os controles na AEB no que tange a projetos espaciais, de cunho altamente tecnológico, tendo como foco suas características fundamentais.

No estabelecimento de controles de risco de projetos, em conformidade com o objetivo da IN 001, é importante utilizar métodos de avaliação e controle, todos eles ligados à gestão de projetos. Esses métodos estão descritos nas práticas bem estabelecidas, como é o caso do PMI (2013), e que determinam a necessidade de um plano de gerenciamento de risco. Esse plano é a própria ferramenta de controle e tem como entradas as documentações de início de projeto, o plano de gerenciamento de desenvolvimento, a identificação e caracterização das partes interessadas e informações sobre aspectos da cultura ou contexto organizacional. Segundo o PMI (2013), o gerenciamento de risco é, por si, um processo organizacional que é formado pelos seguintes subprocessos:

- *Escrita do plano de gerenciamento de risco*: documentar os processos que conduzem as atividades de gerenciamento de risco em um projeto;
  - *Identificação de riscos*: processo que determina quais riscos podem afetar o projeto e documentação de suas características;
  - *Realizar análise qualitativa de risco*: em projetos, é o processo de priorização de riscos para avaliações subsequentes, e envolve determinar chances de ocorrência (ou estimativas de ocorrência);
  - *Planejar respostas aos riscos*: é o processo de se desenvolver opções ou ações para a redução de ameaças ou determinação de oportunidades de mitigação de riscos;
  - *Controlar riscos*: é o processo de se implementar planos de resposta ao aparecimento de riscos, identificação de novas ameaças e avaliação contínua da efetividade dos controles estabelecidos ao longo do projeto.
- Ainda segundo o PMI (2014, Capítulo 11), a tarefa de identificação de risco pode ser implementada por meio de diversas técnicas que envolvem:
    - *Revisão da documentação*: o histórico de atividades realizadas pela instituição na execução de projetos. Se a documentação contiver informação pertinente, as “lições aprendidas” com o passado são importantes fontes de detecção de risco. No caso de projetos, essa documentação é bastante relevante, dada as dificuldades intrínsecas do objeto de entrega, que varia de projeto a projeto;
    - *Uso de técnicas de levantamento de informação*: essencialmente, elas envolvem a realização de reuniões de “tempestade mental” entre integrantes do time de projeto, mas, principalmente, com pessoas que não façam parte dele e que

tenham outra formação (uso de um time multidisciplinar); uso de “entrevistas” feita aos participantes do projeto, com questionário especificamente voltado para a identificação de ameaças; o uso da técnica “Delphi” como meio de se chegar a um consenso entre especialistas: um facilitador faz circular um questionário sobre as possíveis ameaças a um projeto que é respondido, em uma primeira rodada, pelos especialistas. Esse questionário é depois compartilhado entre os especialistas de forma a se levantar um consenso e preservar as respostas da influência pessoal de cada um;

- *Criação, revisão e atualização de listagens de risco:* com base nas técnicas apresentadas anteriormente e, principalmente, revisão da documentação com histórico de ameaça e riscos não mitigados, uma listagem exaustiva dos possíveis riscos é criada. O time de projeto pode explorar, via revisão, itens que ainda não estejam contemplados ou, da mesma forma, retirar aqueles que não se aplicam à situação específica do projeto;
- *Análise de assunções:* todo e qualquer projeto, quando criado, parte de terminadas hipóteses ou condições iniciais que são assumidas como verdadeiras e existentes em todas as fases do projeto. Uma parte considerável do risco associado a projetos está ligada a quebras nessas assunções. Assim, um instrumento de controle de risco em projetos é analisar com cuidado a validade dessas hipóteses e as condições em que deixam de ser válidas. No que tange a projetos espaciais, que são escopo final das atividades da AEB, essas hipóteses são utilizadas para se definir os chamados requisitos de projeto que devem especificar e definir completamente as características e propriedades desejáveis da entrega a ser feita (em geral, um satélite, um lançador ou uma infraestrutura de apoio ao programa espacial). Por exemplo, ao se apoiar o desenvolvimento de um projeto plurianual deve-se prever a existência de orçamento continuado para sua execução. Um plano de controle de risco deve prever ações caso essas assunções deixem de ser verdadeiras em algum momento do projeto etc;
- *Técnicas de diagramação de riscos:* incluem uso de diagramas de causa-efeito (como são as cartas de “espinha de peixe” ou Ishikawa); fluxograma de processos: particularmente úteis na determinação de riscos ao longo da cadeia de atividades, que podem ser usados em projetos, mas são particularmente usados na identificação de riscos e suas causas em processos; diagramas de influência: uma variedade de diagrama de fluxo que mostra as relações causais entre eventos meio e sua ordenação temporal rumo a realização dos resultados;
- *Análise SWOT:* análise consolidada na literatura que busca levantar e avaliar as forças, fraquezas, oportunidade e ameaças associadas à execução de um projeto.

A ferramenta IMATEC deve ser usada em todos os estágios como sistema de avaliação de objetivos tecnológico e manejo de risco, ou seja, em projetos de pesquisa e desenvolvimento que resultem em produtos ou entregáveis tangíveis. Ela, portanto, se insere como ferramenta de controle de risco, podendo servir para indicar em que partes de um determinado sistema ou dispositivo de uso espacial estão os maiores riscos. Entretanto, o IMATEC não se aplica muito bem a desenvolvimentos de

pesquisa pura<sup>1</sup>, muitas vezes associado a comprovação ou elucidação de leis fundamentais ou princípios da Natureza.

### **2.1. Ferramenta IMATEC para controle de risco de projetos de cunho tecnológico**

A definição de projeto é de grande relevância para o diagnóstico dos riscos associados aos processos da AEB, já que, como parte de sua missão institucional, ela deve executar e fazer executar o Plano Nacional de Atividades Espaciais (PNAE, ver Incisos I, V, VI no Art. 2, Cap. I do Regimento Interno da AEB, MCT 2003) como processo finalístico, cujo meio de realização é através de projetos espaciais. Portanto, além das medidas de risco associadas aos processos internos da AEB, uma resposta acurada ao subitem “e” do Art. 17-II da IN 001 (CGU/MP 2016) deve também prever metodologias e ferramentas para o apoio à gestão de projetos, entendendo-se esse termo como o conjunto de “boas práticas” associadas à execução de projetos com o fim de se minimizar seus riscos associados.

Grosseiramente pode-se entender, portanto, que a AEB deva funcionar como um órgão que possui seus macroprocessos internos de apoio e gerenciais com o fim principal de se executar e gerir um portfólio de projetos na área espacial. O gerenciamento de risco de portfólios é uma atividade formidável em gerência de projetos e exige alto grau de competência técnica do gestor, considerando todas as inúmeras “variáveis ambientais” que influenciam negativamente a execução de cada componente do portfólio.

Além disso, o uso da ferramenta IMATEC funciona como uma interface entre o corpo técnico e o gestor, permitindo a precisa caracterização do estágio tecnológico em que se encontra um determinado “produto” a ser gerado por um projeto, facilitando a tarefa de geração de históricos e lições aprendidas, tornando o desenvolvimento tecnológico menos dependente da disponibilidade de um engenheiro ou técnico no exato momento de sua avaliação. Na etapa de julgamento de propostas tecnológicas, o índice IMATEC permite julgamento ágil e tempestivo quanto ao grau de pertinência e relevância de determinado desenvolvimento proposto. Assim, propostas razoavelmente ambiciosas podem ser corretamente identificadas e localizadas na cadeia de desenvolvimento interna existe em uma rede de colaboradores ou instituições de pesquisa (como é o caso do SINDAE por exemplo), reduzindo eventuais riscos advindos de uma aceitação não fundamentada de sua execução.

### **2.2. Exemplo e justificativa de projetos internacionais**

No site da NASA, podemos encontrar um exemplo<sup>2</sup> de descrição de missão que usa a terminologia do índice TRL, base do IMATEC:

CubeSat Hydrometric Atmospheric Radiometer Mission: The Jet Propulsion Laboratory (JPL) and Ames Research Center (ARC) are partnering in the CubeSat Hydrometric Atmospheric Radiometer Mission (CHARM), a water vapor radiometer integrated on a 3U CubeSat platform, selected for implementation under NASA Hands-On Project Experience (HOPE-3). CHARM will measure 4 channels at the 183 GHz water vapor line, subsets of measurements currently performed by larger and more costly spacecraft (e.g. AMSU-

<sup>1</sup> A menos, por exemplo, no desenvolvimento de um equipamento a fim de verificar ou corroborar a atuação ou funcionamento de um princípio da Natureza.

<sup>2</sup> <https://www.nasa.gov/centers/ames/cct/technology/stp/crosscutting/charm-hope.html>



B, ATMS and SSMI/S). While flying a payload that supports Science Mission Directorate science objectives, CHARM will provide a hands-on opportunity to develop technical, leadership, and project skills for the team members. CHARM will furthermore advance the technology readiness level (TRL) of the 183 GHz receiver subsystem from TRL 4 to TRL 6 and the CubeSat 183 GHz radiometer system from TRL 4 to TRL.

De acordo com MANDELBAUM (2007), uma revisão dos programas do Departamento de Defesa Americano mostrou em 2005 que:

- Programas que começaram usando tecnologia madura tiveram um crescimento de custo geral de 9% e atrasos de cronograma médio da ordem de sete meses, com 1% de aumento de custo de aquisição;
- Já programas que não se iniciaram a partir de tecnologias maduras, aumentaram em média 41% em custo geral, com atrasos médios da ordem de treze meses de cronograma e aumento de 21% de custo de aquisição.

Figuras semelhantes ocorrem com avaliações realizadas em 2006. Portanto, quanto maior o índice de maturidade dos componentes usados em projetos, tanto menor serão os riscos envolvidos tanto no aumento dos custos gerais, de aquisição e atrasos de cronograma. Isso acontece porque o risco se reduz à medida que um projeto avança, de forma que, se fosse possível usar completamente componentes pré-existent em um dado projeto, o risco seria consideravelmente menor do que em um projeto que tenha que desenvolver todos os componentes. O fundamento dessa regra está na lei das probabilidades segundo a qual a chance de falha de um determinado sucesso é diretamente proporcional ao produto das probabilidades de falha de cada um dos seus componentes. Componentes já desenvolvidos tem baixa taxa de falha, portanto, quanto maior o uso deles em um projeto, tanto menor será a chance de falha do projeto como um todo.

