

Uma Abordagem Integrativa para Avaliação de Riscos na Fase Conceitual do Ciclo de Vida de Sistemas Espaciais

Lucas Lopes Costa (lucas.costa@inpe.br)¹

Fabiano Luis de Sousa (fabiano.sousa@inpe.br)²

Milton de Freitas Chagas Junior (milton.chagas@inpe.br)³

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

RESUMO

A fase de concepção de sistemas espaciais é caracterizada por apresentar grande incerteza e pouca disponibilidade de dados e informações para suportar análise de riscos quantitativa através de métodos formais (ex. PRA, ETA, FTA, FMEA). As ferramentas atualmente utilizadas para a análise de riscos em ambientes de Engenharia Simultânea como o CPRIME (INPE), Team-X (NASA) e CDF (ESA) utilizam avaliação qualitativa de risco com base em matriz de risco e lista de riscos, fundamentados no conceito de três componentes do risco (cenário, probabilidade de ocorrência e consequências – risk triplet). Os resultados da análise de risco suportam o processo de tomada de decisão (Risk informed decision-making) dos demandantes e autoridades de um estudo. Portanto, os fundamentos e incertezas relacionadas aos riscos devem ser claramente disponibilizados. Entretanto, existem diversos desafios quanto ao estabelecimento de uma metodologia consistente e efetiva de avaliação e comunicação dos riscos identificados neste tipo de ambiente devido à alta frequência de iterações entre os especialistas durante a concepção do projeto. Adicionalmente, existem limitações metodológicas quanto à representação de incertezas impostas pela utilização de ferramentas como a matriz de risco. Este artigo apresenta uma abordagem integrativa para avaliar os fundamentos de riscos considerando os seguintes aspectos conhecimento, tecnológico e maturidade do projeto, contexto organizacional e tomada de decisão sob incertezas. Os resultados preliminares mostram que a aplicação da abordagem apresenta distinção entre riscos de acordo com os seus fundamentos, aceitável convergência de avaliação entre diferentes avaliadores e amplia o nível de informações disponibilizadas aos usuários de resultados da análise de risco.

1. INTRODUÇÃO

A disciplina risco atua e possui interfaces com todas as áreas no desenvolvimento de um projeto de sistemas espaciais. Neste contexto, é possível distinguir a atuação da disciplina risco em gerenciamento de riscos (*Continuous Risk Management - CRM*) e suporte para tomada de decisão (*Risk Informed Decision-Making - RIDM*), que mudam o processo de atuação da disciplina ^[1].

Segundo a NASA ^[2], a fase conceitual de desenvolvimento de sistemas espaciais tem como objetivo produzir um espectro abrangente de ideias e alternativas para missões das quais novos projetos podem ser selecionados. Para isso são determinados o conceito do sistema desejado, conceito operacional da missão, requisitos preliminares do sistema, avaliação inicial da viabilidade de desempenho, custo e cronograma, identificação das necessidades de potenciais tecnologias e riscos.

A aplicação de processos de análise de risco na fase de concepção tem como principal objetivo a identificação de eventos que possam gerar consequências que afetam os objetivos ou restrições da missão, permitindo modificações nos conceitos, o mais cedo possível, ou para conhecimento das vulnerabilidades das diferentes alternativas. Estas informações devem alimentar o processo de tomada de decisão (RIDM) e podem ser entradas para o processo de gerenciamento de risco contínuo (CRM) a ser implantado no projeto que acompanhará todo o ciclo de vida do sistema.

1 MS, Engenheiro Mecânico - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

2 PhD, Engenheiro Mecânico - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

3 PhD, Engenheiro Civil - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Com o objetivo de redução de custo e tempo para completar os estudos da fase conceitual, foram criados times (*Concurrent Engineering Teams – CET*) ou centros de engenharia simultânea nas principais agências espaciais internacionais ^[3].

Engenharia simultânea é um método no qual um conjunto mínimo necessário de especialistas relevantes trabalham simultaneamente em um espaço compartilhado (físico ou virtual), operando em sistemas com dados compartilhados e conduzido por um líder do estudo ^[4]. As entradas são tipicamente um conjunto de requisitos e restrições para a missão e a saída é um relatório de estudo que apresenta o projeto da missão, requisitos derivados, seleção de instrumentos, conceitos de operação, descrição e desempenho de todos os subsistemas, balanços de massa, potência e outros recursos, estimativas programáticas da missão (cronograma, custo e risco). Um estudo típico inclui os especialistas, um ou mais representantes do cliente e tem duração de poucas semanas desde a reunião inicial até o relatório final.

O Team-X é reconhecido como a primeira iniciativa na indústria aeroespacial, criado em 1995 no JPL/NASA, seguido do CDF na ESA em 1999 ^[4]. A metodologia de risco foi introduzida no Team-X apenas em 2001 com o motivador principal de reduzir a pressão dos investigadores principais (i.e., cientistas responsáveis pela missão) e gerentes sobre os times de engenharia simultânea, quanto a adoção de estimativas otimistas de custos e tempo necessário para o desenvolvimento de tecnologias emergentes ^[5-7]. Desde a implantação da disciplina risco nesse ambiente, diversas iniciativas têm sido realizadas para capturar de forma efetiva os riscos da missão, cronograma e custos ^[8].

Nestes ambientes, a disciplina risco tem a tarefa de gerenciar todas as informações relacionadas aos riscos, incluindo aquelas derivadas de subsistemas, especialidades específicas, natureza programática e as relações dessas para a missão como um todo. Essa atividade é dificultada devido à pressão temporal na qual decisões são tomadas, em um ambiente “caótico semi-organizado” ^[5]. Frequentemente, o período para a realização do estudo é tão exíguo que não é possível analisar e revisar formalmente os riscos para cada opção de solução enquanto o estudo avança ou quando estes surgem ao longo das discussões, ficando, esta atividade, com frequência, para a fase final do estudo. O resultado da análise normalmente gera uma lista de riscos contendo a descrição e a forma de caracterização (ex. níveis de probabilidade de ocorrência e consequências), além de uma maneira sumarizada de comunicação das informações (ex. matriz de risco) que são registrados no relatório final do estudo.

O padrão de medida de risco normalmente adotado em áreas de engenharia e também na área espacial é resultante da associação da probabilidade de ocorrência (p_i) e a medida do impacto ou consequências (x_i) de um cenário de risco (s_i), conhecido como *risk triplet* (s_i, p_i, x_i) desenvolvido por Kaplan S. e Garrick B. ^[9]. Frequentemente, essa associação é realizada numericamente e resulta em um indicador quantitativo denominado de nível de risco, que é utilizado como critério para decisões e interpretado como uma medida objetiva de um risco (i.e., interpretação de valor esperado ou perda esperada) em abordagens baseadas em risco (*risk-based approach*). Apesar da ampla utilização dessa abordagem, a sua interpretação objetiva e a utilização de probabilidades como forma de expressão das componentes (p_i e x_i), sem a adequada interpretação ^[10], são consideradas problemáticas em diversos contextos ^[11,12].

A ferramenta de comunicação de riscos mais comumente utilizada é o diagrama de riscos ou matriz de risco, que apresenta os riscos posicionados em uma matriz segmentada por regiões que representam as ações a serem tomadas de acordo com a política de riscos adotada naquele contexto (projeto ou organização). Entretanto, a construção padrão da matriz de risco como forma de comunicação omite elementos informativos importantes para tomadas de decisão, como nível de incerteza subjacente ^[13,14].

Portanto, o foco da análise de risco em estudos de engenharia simultânea é a identificação e avaliação inicial de riscos para suportar tomadas de decisões (RIDM). Normalmente, não são utilizadas abordagens como FTA (*Fault Tree Analysis*), ETA (*Event Tree Analysis*), PRA (*Probabilistic Risk Assessment*) ou outros métodos formais devido à grande incerteza, pequena disponibilidade de dados quantitativos e específicos para suportar as estimativas de risco, além da restrição de tempo para utilização dessas ferramentas durante um estudo.

Este trabalho apresenta as abordagens de análise de risco ^[15] utilizadas em um ambiente de engenharia simultânea do INPE (Centro de Projeto Integrado de Missões Espaciais – CPRIME) e uma nova proposta, em investigação, que amplia o nível de informações disponibilizadas aos futuros usuários considerando os aspectos de conhecimento, tecnológico e maturidade do projeto, contexto organizacional e tomada de decisão sob incertezas.

2. DESCRIÇÃO

Criado em 2013, o Centro de Projeto Integrado de Missões Espaciais (CPRIME) é um ambiente integrado de projeto e análise conceitual de missões espaciais que utiliza a abordagem de engenharia simultânea. Este ambiente inclui uma infraestrutura e modelos computacionais dedicados ^[16] para a realização dos estudos conceituais de missões espaciais.