### 2.3. Principais causas de atraso em projetos

Vale a pena ressaltar as causas mais comuns associadas ao atraso e consequente insucesso de projetos ou programas de desenvolvimento tecnológico. Essas causas podem em parte serem mitigadas pela adoção da metodologia IMATEC. Em linhas gerais, podemos citar:

- Requisitos são estabelecidos sem a menor noção das dificuldades e custos associados para que sejam atingidos;
- Aplicação de sistemas “herdados” para “curto-circuitar” o desenvolvimento, sendo que tais sistemas *não foram projetados* para o ambiente de operação final do entregável de projeto;
- “Descasamento” entre os requisitos de projeto e a tecnologia necessária para atender esses requisitos ou, de outra forma, o projeto é implementado (iniciado) sem que haja tecnologia madura o suficiente para atender todos os seus requisitos;
- O tempo de desenvolvimento alocado no cronograma de projeto é insuficiente para implementar qualquer coisa, exceto a tecnologia já existente que não atende aos requisitos;
- Erros de julgamento alocam recursos insuficientes no projeto para o desenvolvimento tecnológico;
- Desenvolvimento tecnológico não cabem muito dentro de prazos, pois revoluções tecnológicas não podem ser “encomendadas”.

Por essas razões, é extremamente importante que a metodologia de avaliação tecnológica seja aplicada *no começo de um projeto ou programa*. Também é importante que ela seja periodicamente aplicada *a todos os ciclos de desenvolvimento*. As informações de entrada de cada estágio de

desenvolvimento variará conforme a fase em que o projeto estiver. Deve existir uma relação entre o estabelecimento do índice para uma determinada fase e os requisitos do projeto, esses não ultrapassando o limite do razoável que é esperado como função de uma determinada tecnologia e seu estágio de maturação.

### 3. Conceitos fundamentais

Nesta seção, apresentamos as definições de alguns termos fundamentais usados na apresentação do índice IMATEC.

**Tecnologia:** “aplicação prática do conhecimento de forma a criar a capacidade de fazer algo totalmente novo ou de um jeito completamente novo. Tecnologia difere de **pesquisa científica**, que implica na descoberta de conhecimento novo de onde se deriva a tecnologia, e da **engenharia** que é o uso da tecnologia derivada desse conhecimento para resolver problemas técnicos específicos”. (Plano Tecnológico da NASA).

**Desenvolvimento tecnológico** aplicação de conhecimento científico para se fazer algo completamente novo ou de maneira completamente nova e, como tal, que deve ser evitado a qualquer custo na realização de um projeto ou programa que tenha cronograma e custos fixos. A fim de se compreender se desenvolvimento tecnológico é necessário e, subsequentemente, quantificar o custo, cronograma e risco associados a ele, é necessário avaliar sistematicamente o *nível de maturidade de cada sistema, subsistema ou componente* em termos do ambiente de arquitetura e operação. Avalia-se inicialmente o que está no caminho do desenvolvimento para avançar a maturidade até o ponto onde ele possa ser incorporado com sucesso no custo, cronograma e vínculos de eficiência. Daí a importância de se ter uma maneira de qualificar a maturidade tecnológica.

Engenharia de sistemas é frequentemente “curto-circuitada” ao se utilizar **sistemas herdados** porque se acredita que tais sistemas foram “provados”. Entretanto, um sistema herdado incorporado a uma arquitetura diferente e que opere em um ambiente diverso daquele para o qual ele foi projetado exige certamente modificações que não estão ao alcance da experiência anterior<sup>3</sup>. Portanto, deve-se considerar que se está diante de novo desenvolvimento tecnológico. De fato, a regra para a avaliação do nível de maturidade tecnológico de sistemas herdados é que suas maturidades sejam atribuídas ao nível máximo 5 até que uma análise mais detalhada seja feita para justificar o uso de um nível superior.

#### Projeto:

É uma realização temporária feita para criar um produto único, serviço ou resultado. A natureza temporária indica que um projeto tem um começo e um fim bem definidos. O fim é alcançado quando os objetivos do projeto foram atingidos ou quando o projeto é terminado por constatar-se que esse fim não pode ser atingido. Pode também ser terminado quando o cliente assim o quer. (PMBOK, 5ª Edição, PMI 2013).

Um projeto resulta em:

- Um **produto** que pode ser um componente de outro item, a melhoria de um item ou o próprio item;
- Um **serviço** ou capacidade de se manter um serviço;
- Uma **melhoria** em um produto ou serviços já existentes;
- Um **resultado** tal como um documento, artigo ou relatório (um projeto de pesquisa que desenvolve ou cria conhecimento novo com outro fim).

<sup>3</sup> Isto é, não representam uma aplicação trivial do que já foi feito.

#### Requisitos de projeto:

Condições ou capacidades que devem ser obedecidas pelo projeto ou pelo produto, serviço ou resultado (entregável) do projeto a fim de satisfazer um acordo ou qualquer outra especificação formalmente imposta. (PMBOK, 5ª Edição, PMI 2013)

Requisitos podem ser agrupados nos seguintes tipos:

- De **negócio**: associados às necessidades de alto nível de uma organização;
- Das **partes interessadas** (stakeholders): dizem respeito as suas necessidades;
- De solução:
  - **Funcionais**: ou sobre como o produto funciona;
  - **Não funcionais**: confiabilidade, segurança, nível de serviço, suportabilidade etc;
- De **transição**: descrevem requisitos temporários em apoio à transição de serviço/produto do estágio atual até um futuro;
- De **projeto**: dizem respeito a como o projeto deve ser executado;
- De **qualidade**: condições ou critérios necessários para se validar a entrega do projeto ou que se considera o projeto como de sucesso.

**Verificação**: demonstração, por meio de testes, que um dispositivo satisfaz aos requisitos funcionais e ambientais (isto é, foi construído direito?).

**Validação**: determinação de que o dispositivo foi construído de acordo com a *totalidade de seus requisitos prescritos* por qualquer método apropriado. Em geral, usa-se uma matriz de verificação de requisitos e métodos de verificação (isto é, foi construída a coisa certa?).

#### 3.1.1. Definições de ambientes

**Ambiente de laboratório**: um ambiente que não se assemelha completamente ao ambiente a ser encontrado pelo sistema, subsistema ou componentes (hardware/software) durante a operação pretendida. Testes no ambiente de laboratório são apenas para se demonstrar os princípios subjacentes de desempenho técnico (funções), sem referência ao impacto sobre o ambiente.

**Ambiente relevante**: nem todos os sistemas, subsistemas e/ou componentes precisam ser operados no ambiente operacional a fim de tratar de forma satisfatória os requisitos de margem de desempenho. Portanto, o ambiente relevante é um subconjunto específico do ambiente operacional que é necessário à demonstração dos aspectos críticos “sob risco” da performance do produto final em um ambiente operacional. Normalmente o ambiente relevante é mais demandante que o real de modo a absorver incertezas nas condições de funcionamento.

**Ambiente operacional**: ambiente onde o produto final operará. No caso de hardware/software de voos espaciais, ele é o espaço. No caso de dispositivos de solo ou aéreos que não se destinam a voos espaciais, serão os ambientes definidos no escopo das operações. Para software, o ambiente será definido pela plataforma operacional ou sistema operacional de software.

#### 3.1.2. Termos específicos

**Configuração de missão**: desenho de sistema/arquitetura final do produto que será usada no ambiente operacional. Se o produto é um componente/subsistema, então ele deve estar integrado ao sistema real na configuração de fato da operação.

**Integração**: combinação e coordenação de componentes separados em uma unidade única que faz a interface entre a interação compatível de várias tecnologias conjuntamente.

**Modelo de desenvolvimento ou modelo de teste de desenvolvimento**: série de unidades construídas para se avaliar os vários aspectos de forma, integração, função ou quaisquer combinações

dessas. Tais unidades podem ter alguns aspectos de alta confiabilidade, mas, em geral, cairão na categoria de protótipo de sistema.

**Modelo de engenharia** (IMATEC 6 – IMATEC 8): unidade em escala real de alta confiabilidade que demonstra aspectos críticos dos processos de engenharia envolvidos no desenvolvimento de uma unidade funcional. Ele é capaz de demonstrar função, forma, integração ou qualquer combinação dessas em uma escala que represente aquela da operação do produto final em seu ambiente próprio. Unidades de teste de engenharia devem ser bastante semelhantes ao produto final (hardware/software) tanto quanto possível e são construídas e testadas de forma a se ter confiança que o desenho funcionará no ambiente esperado. Em alguns casos, a unidade de engenharia tornar-se-á o sistema de pré-voo ou produto final, assumindo-se que monitoramento adequado foi feito, de seus componentes ou da manipulação do hardware.

**Modelo de massa** (IMATEC 5): hardware não funcional que demonstra a forma e/ou a integração para uso em interface de teste, manipulação ou ancoragem modal.

**Modelo de prova** (IMATEC 6): hardware construído para validação funcional até o ponto de ruptura, usualmente associado com sistemas fluidos, de pressão, vibração, cargas de força, extremos ambientais e outros estresses mecânicos.

**Modelo em subescala** (IMATEC 5 – IMATEC 7): hardware demonstrado em escala menor para redução de custo de tratamento de aspectos críticos do sistema final. Se construído na escala adequada ao tratamento da eficiência do sistema final, ele se torna um protótipo.

**Prova de conceito:** demonstração analítica ou experimental de conceito de hardware/software que pode ou não ser incorporado ao desenvolvimento subsequente ou a unidades operacionais.

**Protótipo** (breadboard, IMATEC 5 – IMATEC 6): unidade de confiabilidade média, que tipicamente tenta fazer uso tanto quanto possível de hardware/software operacional e que dá início ao tratamento de questões de escala associadas ao sistema em operação. Não tem pedigree de engenharia em todos os aspectos, mas é estruturado de forma a ser capaz de operar em um ambiente simulado operacional a fim de se avaliar o desempenho de funções críticas.

**Modelo de desenvolvimento** (breadboard, IMATEC 4): unidade de baixa confiabilidade que apenas demonstra funcionalidade, sem respeito a forma ou integração no caso de hardware, ou plataforma, no caso de software. Frequentemente, ela usa componentes comerciais e/ou ad hoc e não tem como objetivo fornecer informação definitiva relativa ao desempenho operacional.

**Prova de voo** (IMATEC 9): hardware/software que é idêntico ao hardware/software que foi operado com sucesso na missão espacial.