Quando um estudo é solicitado, um time de especialistas é mobilizado para a atividade por um determinado período e o trabalho é realizado seguindo um processo estabelecido. A estratégia é estruturada em 4 estágios para o desenvolvimento de soluções candidatas em atendimento às necessidades de stakeholders demandantes de um estudo, partindo da definição dos requisitos de stakeholders e o entendimento das necessidades da missão, até o desenvolvimento de soluções de projeto conceitual do sistema espacial que viabilizem a realização da missão.

A disciplina risco é parte integrante do processo e tem como objetivo principal a consolidação dos riscos identificados ao longo do desenvolvimento de um estudo. Neste contexto, a disciplina risco tem adotado diferentes métodos na busca de uma forma mais adequada para a efetiva identificação, avaliação e comunicação de riscos para as soluções de missão identificadas nos estudos. O processo utiliza intensiva comunicação, integração e verificação das informações geradas de outras disciplinas técnicas e programáticas para a adequada captura, avaliação e registro dos riscos. Ao final de um estudo, a disciplina risco consolida todas as informações da análise de riscos na forma de um relatório utilizando a política de risco aplicável ao estudo e eventuais requisitos providos dos stakeholders.

Questões como diferentes formas e profundidades de avaliação dos riscos e a necessidade de uniformização de conceitos foram observadas no CPRIME, assim como em outros centros de engenharia simultânea. Outros autores ^[5,7] apontam problemas enfrentados no Team-X como grande variância na qualidade de documentação dos riscos, falta de rigor no processo de identificação de riscos que levam à inconsistência na identificação e avaliação de riscos similares em diferentes estudos, problemas no estabelecimento das categorias de probabilidade e consequências quanto a postura de risco de diferentes missões, precisão de cada nível e avaliação dos engenheiros.

2.1 Abordagens de Análise de Risco

Esta seção apresenta as diferentes técnicas implementadas pela disciplina risco no CPRIME e as principais lições aprendidas. A estratégia inicial adotada para a identificação e avaliação de riscos utilizou ferramentas e conceitos adaptados da área de Confiabilidade com a integração dos métodos FMEA, diagrama de blocos de confiabilidade e matriz de risco. Posteriormente, a abordagem foi modificada tendo como referências uma política de gestão de riscos interna, técnicas identificadas da literatura acadêmica e de outros centros de engenharia simultânea similares. As diferentes propostas foram colocadas em prática em estudos realizados no CPRIME e a avaliação dos resultados obtidos foi utilizada para efetuar melhorias na abordagem e ferramentas subsequentes. A Tabela 1 apresenta a descrição das diferentes abordagens (A1 a A4) utilizadas que refletem os objetivos dos estudos, a natureza das missões analisadas e as modificações propostas pela disciplina risco utilizando a experiência acumulada.

Tabela 1 – Descrição das abordagens de análise de risco utilizadas no CPRIME ^[15].

ID	Descrição
A1	A abordagem consiste em três fases que integram a identificação e avaliação qualitativa de riscos técnicos utilizando a matriz de risco 5x5 (critérios fixos), análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA) e diagrama de blocos de confiabilidade. A abordagem adota a classificação dos riscos de acordo com os quatro níveis hierárquicos da arquitetura de missão (missão, elementos da arquitetura da missão, subsistemas e equipamentos) e o processo consiste na coleta de informações nas sessões de projeto pela disciplina Risco e consolidação final somente com a disciplina Systems. A aplicação desta abordagem mostrou-se inviável pelo volume, detalhamento e tempo necessário para a realização de todas as análises previstas.
A2	A abordagem prevê a identificação, avaliação qualitativa e a comunicação dos riscos técnicos utilizando matriz de risco 3x3 com critérios adaptáveis (no início de um estudo). A classificação dos riscos adotada na abordagem considera apenas dois níveis hierárquicos (missão e elementos da arquitetura da missão) e o processo consiste na coleta de informações nas sessões de projeto centralizado pela disciplina Risco, envio das informações para a avaliação especialista dos riscos pelas disciplinas específicas e consolidação final. A aplicação (única) da abordagem foi parcial devido as condições do objeto de estudo que não permitiram uma consolidação final coletiva dos resultados no formato descritivo de riscos.