**Unidade de protótipo** (IMATEC 6 – IMATEC 7): unidade de protótipo que demonstra a forma (formato e interfaces), integração (deve estar em escala ideal para tratar problemas críticos de tamanho real) e função (capacidade de desempenho completo) do hardware final. Pode ser considerado como o primeiro modelo de engenharia. Não tem, porém, pedigree de engenharia ou dados de apoio de uso fora do ambiente controlado de laboratório, exceto nos casos quando um ambiente específico é requerido para possibilitar a operação funcional, incluindo o espaço. Tanto quanto possível, ele é idêntico ao hardware/software de voo e construído de forma a se testar os processos de manufatura e teste em escala apropriada ao tratamento das questões críticas de escala real.

**Modelo de Engenharia** (IMATEC 8): hardware de voo que é testado a um nível que demonstre as margens desejadas, particularmente aquelas que expõem questões de estresse de fadiga, tipicamente no intervalo de 20 a 30%. Algumas vezes isso significa testar até se ter uma falha. Testes extremos são feitos geralmente a + 6dB (BILBRO, 2007) acima do máximo esperado durante 3 minutos em todos os eixos para choque, acústica e vibração; vácuo térmico 10 C além do aceitável durante 6 ciclos e 1.25 vezes a carga estática para voos não tripulados.

**Modelo de Proto-Voo** (IMATEC 8 - IMATEC 9): hardware construído para a missão de voo que inclui lições aprendidas do modelo de engenharia, mas onde nenhum modelo de qualificação foi construído para reduzir custo. Entretanto, ele é testado para aumentar os níveis de aceitação ambiental. Torna-se o artigo de voo da missão. Uma tolerância de risco mais alta é aceita com compromisso. Níveis chave de testes de proto-voo são idênticos aos do Modelo de Engenharia, no entanto, o tempo é normalmente reduzido de 3 para 1 minuto, e mesmo isso não é regra.

**Unidade de Voo** (IMATEC 8 – IMATEC 9): hardware/software idêntico a outro da mesma série (Modelo de Engenharia ou Proto-Voo), que tenha sido testado em níveis de qualificação na mesma aplicação. O Unidade de Voo pode ser testada em níveis de voo, para detecção de problema de fabricação, ou nem testada caso a qualidade do processo de fabricação seja considerada suficientemente alta.

**Nível de Voo:** Nível de teste igual ao maior nível experimentado por uma amostra representativa dos casos esperados no Ambiente Operacional. O nível de voo pode referir-se a qualquer grandeza passível de ser testada ou avaliada por simulação como: vibração mecânica, temperatura de funcionamento, energia de choque etc. Por exemplo: em 99,99% dos cenários possíveis, o tubo central experimentará menos que  $40\text{m/s}^2$  de aceleração, o nível de aceleração de voo para esse equipamento é  $40\text{m/s}^2$ . Unidades de Voo quando testadas o fazem em nível de qualificação.

**Nível de qualificação:** Nível acima do nível de voo criado pela multiplicação deste por um coeficiente de qualificação. Equipamentos de pequenas séries, como os espaciais, são projetados para aguentarem esforços em nível de qualificação. Unidades de Proto-Voo e Modelos de Engenharia são testados em Nível de Qualificação.

## 4. O IMATEC

### 4.1. Resumo dos níveis IMATEC

No que segue, apresentamos uma descrição (como definição) crescente dos níveis que caracterizam o índice. Esse é dado na forma de um número único que descreve e caracteriza exhaustivamente o nível de maturidade tecnológico de um determinado item em desenvolvimento ou comercialização. É importante atentar para a caracterização de cada nível, já que de sua precisa associação depende o sucesso da aplicação da metodologia. O IMATEC é descrito pela série de níveis:

1. **Princípio básicos observados e reportados.** Transição da pesquisa científica (acadêmica) para aplicada. Características essenciais e comportamentos do sistema e arquiteturas definidas. As ferramentas descritivas ainda são formulações matemáticas ou algoritmos.
2. **Formulação de conceito tecnológico ou aplicação.** Pesquisa aplicada. Teoria e fundamentos científicos estão concentrados em áreas de aplicação específica para definir um conceito. Características da aplicação são descritas. Ferramentas analíticas são desenvolvidas para análise e simulação da aplicação.
3. **Desenvolvimento de funções críticas experimentais e analíticas e/ou prova de conceito característica.** Validação de prova de conceito. P&D ativo é iniciado com estudos analíticos e de laboratório. Demonstração de factibilidade técnica usando prototipagem de laboratório ou em campo, que é exercitada usando dados representativos.
4. **Validação de componente/subsistema em ambiente de laboratório.** Implementação e teste de prototipagem autônoma (standalone). Integração de elementos tecnológicos. Experimentos em problemas de escala real ou conjunto de dados.
5. **Validação de sistema/subsistema/componente em ambiente pertinente.** Através do teste de protótipos em ambiente representativo da aplicação. Elementos tecnológicos básicos são

integrados com elementos de apoio razoavelmente realísticos. Implementação de protótipos em conformidade com o ambiente alvo e suas interfaces.

6. **Modelamento de sistemas/subsistemas ou demonstração de protótipos em ambientes relevantes ou de ponta a ponta** (solo e espaço). Implementação de protótipos em problemas de escala real, parcialmente integrado a sistemas pré-existentes. Documentação disponível de forma limitada. Demonstração de factibilidade de engenharia em aplicações do sistema real.

7. **Demonstração de protótipo de sistema em ambiente operacional** (solo ou espaço). Demonstração de protótipos do sistema no ambiente de operação. Sistema próximo ou na escala final de operação com muitas funções já disponíveis para demonstração e teste, com boa integração com sistemas auxiliares ou de apoio. Documentação disponível de forma limitada.

8. **Sistema real completado e “missão qualificada” através de teste e demonstração em ambiente operacional** (solo ou espaço). Fim do desenvolvimento do sistema. Integração completa com sistemas de hardware e software. A maior parte da documentação de usuário, treinamento e manutenção está completa. Todas as funcionalidades são testadas em cenários operacionais e de simulação. Validação e validação completadas.

9. **O sistema real em “missão aprovada” através de operações de sucesso em missão** (solo e espaço). Integração com sistemas de hardware/software finalizada. O sistema foi completamente demonstrado e testado em ambiente operacional. Toda documentação foi completada. Experiência de operação com sucesso comprovado. Apoio de engenharia em andamento.

Pode-se imaginar que os níveis mais baixos do IMATEC, i. e., 1, 2 e 3, são compartilhados e acessíveis a quase toda a comunidade de desenvolvimento. Isso se dá pela política de revisão por pares e de publicação em revistas científicas que dissemina e uniformiza o conhecimento tecnológico. Ainda assim, nesse nível, esse tipo de conhecimento pode estar protegido por patentes e outros dispositivos similares. Porque a realização de testes requer o ambiente operacional final, a tecnologia não pode maturar-se além do nível 3 sem que sejam definidos os requisitos da aplicação final. Seria possível definir requisitos gerais ou de amplo alcance, mas, no final, a explicitação dos requisitos do programa de desenvolvimentos específicos deve ser feita a fim de se fazer avançar o índice além de 3.

Os níveis intermediários 4 e 5 são normalmente desenvolvidos dentro de institutos de pesquisa públicos ou grandes instituições de pesquisa privadas, e têm dimensão geográfica limitada, isto é, uma instituição de um país ou de uma região pode ter acesso a pesquisa de IMATEC intermediário desenvolvida em um instituto próximo através de parcerias que definem o que pode ser trocado em termos de conhecimento, ou de contratação de especialistas envolvidos previamente nessa pesquisa. O mesmo acesso é vedado a uma empresa estrangeira ou afastada dos grandes centros de desenvolvimento tecnológico. Assim, cuidado deve ser tomado com os níveis 4 e 5.

Os níveis mais altos do IMATEC, acima de 6, são relativos a produtos específicos, e o controle e posse desse nível é vital para a competitividade e sobrevivência das empresas que os comercializam, o que tem impactos certos na economia dos países que as abrigam. É possível imaginar transferência de tecnologia em nível de desenvolvimento de produto, entretanto, isso é relativamente difícil, pois o conhecimento para fabricação e evolução de um produto permeiam demasiadamente a organização que o criou.

De acordo com esses níveis, são as seguintes as questões que permitem extrair uma avaliação preliminar do índice (inicialmente para um determinado sistema ou produto):

*Uma unidade idêntica foi operada/lançada com sucesso em um ambiente/configuração IDENTICA ao final? Sim: IMATEC→9;*

*Não: Uma unidade idêntica foi operada/lançada com sucesso em um ambiente/configuração DIFERENTE? Sim: IMATEC →5;*

*Não: Uma unidade idêntica foi qualificada para voo, mas não operada ou lançada no espaço? Sim: IMATEC →8;*

*Não: Uma unidade protótipo (ou qualquer outra semelhante o suficiente para ser considerada um protótipo) foi operada ou lançada no espaço com sucesso? Sim: IMATEC →7;*

*Não: Uma unidade protótipo (ou qualquer outra semelhante o suficiente para ser considerada um protótipo) foi demonstrada em um ambiente relevante? Sim: IMATEC →6;*

*Não: Foi um Modelo de desenvolvimento demonstrado em um ambiente relevante? Sim: IMATEC→5*

*Não: Foi um Modelo de desenvolvimento demonstrado em laboratório? Sim: IMATEC→4;*

*Não: Uma prova de conceito analítica e experimental foi demonstrada? Sim: IMATEC→3;*

*Não: Um conceito ou aplicação foi formulado? Sim: IMATEC→2;*

*Não: Os princípios básicos foram observados e reportados? Sim: IMATEC→1;*

Se a resposta à última questão for “não”, deve-se pensar seriamente sobre a factibilidade da tecnologia proposta. No esquema acima, se a arquitetura ou o ambiente onde o sistema opera mudou em relação aquele onde ele foi originalmente planejado, então seu IMATEC deve cair para 4 no máximo, ao menos inicialmente. Se, em uma análise subsequente, o novo ambiente se mostrar suficientemente próximo do antigo, ou uma nova arquitetura suficientemente próxima à anterior for encontrada, então o índice pode ir para 5, 6 ou 7. O mais importante é que ela não mais será 9.

A análise de adequação do equipamento ao novo ambiente é uma parte fundamental do processo de Engenharia de Sistemas e resulta na Matriz de Estado de Qualificação. Esse conceito é, entretanto, mais adequado a níveis mais altos do IMATEC, onde o arquiteto sistêmico tem a sua disposição vários subsistemas e unidades qualificados em IMATEC alto, e onde os custos (financeiro e programático) de desenvolvimento são mais proibitivos que o risco assumido pela requalificação do componente.

O processo de requalificação passa primeiramente pela demonstração de que o novo ambiente em que a peça será usada é menos severo do que o ambiente relevante, onde a peça foi testada (nível de qualificação), em todos os níveis, mesmo que isso não seja verdade para o ambiente operacional onde o sistema foi previamente usado. É prática comum na indústria qualificar-se equipamentos em níveis maiores que o ambiente operacional de modo a permitir reuso do equipamento em outros ambientes. Casos o novo ambiente operacional seja mais severo em algum quesito que o ambiente relevante previamente demonstrado, pode-se optar por testar apenas esse quesito não coberto anteriormente.

Caso o novo ambiente seja bastante diferente do ambiente para o qual a peça anterior foi qualificada pode-se repetir a campanha de testes no novo ambiente (nível 5), expandindo o envelope

ambiental de qualificação ou desenvolver-se um novo produto mais adequado a esse novo ambiente (nível 4).

#### **4.2. Sobre quem faz a avaliação.**

Para a avaliação tecnológica é importante ter um time bem balanceado, experiente em que exista clara atribuição de responsabilidades conforme a qualificação. Os membros do time não necessariamente têm que ser “especialistas em disciplina”, mas devem ter um bom conhecimento do sistema, ou subsistemas desenvolvidos, sob quais condições ele foi operado e como isso se relaciona com o que está em avaliação (NASA 2012).

Enfatiza-se que as questões usadas para se acessar o nível de maturidade tecnológica só podem ser respondidas de forma precisa se existe conhecimento suficiente da arquitetura final e do sistema de operação. Isso implica na necessidade de um processo de apoio subjacente, em que reuniões periódicas e um bom plano de comunicação esteja previsto. É compreensível que, nos estágios iniciais de um projeto ou programa, esse conhecimento seja incompleto, mas, ao mesmo tempo, deve-se reconhecer que todas as avaliações são “preliminares” e sujeitas à revisão até que o conhecimento por si reduza os riscos de decisão. Não é possível, assim, decidir-se pelo nível de determinado projeto em andamento ou a se iniciar sem que informação técnica suficiente e eficaz esteja disponível, sob pena de se comprometer todo o desenvolvimento futuro por excesso de confiança na atribuição de índice IMATEC incompatível com o nível real em que se encontra o sistema.

#### **4.3. A relação entre o IMATEC e as metas de cada fase de um projeto ou missão.**

Nota-se que, conforme o índice, podem ou não existir metas associadas. No nível 1 inexistente meta ou entregável associado, podendo-se tão somente a atividade se restringir à verificação do cumprimento de uma lei da Natureza. O resultado tangível pode ser a documentação de um experimento, um artigo científico ou um relatório de pesquisa (tese). A enorme maioria das instituições de pesquisa no mundo tem plena capacidade de atingir o nível 1. A partir de 2 começam a se observar benefícios da exploração sistematizada de um conceito ou aproveitamento de um fenômeno natural. Isso pode ou não se materializar a partir da identificação de uma aplicação. Nesse nível, uma prova de conceito é organizada e as entregas restringem-se igualmente à composição de relatórios ou artigos científicos. A partir do nível 3, pode haver preocupação com a fabricação do dispositivo ou produto, a partir da previsão de reprodutibilidade de seus constituintes. A partir de 4, além de um objetivo bem definido, transparece a ideia de uma missão, que se verifica pela existência de requisitos de operação em um ambiente de teste. Além de um protótipo funcional, relatórios de execução de testes podem contar como entregas de projeto. Em 5 a noção de missão está bem estruturada a partir da especificação rigorosa de requisitos de operação, bem como início de tratamento de questões relacionadas à qualidade do processo de produção. Nesse nível, o principal entregável já dispõe de maturidade suficiente para estar associado a um processo produtivo.

Portanto, o desconhecimento do uso final da tecnologia ou do equipamento em seus estágios iniciais de desenvolvimento limitam o nível máximo de IMATEC que esse pode adquirir, uma vez que não faz sentido se elevar a maturidade de um equipamento até 8 desconhecendo-se o ambiente operacional. Quase certamente se isso acontecer, quando o ambiente for conhecido, o equipamento terá de ser requalificado (nível 5) ou mesmo passar por novo ciclo de desenvolvimento (nível 4).

Da mesma forma, a evolução do IMATEC pode ser acompanhada conforme a instituição em que a pesquisa tecnológica se realiza:



- 1, 2 e 3 podem ser adquiridos a qualquer momento que a organização assim deseje. Ex: A Universidade de Brasília desenvolve motores foguetes híbridos em nível de bancada de testes;
- 4 e 5: devem apenas ser perseguidos dentro do arcabouço de um programa que tenha manifesto interesse em utilizar produtos advindos da tecnologia desenvolvida. Ex: O INPE persegue o desenvolvimento de propulsores a decomposição de hidrazina para satélites de imageamento em órbita baixa;
- 7, 8 e 9: Devem apenas ser perseguidos visando atender uma missão específica, ou conjunto de missões específica já detalhados. Ex: A “Nimacorp” desenvolve um propulsor a hidrazina que será usado na Missão Amazonia 1 e posteriores missões da mesma plataforma.

#### 4.4. Árvore hierárquica de questões para avaliação do índice

A metodologia de aplicação do IMATEC requer a descrição de um dado sistema ou produto em uma árvore hierárquica envolvendo o conceito de subsistema, montagem e componente, o que equivale a uma “explosão” do sistema em análise (chamada *decomposição analítica do produto ou DAP*). Limitam-se, porém, a quatro os níveis para os quais o valor do índice deve ser determinado e cabe ao interessado decompor seu sistema da forma mais apropriada possível, sem que haja desconsideração ou limitações que impeçam a aplicação da metodologia.

O índice global de todo o sistema herda o menor índice do mais baixo de seus componentes, o que ressalta o componente ou subsistema que requer mais atenção (que deve ser substituído ou submetido a desenvolvimento tecnológico). A razão para isso é que a probabilidade de falha de todo o sistema é diretamente proporcional ao produto das probabilidades de falhas de cada um de seus componentes. Logo, o índice de maturidade do sistema não pode ser maior que o menor índice de seus componentes.

As vantagens de se usar a explosão do produto em hierarquias são:

- A avaliação tecnológica fica mais precisa, porque o problema ou “sistema” é decomposto até suas unidades constituintes, que não podem mais serem decompostas e nem ignoradas;
- O DAP provê a base para a aplicação do IMATEC, dividindo o sistema em todas as suas partes constitutivas até um nível de granularidade conveniente de forma a não tornar a tarefa excessivamente trabalhosa;
- Pode ser usado na gestão de valor agregado de um projeto, já que a decomposição do sistema até componentes permite avaliar métricas e *milestones* associados ao projeto subjacente (cada componente é uma meta).

Em uma escala hierárquica mais abrangente, pode-se agrupar componentes conforme o seguinte esquema:

1. **Segmento:** uma constelação de sistemas, software, apoio de solo ou outros atributos necessários para operar um conjunto integrado de sistemas.
2. **Sistema:** equipamento composto, método ou facilidade capaz de realizar uma tarefa funcional.
3. **Subsistema:** montagem de unidades funcionalmente relacionadas ou interconectadas. P. ex., o subsistema de potência elétrica.
4. **Montagem ou unidade:** um item funcional de mais baixo nível completo ou separável. P. ex., uma válvula;
5. **Componente:** peça única ou partes unidas que é destruída se for desmontada (p. ex., um resistor).

Na determinação do IMATEC, por uma questão de simplicidade, adota-se uma simplificação do esquema acima, entendendo-se que sistemas podem ser agregados em nível superior (na forma de segmentos). De qualquer forma, não parece existir complicações na generalização da abordagem IMATEC, caso outra estrutura analítica de produto seja adotada ou que ela seja expandida para englobar o conceito mais abrangente de programa como uma coleção de projetos inter-relacionados.

#### 4.5. As dimensões forma, integração e função para descrição de um componente

O processo de avaliação do índice para cada componente, subsistema ou montagem (conforme descrito na Seção 4.6) pode se beneficiar de uma abordagem que classifica um dado elemento com base em características tridimensionais (Figura 1) de seu estágio de maturidade, tais como:

- **Forma:** o quão bem adaptado quanto à forma (principalmente no caso de sistemas fluidodinâmicos);
- **Integração:** o quão bem adaptado/integrado o elemento está ao seu subsistema, montagem ou sistema subjacente;
- **Função:** o quão bem o elemento realiza a função designada dentro da missão ou do sistema em que se insere;

Exemplos:

- Um modelo de túnel de vento tem forma pertinente, mas não é adequado nem tem função;
- Um Modelo de desenvolvimento demonstra apenas função (não é adequado e nem tem forma);
- Um protótipo pode adicionar forma ou integração;
- Dependendo do índice de cada subsistema, montagem ou componente, o sistema ou produto tem componentes que não são 100% adequadas, funcionais ou atendendo à forma;
- Uma prova de conceito exhibe apenas função, sendo menos desenvolvida do que um Modelo de desenvolvimento;
- Um modelo de engenharia ou unidade de pré-voos tem sua posição no diagrama próximo ao máximo, indicando plena integração, função ou forma.
- Um software de controle, em seu grau máximo de desenvolvimento, tem apenas integração e função, não fazendo sentido o conceito de forma para ele.

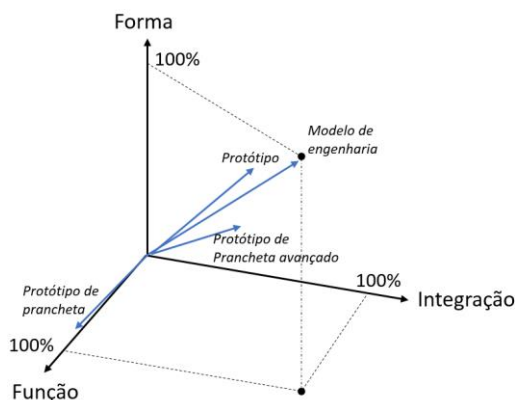


Figura 1 As dimensões forma, função e integração de descrição de um componente.

Para cada componente, deve-se assim buscar uma caracterização de sua forma, integração e função a sua montagem ou unidade a que está associada. Uma falha em qualquer de uma dessas dimensões reduz o índice para aquele componente. É compreensível que a caracterização da forma, integração e função do sistema final será dado pelo produto final da caracterização de seus elementos, o que está implícito na associação do índice pertinente a cada elemento.