A3	A abordagem utiliza como referência uma política de riscos interna com uma matriz de risco 5x5 e níveis de probabilidade de ocorrência e consequências fixados de acordo com a política estabelecida. Esta abordagem provê a identificação de riscos técnicos e programáticos utilizando a mesma análise qualitativa. A classificação dos riscos adota dois níveis distintos (missão e subsistemas/equipamentos) e o processo consiste na coleta de informações nas sessões de projeto centralizado pela disciplina Risco, avaliação e consolidação final com todo time de estudo. A inclusão da identificação de riscos programáticos mostrou-se viável com a consolidação final em conjunto com a disciplina <i>programmatics</i> . Entretanto, quanto aos riscos técnicos, a avaliação conjunta com todo o time de projeto mostrou-se inviável pelo tempo consumido nesta atividade e o prevailecimento da avaliação segundo os especialistas relacionados ao risco.
A4	A abordagem utiliza a política de riscos interna com uma matriz 5x5 e níveis de probabilidade e consequências adaptáveis. A identificação de riscos técnicos e programáticos é prevista de ser realizada em conjunto com o time de projeto. A classificação dos riscos utiliza dois níveis hierárquicos (missão e subsistemas/equipamentos). O processo consiste na apresentação da metodologia proposta ao cliente do estudo, adaptação dos critérios de classificação (níveis) de consequências com validação do cliente, coleta de informações pela disciplina Risco (identificação de riscos descentralizada, mas registro centralizado) durante as sessões de projeto e consolidação final dos riscos com um grupo reduzido, com participação das disciplinas: <i>systems</i> , <i>programmatics</i> e stakeholders do estudo. Com a aplicação da abordagem ficou evidente a necessidade de adaptação do processo, anteriormente ao início do estudo, incluindo a flexibilidade nas ferramentas e política a serem seguidos e a dificuldade de registro dos riscos de forma centralizada pela disciplina Risco, principalmente quanto aos riscos especializados de disciplinas técnicas. Na aplicação da abordagem, ficou evidente a necessidade de apresentar o nível de conhecimento que subsidia a avaliação dos riscos como informação de suporte para futuras tomadas de decisão pelos stakeholders.

A abordagem A1 foi comprovadamente inviável de utilização em um ambiente de engenharia simultânea pelo longo tempo de execução, alta complexidade de implementação e o foco somente em falhas (natureza das ferramentas de confiabilidade). Com esse aprendizado, as demais abordagens apresentaram grande redução de escopo.

A avaliação qualitativa das componentes probabilidade de ocorrência e consequências, inicialmente realizada somente pela disciplina Risco (A1 e A2), gradualmente incorporou novos atores, porém esta prática tornou o processo lento devido às discussões e debates, que nem sempre chegaram a um consenso e com o prevailecimento do julgamento da disciplina especialista relacionada ao risco em questão.

A definição da política de riscos interna foi um marco importante para a disciplina Risco (implantação na abordagem A3), provendo uma padronização institucional ao tratamento de riscos e adaptada ao ambiente interno de projetos. Entretanto, após as aplicações iniciais com o formato proposto na política (A3), notou-se a necessidade de flexibilizar alguns aspectos da política que geraram resultados positivos (A4) como o número e descrição dos níveis de probabilidade de ocorrência de determinado evento e suas consequências, informações a serem incluídas na lista de risco, evidenciar o conhecimento subjacente a um risco e a resolução ajustável da matriz de risco conforme o contexto e necessidades de cada estudo.

Também foram observadas melhorias no processo com a participação ativa do cliente do estudo (principalmente na adequação das definições para a análise de risco), a importância da identificação de riscos descentralizada e a constância em alertar e incentivar os especialistas no registro dos riscos e as definições adotadas.

Com as lições aprendidas e experiências obtidas, o processo corrente de atuação da disciplina Risco no CPRIME é adaptável às necessidades de um estudo a ser desenvolvido e permite a utilização da política de risco padronizada (default) ou a configuração dos aspectos dessa política de risco. A etapa de definição ou adaptação da política de risco está inserida na estratégia geral do CPRIME no início de um estudo e tem como prerrogativa a participação dos stakeholders. A adaptação da política de risco permite a definição dos seguintes elementos:

- Critérios de sucesso como referência para a identificação de riscos.
- Política de aceitação de risco com definição das ações ou nível de controle e as regiões da matriz de riscos.
- Categorização de probabilidade de ocorrência e consequências quanto aos níveis, caracterização (ex. qualificadores subjetivos, medidas de frequência relativa ou probabilidade subjetiva) e naturezas das consequências a serem investigadas (ex. prazos, custos e desempenho).
- Conteúdo da descrição dos riscos (lista de riscos).
- Estratégia de condução da análise de risco durante um estudo.