#### 4.6. Processo de geração da avaliação

As etapas para a aplicação do índice seguem a sequência descrita abaixo:

1. Divisão do produto a ser analisado em quatro níveis (criação do DAP, Figura 2):
  - Produto/Sistema;
  - Subsistema;
  - Montagem/Unidade;
  - Componente.
2. Para cada um dos itens acima, no menor nível, os itens de risco tecnológico chave são determinados; avaliação do índice IMATEC de cada componente é feita por meio de uma série de questões conforme sugeridas na Seção 4.8, fornecendo uma justificativa para a seleção daquele índice;
3. A componente só obterá alcançar IMATEC subsequente se tiver completado todos os requisitos para o seu nível. O nível IMATEC da hierarquia “montagem” é avaliado de forma semelhante, mas não pode ser maior do que o nível IMATEC mais baixo de qualquer dos “componentes”;
4. O nível IMATEC do “subsistema” pai é avaliado e não pode ser maior do que o mais baixo nível IMATEC das “montagens” constituintes;
5. Finalmente, o nível IMATEC de todo o “produto” é avaliado, de novo, notando-se que o nível do produto não pode ser maior do que o mais baixo nível dos “subsistemas” constituintes.

O relatório final consiste de um mapa de todos os IMATECs (passos 1 a 5) com justificativas. Note que as justificativas são elementos cruciais para documentar a razão da adoção de qualquer dos IMATECs. Tal justificativa deve ser de tamanho suficiente para explicar a razão que apoia a decisão daquele índice particular.

**Comentado [ALXJ1]:** Aqui o processo de determinação de componentes críticos pode ser aplicado.

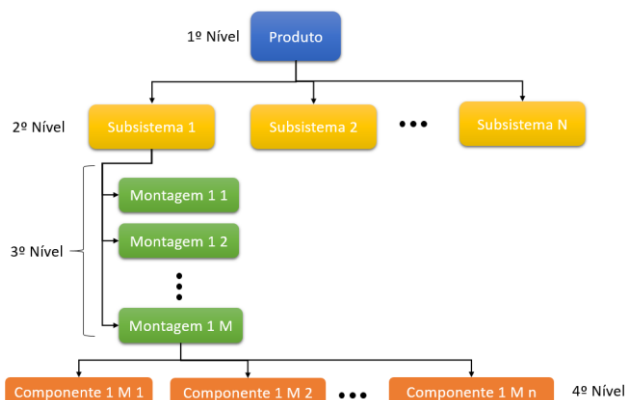


Figura 2 Exemplo de divisão analítica de um produto.

#### 4.7. Campos descritivos comuns

- **Campos do nível DAP:**
  - **Nome do item:** designação específica ou genérica que identifica univocamente o elemento dentro do DAP;
  - **Tipo:** se sistema (S), subsistema (SS), montagem (M) ou componente (C);
- **Campos de avaliação de nível tecnológico**
  - **Identificação de item de tecnologia chave:** devem ser inseridos no nível mais baixo, da primeira vez que eles aparecerem;
  - **IMATEC:** valor do índice;
  - **Justificativa:** razão do item, campo explicativo de sua justificativa no sistema (para o nível mais alto, é uma declaração da missão ou objetivo do produto). Ver questões auxiliares para determinação do índice;
- **Campo de abordagem de implementação**
  - **Método de implementação:** descritivo sobre o processo de implementação do item;
  - **Distribuidores** (se aplicável): descreve potenciais vendedores ou empresas que podem fornecer o item;

#### 4.8. Questões específicas auxiliares para a determinação do índice no nível de sistema/produto

**Importante:** desenvolvimento tecnológico geralmente vai até o índice 7 no máximo.

##### 4.8.1. Para identificação do índice 3

- Todos os subsistemas têm índice 3?

##### 4.8.2. Para a identificação do índice 4

- Todos subsistemas têm índice 4?

##### 4.8.3. Para a identificação do índice 5

- Todos os subsistemas têm índice 5?

- Foram todos os requisitos funcionais de desempenho do sistema obtidos a partir de requisitos de medidas científicas?
- Um protótipo cumpriu os requisitos em um ambiente relevante? Cite os testes ambientais realizados (possivelmente no campo “justificativa”)

#### **4.8.4. Para a identificação do índice 6**

- Todos os subsistemas têm índice 6?
- Os critérios do índice 5 foram satisfeitos para o sistema? (Checar, para o índice 6, as questões específicas do índice 5).
- Foram todos os requisitos funcionais e de desempenho obtidos a partir de requisitos de medidas científicas?
- Um protótipo do sistema demonstrou cumpriu os requisitos em um ambiente relevante? Cite os testes ambientais realizados (no campo “justificativa”)

#### **4.8.5. Para a identificação do índice 7**

- Todos os subsistemas têm índice 7?
- Foram todos os requisitos funcionais de desempenho do instrumento obtidos a partir de requisitos de medidas científicas?
- Um modelo de engenharia ou instrumento de modelo de voo demonstrou cumprir esses requisitos no ambiente operacional final?

### **4.9. Questões específicas auxiliares para a determinação do índice no nível de subsistema**

**Importante:** Subsistemas conseguem um índice maior que 6 ao fazer parte de um sistema que tem índice maior que tal valor.

#### **4.9.1. Para identificação do índice 3**

- Todos os componentes e montagens têm índice 3?

#### **4.9.2. Para a identificação do índice 4**

- Todos os componentes e montagens têm índice 4?
- Os critérios do índice 3 foram satisfeitos para os subsistemas?
- As funções críticas dos subsistemas e parâmetros de desempenho foram derivados de requisitos de medidas científicas?
- Testes de laboratório mostraram que o Modelo de desenvolvimento do subsistema satisfaz aos parâmetros de desempenho e de função crítica?

#### **4.9.3. Para a identificação do índice 5**

- Todos os componentes e montagens do subsistema têm índice 5?
- Os critérios do índice 4 foram satisfeitos para os subsistemas?
- Os parâmetros funcionais críticos e de performance para o Modelo de desenvolvimento foram validados no ambiente relevante? Cite os testes ambientais realizados (no campo “justificativa”).

#### **4.9.4. Para a identificação do índice 6**

- Todos os componentes e montagens do subsistema têm índice 6?
- Os critérios do índice 5 foram satisfeitos para os subsistemas?

- Os requisitos funcionais essenciais e de desempenho foram derivados a partir de requisitos de medidas científicas?
- Um protótipo de subsistema demonstrou cumprir os requisitos em um ambiente relevante? Cite os testes ambientais realizados (no campo “justificativa”).

#### 4.10. Questões específicas auxiliares para a determinação do índice no nível de componente ou montagem

##### 4.10.1. Para identificação do índice 3

- Medidas científicas orientadoras foram identificadas?
- Uma prova de conceito de função crítica foi finalizada de forma analítica ou experimental?

##### 4.10.2. Para a identificação do índice 4

- Os critérios do índice 3 acima foram satisfeitos para os componentes ou montagens?
- Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho dos componentes/montagens foram derivados a partir de requisitos de medidas científicas?
- Testes de laboratório mostraram que Modelo de desenvolvimento cumprem os parâmetros funcionais críticos e de desempenho?

##### 4.10.3. Para a identificação do índice 5

- Os critérios do índice 4 acima foram satisfeitos para os componentes ou montagens?
- Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho para componentes/montagens foram validados no ambiente relevante? Cite os testes ambientais realizados.

#### 4.11. Tabela com definição, descritivo e local de cada índice

IMAT EC	Definição	Descrição de hardware	Descrição de software	Produtos de avaliação	Onde?
1	Princípios básicos observados e descritos  Fase de criação – idealização e registro das ideias (estabelecimento das propriedades tecnológicas fundamentais)	Conhecimento científico gerador de fundamentos para conceitos/aplicações de tecnologia hardware.	O conhecimento científico gerador de fundamentos para propriedades básicas de arquitetura de software e formulação matemática.	Publicação em periódico com revisão por pares de pesquisa com fundamentos do conceito/aplicação da proposta.	Laboratório de pesquisa
2	Conceito e/ou aplicação tecnológica formulada  Fase de investigação científica – equacionamento das ideias (início do processo inventivo)	Início do processo inventivo, a aplicação prática é identificada, mas ainda de caráter especulativo. Provas experimentais ou análise detalhada não estão disponíveis para apoiar a hipótese.	Aplicação prática identificada, mas ainda especulativa. Nenhuma prova experimental ou análise detalhada está disponível para apoiar a hipótese. Propriedades básicas de algoritmos, representações e conceitos definidos. Princípios básicos codificados. Experiências realizadas com dados sintéticos.	Descrição documentada da aplicação ou conceito que aborda viabilidade e benefícios.	Laboratório de pesquisa

3	Funções críticas analíticas/experimentais, prova de conceito característica <i>Fase de investigação científica – ensaios funcionais, simulações</i>	Estudos analíticos colocam a tecnologia no contexto apropriado e demonstrações laboratoriais, modelamentos e simulações validam a predição analítica.	Desenvolvimento de funcionalidade limitada para validar propriedades críticas e previsões usando componentes de software não integrados.	Resultados analíticos/experimentais validando previsões de parâmetros-chave documentados.	Laboratório de pesquisa
<b>Fim da fase de desenvolvimento tecnológico início do desenvolvimento de Engenharia.</b>					
4	Validação de componente ou Modelo de desenvolvimento em laboratório <i>Fase da investigação experimental em laboratório</i>	Um Modelo de desenvolvimento de sistema ou componente de baixa confiabilidade é construído e operado para demonstrar funcionalidade básica; ambientes de teste críticos e previsões de desempenho associados são definidos em relação ao ambiente operacional final.	Componentes de software chave ou funcionalmente críticos são integrados e sua funcionalidade validada para estabelecer interoperabilidade e início do desenvolvimento da arquitetura. Ambientes relevantes são definidos e o desempenho nesses ambientes é predito.	Demonstração do teste de desempenho em acordo com as previsões analíticas. Definição documental do ambiente pertinente.	Laboratório de testes
5	Validação de componente ou protótipo no ambiente relevante. <i>Fase da investigação experimental no ambiente relevante (espaço simulado)</i>	Um protótipo ou componente de confiabilidade média é construído e operado para demonstrar o desempenho geral em um ambiente operacional de simulação com elementos de apoio reais que demonstram o desempenho geral em áreas críticas. Predição de desempenho é feita para fases de desenvolvimento posteriores.	Elementos de software <i>end-to-end</i> são implementados e interfaceados com sistemas ou simulações já existentes, em conformidade com o ambiente alvo. O sistema de software <i>end-to-end</i> é testado no ambiente pertinente de forma a satisfazer o desempenho predito. Desempenho do ambiente operacional é predito. Implementações de protótipo são desenvolvidas.	Documentação de desempenho de teste mostrando acordo com previsões analíticas. Documentação de requisitos progressivos definidas.	Laboratório de testes, ambiente relevante.
<b>Fim da fase de desenvolvimento tecnológico início do desenvolvimento de Engenharia.</b>					
6	Demonstração do protótipo (sistema/subsistema) em ambiente relevante <i>Fase da demonstração do dispositivo em ambiente relevante (espaço simulado)</i>	Um protótipo de sistema ou componente de alta confiabilidade – que convenientemente aborda todas as questões de escalonamento críticas – é construído e operado em um ambiente relevante para demonstrar operações sob condições de ambiente crítico.	Implementação de protótipos de software demonstrados em problemas reais em escala completa, em regime de integração parcial com sistemas de hardware/software existentes. Documentação limitada disponível. Factibilidade de engenharia plenamente demonstrada.	Documentação de desempenho de teste demonstrando as previsões analíticas.	Ambiente relevante (Simulado).
7	Demonstrada a operação do protótipo no espaço <i>Fase de demonstração do protótipo no ambiente operacional</i>	Uma unidade de engenharia de alta confiabilidade – que aborda de forma conveniente todas as questões de escala – é construída e operada em um ambiente relevante para demonstrar o desempenho operacional em um ambiente real em	Um protótipo de software existe que tem todas as funcionalidades chave disponíveis para demonstração e teste. Boa integração com sistemas de hardware/software, demonstrando factibilidade operacional. Maior parte dos problemas de software (bugs) foram corrigidas.	Documentação de desempenho de teste demonstrando as previsões analíticas.	Ambiente relevante (Simulado).

		plataforma (de solo, aérea ou espacial).	Documentação limitada disponível.		
8	Finalização do sistema real e realização de voos qualificados por meio de testes e demonstrações. <i>Fase de qualificação do produto (sistema real) em testes e demonstrações</i>	O produto final em sua configuração final é demonstrado com sucesso através de teste e análises em seu ambiente operacional e plataforma (de solo, aérea ou espacial).	Softwares completamente depurados e integrados a todos componentes de hardware e software. Toda documentação de usuário, treinamento e manutenção são finalizadas. Todas as funcionalidades são demonstradas com sucesso em cenários operacionais de demonstração. Verificação e validação são finalizadas.	Documentação de desempenho de teste verificando as previsões analíticas.	Ambiente de operação (Mundo Real)
Fim do desenvolvimento do produto início do ciclo de operação.					
9	Voos do sistema final provados por meio do sucesso de operações de missão. <i>Fase de operação do sistema</i>	O produto final é operado com sucesso na missão.	Todo software foi completamente corrigido e integrado a todos os sistemas de hardware e software. Toda documentação foi finalizada, incluindo as de software de apoio.	Documentação de resultados de operação da missão.	Ambiente de operação (Mundo Real).

#### 4.12. Diagrama esquemático das etapas do processo de indexação

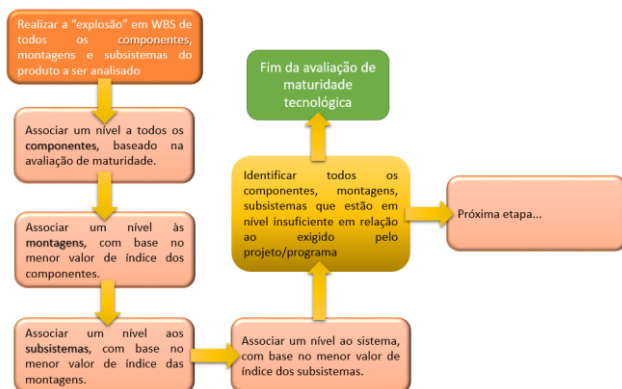


Figura 3 Em uma determinada fase do projeto, a avaliação do índice termina do bloco em verde quando o IMATEC fica determinado para o sistema final a partir de sua decomposição analítica. Ao de mover para outra fase, o processo se reinicia, avaliando-se novamente cada componente e determinando o índice para o sistema resultante.



## **5. Anexo A Questões auxiliares para identificação de maturidade tecnológica para hardware, software e manufatura (todos os índices).**

As seções anteriores descreveram de forma geral os princípios da metodologia em termos simplificados. Como sistemas de missão espacial são formados por uma integração de partes complexas, com divisão em hardware e software, além de manufatura, há que se considerar a adequação do método para esses múltiplos elementos, que são fundamentalmente diferentes, mas que devem funcionar de forma harmônica quando da realização da meta ou missão do projeto. Essa abordagem segue BILBRO (2007).

No que segue abaixo, não necessariamente todos os itens deverão ser cumpridos porque a abrangência das questões depende do escopo e grau de complexidade do sistema em projeto.

### **5.1. IMATEC 1**

#### **5.1.1. Hardware**

As questões abaixo ajudam na avaliação do nível 1, podendo-se associar um percentual conforme a observação de cada uma delas.

1. Hipóteses de pesquisa foram formuladas?
2. Princípios científicos básicos foram observados?
3. Foram definidas as leis ou assunções físicas que embasam as observações?
4. Foram verificadas as leis ou assunções físicas que embasam as observações?
5. Foram identificados os elementos básicos da tecnologia usada?
6. Houve publicações em revistas indexadas da confirmação dos princípios básicos?

Observações:

- Hipóteses não devem ser confundidas com princípios científicos (leis naturais). Frequentemente, hipóteses podem ser vistas como assunções necessárias para a compreensão de um fenômeno em conjunto com as leis.
- A verificação das leis e hipótese envolve a realização de testes experimentais.
- Nesse nível apenas se identifica ou vislumbra os elementos básicos da tecnologia associada ao desenvolvimento.

#### **5.1.2. Software**

Nas questões abaixo, entende-se por “software” os sistemas de apoio ao funcionamento, operação ou validação do sistema/produto. Portanto, deve-se restringir a adoção dessas questões quando o software em questão se referir a aplicações com fim na própria tecnologia da informação (e.g., aplicação de banco de dados, servidores etc).

1. Hipóteses de pesquisa foram formuladas?
2. Princípios científicos básicos foram observados?
3. Foram definidos funções e assunções de código que embasem as observações?
4. Foram verificadas funções e assunções de código que embasem as observações?
5. Foram identificadas formulações matemáticas básicas?
6. Foi gerado conhecimento científico embasando as hipóteses?
7. Houve publicações em revistas indexadas da confirmação dos princípios básicos?

Observações:

- Compreende-se que, nesse nível, princípios científicos associados ao software fazem parte de um esforço maior de simulação associada ao fenômeno em estudo;

- Softwares também podem estar associados ao processo de aquisição e tratamento de dados de um determinado arranjo experimental em apoio à atividade de pesquisa;
- Assim, as “formulações matemáticas básicas” podem estar associadas, p. ex., ao tratamento estatístico dos dados obtidos.

### **5.1.3. Manufatura**

Não existem questões.

## **5.2. IMATEC 2**

### **5.2.1. Hardware**

1. Foi formulado um conceito?
2. Foram identificados os princípios científicos básicos que embasam o conceito?
3. Estudos analíticos preliminares confirmam os conceitos básicos?
4. Uma aplicação foi identificada?
5. Um desenho preliminar foi identificado?
6. Estudos sistêmicos iniciais mostram que a aplicação é factível?
7. Foram feitas as primeiras previsões de desempenho (da aplicação)?
8. Modelagem e simulação foram feitas para refinar ainda mais as predições e confirmar os benefícios?
9. Foram observados benefícios?
10. Uma abordagem de P&D foi formulada?
11. Foram estabelecidas definições preliminares de teste de laboratório ou de ambiente?
12. A factibilidade da aplicação e seus benefícios foram publicados em revistas científicas/resumos de conferências ou relatórios técnicos?

Observações:

- Um “conceito” é uma representação simbólica, síntese de uma conclusão já obtida, que está destinada a se repetir todas as vezes que as mesmas condições forem satisfeitas.
- Uma “aplicação” é o espaço de atuação do conceito que obtém seus resultados por conta da reprodutibilidade deste e que tem benefícios definidos;
- Uma “abordagem de P&D” refere-se a um conjunto de atividades conduzidas em um negócio visando a melhoria de um determinado produto ou processo e que potencialmente resulta em novo produto ou processo;

### **5.2.2. Software**

Nas questões abaixo, entende-se por “software” os sistemas de apoio ao funcionamento, operação ou validação do sistema/produto. Portanto, deve-se restringir a adoção dessas questões quando o software em questão se referir a aplicações com fim na própria tecnologia da informação (e. g., aplicação de banco de dados, servidores etc).

1. Foi formulado um conceito?
2. Foram identificados os princípios científicos básicos que embasam o conceito?
3. As propriedades básicas dos algoritmos, representações e conceitos foram definidas?
4. Estudos analíticos preliminares confirmam os conceitos básicos?
5. Foi identificada uma aplicação?
6. Um desenho preliminar foi identificado?
7. Estudos sistêmicos iniciais mostram que a aplicação é factível?
8. Foram feitas as primeiras previsões de desempenho (da aplicação)?
9. Os princípios básicos foram codificados?

10. Modelagem e simulação foram feitas para refinar ainda mais as predições e confirmar os benefícios?
11. Foram observados benefícios?
12. Uma abordagem de P&D foi formulada?
13. Foram estabelecidas definições preliminares de teste de laboratório ou de ambiente?
14. Experimentos foram realizados com dados sintéticos?
15. A factibilidade da aplicação e seus benefícios foram publicados em revistas científicas/resumos de conferências ou relatórios técnicos?

Observações:

- Softwares também podem estar associados ao processo de aquisição e tratamento de dados de um determinado arranjo experimental em apoio à atividade de pesquisa;
- A questão 14 diz respeito ao uso de dados artificiais para possivelmente depurar e testar software já aplicado ao ambiente de aplicação do conceito;

### 5.3. IMATEC 3

#### 5.3.1. Hardware

1. Foram identificadas os componentes e funções críticas do conceito ou aplicação?
2. Foram obtidas predições analíticas para componentes ou subsistemas?
3. Modelamento e simulações permitiram avaliar o desempenho de subsistemas e componentes?
4. Foram estabelecidas as métricas dos parâmetros de desempenho básicos?
5. Foram estabelecidos testes de laboratório e de ambiente?
6. Equipamentos e recursos de apoio a teste de laboratório estão prontos para o teste da prova de conceito/componente?
7. Foram finalizados a aquisição ou fabricação de componentes?
8. Foram finalizados os testes dos componentes?
9. Análise de resultado dos testes foram finalizadas e estabelecem a métrica de desempenho básica para os componentes e subsistemas?
10. Foi feita verificação das funções críticas da prova de conceito?
11. A prova de conceito analítica e experimental foi documentada?

#### 5.3.2. Software

1. Foram identificadas os componentes e funções críticas do conceito ou aplicação?
2. Foram obtidas predições analíticas para componentes ou subsistemas?
3. Modelamento e simulações permitiram avaliar o desempenho de subsistemas e componentes?
4. Foram estabelecidas as métricas dos parâmetros de desempenho básicos?
5. Foram estabelecidos testes de laboratório e de ambiente?
6. Os equipamentos e ambiente computacional de apoio a testes de laboratório estão prontos para o teste da prova de conceito ou componentes?
7. A aquisição de componentes ou codificação foi terminada?
8. A verificação e validação do componente foi finalizada?
9. A análise dos resultados de testes finalizados estabeleceram a métrica de desempenho para componentes e subsistemas?
10. Foi feita verificação analítica das funções críticas da prova de conceito?
12. A prova de conceito analítica e experimental foi documentada?

### 5.3.3. Manufatura

1. Existe um desenho preliminar dos componentes/subsistemas ou sistema a ser fabricado?
2. Foram identificados requisitos de fabricação básicos?
3. Foram avaliados os conceitos de fabricação já existentes?
4. Foi observada necessidade de modificação nos conceitos de fabricação já existentes?
5. São necessários novos conceitos de fabricação?
6. Foram identificados requisitos para novos materiais, componentes ou recursos de fabricação?
7. Foi identificado um fluxo de processo inicial?
8. Foram identificados os conceitos de fabricação?

#### Observações:

- Nessa fase, apenas conceitos de fabricação são identificados;
- O fluxo de processos diz respeito a um esboço do processo de fabricação;

## 5.4. IMATEC 4

### 5.4.1. Hardware

1. Os conceitos ou aplicações foram traduzidos em termos de um desenho de protótipo de prancheta do sistema, subsistema e componentes?
2. A definição inicial do ambiente de operação foi realizada?
3. Testes de laboratório ou de ambiente foram definidos para o protótipo de prancheta?
4. As previsões de testes preliminares para o desempenho do protótipo de prancheta no ambiente do laboratório foram feitas por meio de simulação e modelamento?
5. A métrica para desempenho dos principais parâmetros foi estabelecida os testes laboratoriais do protótipo de prancheta?
6. Recursos e equipamentos de apoio a testes de laboratório foram finalizados para o teste do protótipo de prancheta?
7. A fabricação dos componentes, subsistemas ou sistema do protótipo de prancheta foi finalizada?
8. Os testes com o protótipo de prancheta foram finalizados?
9. A análise dos resultados foi feita verificando o desempenho relativo às previsões?
10. Os requisitos iniciais do sistema relativo à aplicação do usuário foram definidos?
11. Ambientes de teste crítico e previsões de desempenho foram definidas relativas às definições iniciais do ambiente operacional?
12. O ambiente relevante de teste foi definido?
13. Os resultados de desempenho do protótipo de prancheta verificando as previsões analíticas e definições do ambiente operacional foram documentados?

### 5.4.2. Software

1. Os conceitos ou aplicações foram traduzidos em termos de um desenho de arquitetura de software do sistema/subsistema/componente?
2. A definição inicial do ambiente de operação foi realizada?
3. Os testes de laboratório e ambientes de testes foram definidos para a integração de componentes?
4. Previsões de pré-teste do desempenho de componentes integrados no ambiente de laboratório foram avaliados por meio de modelagem e simulação?

5. A métrica de desempenho dos parâmetros principais foi estabelecida para os testes laboratoriais de componentes integrados?
6. Equipamentos de apoio a testes laboratoriais e ambiente computacional estão finalizados para a realização de testes de integração de componentes?
7. A codificação em nível de componente/subsistema ou sistema foram finalizadas?
8. Testes de integração de componentes foram finalizados?
9. Análise de resultados de teste foram finalizadas verificando-se o desempenho relativo à predição?
10. Requisitos iniciais de sistema foram definidos para a aplicação final do usuário?
11. Ambientes de teste crítico e predições de desempenho foram definidas com relação a definições iniciais do ambiente operacional?
12. O ambiente relevante de teste foi definido?
13. Testes de componentes integrados foram finalizados para código reutilizável?
14. O resultado de desempenho dos componentes integrados que verificam as predições analíticas e as definições do ambiente operacional foram documentados?

#### **5.4.3. Manufatura**

1. Os requisitos de fabricação (incluindo testes) foram finalizados?
2. A maquinaria e ferramental foi identificado?
3. Identificou-se treinamento/certificação para todas as habilidades necessárias (principalmente as novas)?
4. Os requisitos dos materiais foram identificados?
5. A avaliação de produtibilidade foi inicializada?
6. Modificações preliminares na maquinaria e ferramental foram realizadas?
7. Foram identificados os processos chave de fabricação?
8. Requisitos de metrologia foram identificados?
9. Componentes chave de metrologia foram preparados?
10. Foram identificados requisitos de ferramental analítico chave?
11. Ferramentas analíticas chave foram preparadas?
12. Processos de manufatura chave foram avaliados em laboratório?
13. Estratégias de mitigação de problemas de fabricação ou produtibilidade foram identificadas?
14. Todos os processos de fabricação foram identificados?

### **5.5. IMATEC 5**

#### **5.5.1. Hardware**

1. Função críticas associadas a subsistemas e componentes foram identificadas?
2. O ambiente relevante foi finalizado?
3. Requisitos de escala foram definidos e documentados?
4. Subsistemas críticos e componentes dos protótipos de prancheta (breadboard e brassboard) foram identificados e desenhados?
5. Protótipos de prancheta (breadboard e brassboard) dos subsistemas e dos componentes foram construídos?

6. Recursos, equipamentos de apoio de solo (GSE<sup>4</sup>), equipamentos de apoio do espaço (STE<sup>5</sup>) estão disponíveis para ajudar nos testes de ambiente relevante?
7. Previsões de modelagem e simulação do pré-teste foram finalizadas?
8. Predições de desempenho em nível de sistema foram feitas nas fases de desenvolvimento subsequentes?
9. Os diversos protótipos foram demonstrados no ambiente relevante?
10. As demonstrações de sucesso foram documentadas junto com os requisitos de escala?

#### Observações

- Um componente crítico de tecnologia é aquele para o qual o desempenho de toda a missão ou projeto dele depende no que se refere aos requisitos operacionais com níveis aceitáveis de custo de desenvolvimento e comprometimento de cronograma, ou cuja aplicação seja nova para um determinado contexto tecnológico. Componentes críticos podem ser itens de hardware, software ou de fabricação ou partes associadas ao ciclo de vida do produto na hierarquia de subsistema ou componente. (Mandelbaun, 2007)

#### 5.5.2. Software

1. As funções críticas foram identificadas junto a seus subsistemas e componentes associados?
2. O ambiente relevante foi finalizado?
3. Os requisitos de escala foram definidos e documentados?
4. Implementações de componentes e subsistemas críticos foram identificadas e desenhadas?
5. As integrações e implementações de componentes e subsistemas críticos foram finalizadas?
6. Recursos, GSE e STE estão disponíveis em apoio a testes no ambiente relevante?
7. A modelagem e simulação de predições de desempenho em pré-teste foram finalizadas?
8. As predições de desempenho em nível de sistema foram feitas para as fases subsequentes?
9. Os componentes e subsistemas foram demonstrados no ambiente relevante?
10. As demonstrações de sucesso foram documentadas junto com os requisitos de escala?

#### 5.5.3. Manufatura

1. As técnicas de desenho foram definidas até o ponto em que os principais problemas estão também definidos?
2. Os requisitos de interface do sistema são conhecidos?
3. Máquinas e ferramentais foram demonstrados no laboratório?
4. Questões de confiabilidade e qualidade foram consideradas sem que se definissem ainda alvos para seus níveis?
5. Foram conduzidas avaliações iniciais das necessidades das montagens?
6. Processos de produção foram revistos visando a produtividade em manufatura?
7. Hardware limitado em pré-produção foi produzido?
8. Algum componente de propósito específico foi combinado a componentes disponíveis no laboratório?

---

<sup>4</sup> Ground Support Equipment

<sup>5</sup> Space Support Equipment.

9. Equipamento de teste, inspeção, de ferramental ou de processo está em desenvolvimento?
10. Requisitos de recursos de produção foram identificados?
11. Uma planilha de fluxo de produção foi desenvolvida?
12. Processos de manufatura foram desenvolvidos?

#### Observações

- Um estudo de compromissos (em inglês, trade study/trade-off study) é “a atividade de um time multidisciplinar para identificação de soluções tecnicamente mais balanceadas dentre um conjunto de soluções viáveis propostas”. “É ele usado para se encontrar a melhor configuração que satisfaça a requisitos de desempenho conflitantes”. ([https://en.wikipedia.org/wiki/Trade\\_study](https://en.wikipedia.org/wiki/Trade_study));
- Aqui o termo ‘desenho’ parece remeter ao conceito de DFM (Design for Manufacture) que implica em uma técnica de engenharia em que se desenha um produto de forma que ele seja fácil de fabricar. DFM descreve o conjunto de requisitos impostos sobre o desenho de forma que ele resulte em um processo de fabricação com o menor custo possível. (ver [https://en.wikipedia.org/wiki/Design\\_for\\_manufacturability](https://en.wikipedia.org/wiki/Design_for_manufacturability)).

## 5.6. IMATEC 6

### 5.6.1. Hardware

1. Os requisitos do sistema foram finalizados?
2. A definição do ambiente operacional foi finalizada?
3. Subconjuntos de ambientes relevantes foram identificados como representando aspectos chave do ambiente operacional final?
4. Modelagem e simulação foi usada para determinar o desempenho do sistema no ambiente operacional?
5. Interfaces externas tiveram linhas comparativas identificadas?
6. Requisitos de escala foram finalizados?
7. Recursos, equipamentos de apoio de solo (GSE), equipamentos de apoio do espaço (STE) estão disponíveis para ajudar nos testes de ambiente relevante?
8. Um modelo de engenharia ou protótipo que adequadamente trate questões críticas de escala foi fabricado?
9. Um modelo de engenharia ou protótipo que adequadamente trate questões críticas de escala foi testado no ambiente relevante?
10. Foi feita documentação que demonstre acordo entre os desempenhos de teste e de predição?

### 5.6.2. Software

1. Os requisitos do sistema foram finalizados?
2. As definições do ambiente de operação foram finalizadas?
3. Subconjunto de ambientes relevantes foram identificados como tratando aspectos chave do ambiente operacional final?
4. Modelagem e simulação foram usadas para obter estimativas do desempenho do sistema no ambiente operacional?
5. Modelagem e simulação foram usadas para obter estimativas de desempenho seja do protótipo ou do modelo de engenharia no ambiente relevante?
6. As interfaces de hardware e software receberam estimativas de comparação?

7. Requisitos de escala foram finalizados?
8. Ambiente e recursos computacionais estão disponíveis para apoiar este de modelos de software no ambiente relevante?
9. Modelo ou protótipo de software foi construído para adequadamente tratar problemas críticos de escala?
10. Modelo ou protótipo de software foi construído para adequadamente tratar problemas críticos de escala no ambiente relevante?
11. A implementação de protótipo de software demonstrou aplicação em escala real?
12. A análise dos resultados de teste verificou as predições de desempenho no ambiente relevante?
13. Um rascunho inicial da documentação do software foi terminado?
14. Resultado de testes demonstraram acordo com as predições de desempenho?
15. A factibilidade de engenharia foi completamente demonstrada e documentada?

### **5.6.3. Manufatura**

1. Níveis de qualidade e confiabilidade foram estabelecidos?
2. Métodos de integração de materiais, processos, desenhos foram empregados?
3. Necessidade de investimento em processos e ferramental foram determinados?
4. Questões de produção foram identificadas com destaque para as mais graves?
5. O hardware de pré-produção está disponível?
6. O processo e o ferramental estão maduros o suficiente?
7. Processos de manufatura crítica foram prototipados e alvos para aprimoramento de produção foram estabelecidos?
8. A funcionalidade dos componentes é compatível com o sistema operacional?
9. Demonstrações de integração foram completadas?
10. Um plano de fabricação inicial foi desenvolvido?
11. Caminhos críticos no cronograma foram identificados?
12. Problemas de armazenamento e manejo foram tratados?
13. Itens de longo prazo foram identificados?
14. Estimativa de custo inicial de produção foi completada?
15. Foi feita demonstração de produção?

## **5.7. IMATEC 7**

### **5.7.1. Hardware**

1. O desenho do hardware de voo tem uma base de comparação?
2. O desenho responde a todas as questões críticas de escala?
3. Modelagem e simulação são usadas para se prever o desempenho no ambiente operacional?
4. Recursos, equipamentos de apoio de solo (GSE), equipamentos de apoio do espaço (STE) estão disponíveis para ajudar nos testes de qualificação do demonstrador de voo?
5. Um modelo de engenharia completamente integrado ou unidade de protótipo foi construída de forma a atender adequadamente todas as interfaces críticas e de escala?
6. Foram finalizados testes de qualificação do demonstrador de voo?
7. Foram todas as especificações de desempenho verificadas em teste e via análise?
8. O protótipo totalmente integrado demonstrou com sucesso seu funcionamento no ambiente operacional?



9. Critérios/procedimentos/planos de teste e aceitação final tiveram base comparativa finalizada?
10. Houve documentação da demonstração com sucesso do voo?

#### **5.7.2. Software**

1. As interfaces de Hardware foram referenciadas?
2. O desenho trata de todas as questões críticas de escala?
3. Modelagem e simulação foram usadas para se prever o desempenho no ambiente de operação?
4. Recursos e ambiente computacional estão disponíveis em apoio a teste de qualificação e de protótipo do software operacional?
5. Software completamente integrado ou sistema de protótipo em escala foi codificado de forma a tratar adequadamente todos as questões críticas de escala e interfaces de hardware e componente?
6. A validação e verificação (V&V) especificada no desenvolvimento de todo software foi completada com resultados documentados?
7. Todas as especificações de desempenho foram verificadas por teste e análise?
8. Software do protótipo totalmente integrado foi demonstrado com sucesso no ambiente operacional?
9. Planos/procedimentos e critérios de teste de aceitação final tiveram versões de comparação?
10. O rascunho intermediário da documentação exigida de software foi finalizado?
11. A demonstração operacional do sucesso atingido foi documentada?

#### **5.7.3. Manufatura**

1. Materiais, processos, métodos e técnicas de desenho foram referenciados?
2. Dados de capacidade de manutenção, confiabilidade e suporte estão disponíveis?
3. Processos de manufatura foram referenciados?
4. Planejamento de produção foi finalizado?
5. Ferramental de processo e de teste/inspeção foram demonstrados?
6. Maquinas e ferramentas foram demonstradas em um ambiente de pré-produção?
7. Recursos de integração estão prontos e disponíveis?
8. O protótipo foi construído com ferramental "brando"?
9. O protótipo foi aprimorado em nível de qualidade de pré-produção?
10. Tudo está pronto para o início de produção em baixo volume?

Observação:

- LRIP – *Low Rate Initial Production*. Produção inicial em baixo volume.

### **5.8. IMATEC 8**

#### **5.8.1. Hardware**

1. Foi finalizado o desenho de todos os subsistemas de hardware de voo?
2. As interfaces de hardware de voo foram definidas?
3. O desenho do sistema de voo foi completado?
4. Planos de operação de solo e de voo foram referenciados?

SPO - Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Bloco A  
CEP 70610 200 - Brasília - DF  
Telefone: 61 3411-5159

5. Os testes de qualificação do sistema de voo foram finalizados?
6. As especificações de desempenho de sistema foram verificadas, seja por teste ou análise?
7. Os testes de aceitação de hardware de voo em nível de sistema/subsistema e componente foram finalizados?
8. O hardware de voo foi entregue para integração?
9. A integração final do sistema está completa?
10. Foi feita documentação da maturidade do sistema para operação/lançamento?

#### **5.8.2. Software**

1. Todas as componentes de software e interfaces de hardware foram definidas e o desenho completado?
2. Operações de software, manutenção e fim de uso foram referenciadas, assim como rascunho de documentação preparados?
3. V&V e teste de software foi finalizado como especificado no planejamento do projeto e resultou em versões documentadas, revisadas e aprovadas pelos responsáveis competentes?
4. Questões de software e de erro, incluindo impacto sobre requisitos foram corrigidos ou resolvidos e os resultados propriamente documentados?
5. A maturidade do software para operação/lançamento foi documentada?
6. Foram finalizadas todas as documentações de usuário de software, descrição de versionamento e manutenção?

#### **5.8.3. Manufatura**

1. Manutenibilidade, confiabilidade e suportabilidade do conjunto de dados foi finalizada?
2. Todos os materiais já estão em produção e disponíveis prontamente?
3. Foi estabelecida uma cadeia de suprimentos?
4. Equipamentos de manufatura, ferramental e sistemas de metrologia e análise estão em ordem?
5. Os recursos de fabricação estão prontos para produção em larga escala?
6. Os processos de fabricação foram validados em condições de operação?

#### **Observações:**

- “Manutenibilidade é uma característica inerente a um projeto de sistema ou produto, e se refere à facilidade, precisão, segurança e economia na execução de ações de manutenção nesse sistema ou produto” (ver <https://pt.wikipedia.org/wiki/Manutenibilidade>);
- “Em engenharia de software e engenharia de hardware, suportabilidade é um dos aspectos da qualidade de software que se refere à habilidade dum suporte técnico de instalar, configurar e monitorar produtos computacionais, identificar exceções ou falhas, depurar ou isolando problemas até a fonte, e prover manutenção de software ou hardware a fim de solucionar um problema ou restaurar o produto a um estado funcional. Incorporar recursos de suportabilidade num projeto tipicamente resulta em maior eficiência na manutenção, reduzindo custos operacionais.” (ver <https://pt.wikipedia.org/wiki/Suportabilidade>) .

## **5.9. IMATEC 9**

### **5.9.1. Hardware**

1. O sistema de voo foi inserido no ambiente operacional?
2. O sistema de voo foi operado no ambiente operacional?
3. O sistema de voo teve seu desempenho analisado?
4. O desempenho do sistema de voo satisfaz aos requisitos operacionais?
5. Foi feita documentação do acordo entre desempenho do sistema de voo com os requisitos operacionais?

### **5.9.2. Software**

1. O software foi totalmente integrado e operado no ambiente operacional?
2. O desempenho do software foi analisado, verificado e documentado como em acordo com os requisitos operacionais?
3. Toda documentação de software foi finalizada? (ref. NASA NPR 7150.2)
4. Engenharia de software de apoio já está a postos?
5. Operações de software, manutenção e fim de operação já foram finalizadas e documentadas?

### **5.9.3. Manufatura**

1. O desenho é estável?
2. A produção opera nos níveis desejados?
3. O programa de aprimoramento de produto já está pronto para futuras aquisições?
4. Todos os processos de manufatura estão controlados no nível de qualidade apropriado?

## 6. Referências

- ABNT (2009). Gestão de riscos - Princípios e diretrizes. NBR ISO 31000:2009.
- BILBRO, James W. Systematic Assessment of the Program/Project Impacts of Technological Advancement and Insertion Revision A, 2007. In: TRL Calculator Version Bl.1.
- BOLAT, S (2014). Technology Readiness Level (TRL) math for innovative SMEs. Disponível em: <https://serkanbolat.com/2014/11/03/technology-readiness-level-trl-math-for-innovative-smes/> (acesso Julho de 2016)
- CGM/MP (2016). Instrução Normativa Conjunta no 001 (IN 001): [http://www.cgu.gov.br/sobre/legislacao/arquivos/instrucoes-normativas/in\\_cgu\\_mpog\\_01\\_2016.pdf](http://www.cgu.gov.br/sobre/legislacao/arquivos/instrucoes-normativas/in_cgu_mpog_01_2016.pdf)
- DUBOS, Gregory; SALEH, Joseph; BRAUN, Robert. Technology Readiness Level, Schedule Risk, and Slippage in Spacecraft design. JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS. Vol. 45, No 4, July- August 2008.
- FERNANDEZ, Joseph A. *Contextual Role of TRLs and MRLs in Technology Management*. SANDIA REPORT. November, 2010.
- MANDELBAUM, Jay. *How the S&T Community can best support the Technology Readiness Assessment (TRA) Process – Do's and Don't's*. 2007 Technology Maturity Conference (2007).
- MCT (2003). Portaria MCT 822 de 27/11/2003 que aprova o Regimento Interno da Agência Espacial Brasileira (AEB). Ministério da Ciência e Tecnologia.
- NASA Office of the Chief Engineer, "NASA Systems Engineering Processes and Requirements", NPR 7123.1B, NASA, Washington, DC. Disponível em: <http://nodis3.gsfc.nasa.gov/>
- NPR 7150.2, NASA, Washington, DC. Disponível em: <http://nodis3.gsfc.nasa.gov/>
- NASA (2012). Technology Readiness Level, [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt\\_accordion1.html](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html)
- PMI (2013). A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBok Guide). 5th Edition. Project Management Institute, Inc.