2.2 Abordagem Auxiliar para a Avaliação de Riscos

A partir das lições aprendidas da aplicação prática de diferentes abordagens de análise de risco no CPRIME (apresentadas na seção 2.1), uma ferramenta para o rápido julgamento dos fundamentos de um risco é proposta. Essa nova abordagem tem o objetivo de prover um maior detalhamento de informações sobre os riscos identificados em um estudo conceitual para suportar RIDM. Onde, essencialmente, o objetivo é permitir aos stakeholders (i.e., usuários dos resultados da análise de risco) maior liberdade de julgamento próprio sobre os riscos - abordagem descritiva, ao invés de prover um julgamento final adotando somente a visão do analista do risco - abordagens normativas^[17]. Enquanto para os especialistas, denominados de analistas dos riscos, é uma forma de expressar os pontos frágeis de um risco identificado e avaliado, que vai além da abordagem *risk triplet* e a matriz de risco.

A nova abordagem complementa o processo de avaliação do risco ao integrar o julgamento do conhecimento relacionado ao risco em si e a caracterização do seu contexto quanto a maturidade tecnológica e evolutiva do projeto, do contexto organizacional e aspectos psicológicos e socioculturais de tomadas de decisão.

O nível de conhecimento utilizado como base para a análise do risco pode afetar o processo de tomada de decisão de stakeholders e tem grande importância em análises qualitativas. Embora existam diferentes perspectivas e conceitos de risco, incerteza e conceitos relacionados^[11,18], independentemente das definições adotadas, o conhecimento que suporta a análise de risco é um importante parâmetro para a formação de opinião (julgamento) e tomadas de decisão de stakeholders. Inspirado no conceito Strength of Knowledge (Sok)^[19] e modelo Data-information-knowledge-wisdom (DIKW model)^[20], diferentes níveis descritivos são criados para representar o conhecimento subjacente de um risco.

A maturidade do conceito de missão, objeto de um estudo de fase conceitual, e o nível de incerteza tecnológico associado a um risco específico são considerados importantes parâmetros contextuais de um risco. O nível de maturidade do conceito de missão (ex. *Concept Maturity Level* – CML^[21]) provê uma visão geral de maturidade da solução desenvolvida no momento de avaliação do risco, de forma a representar o nível de estabilidade ou potencial volatilidade quanto as potenciais soluções exploradas e, ao mesmo tempo, provê uma indicação em termos do nível de conhecimento e profundidade de entendimento das decisões destas soluções. Enquanto a maturidade tecnológica (ex. *Technology Readiness Level* - TRL^[22,23]) provê uma visão específica do risco, de forma a representar as incertezas de natureza tecnológica relacionadas ao risco. De forma global, essas características proveem aos stakeholders o potencial de mudanças ou instabilidade na análise do risco realizada.

A maturidade ao risco da organização é considerada como tendo uma importante influência do contexto de um risco, pois caracteriza os diversos aspectos, tais como: como a cultura organizacional, a adaptabilidade e a robustez de processos, a diversificação de estratégias e a utilização eficaz de lições aprendidas^[24]. Uma organização que preza pela cultura, processos e consciência ao risco no desenvolvimento de suas atividades é reconhecida como uma “organização superior”^[25] em termos de maturidade de capacidades e na formação de colaboradores mais aptos no reconhecimento e avaliação apropriada de riscos através de programas de treinamento formais.

Os aspectos de psicologia e ciências sociais de tomadas de decisão sob incerteza^[26], do ponto de vista do analista do risco, representam o potencial de distorções em que as decisões por eles realizadas (ex. julgamento dos níveis de probabilidade de ocorrência e consequências, escolha dos dados relevantes para análise) estão sujeitas durante a análise de um risco. Os aspectos de percepção^[27] e comportamento^[28] ao risco são fatores que impactam diretamente na identificação e avaliação de riscos, dado que as pessoas são influenciadas por diversos fatores pessoais e coletivos de diferentes contextos (ex. culturais, sociopolíticos, cognitivos-afetivos e processamento mental)^[29]. Quanto ao processamento mental, as pessoas não utilizam somente o modo cognitivo de racionalidade em julgamentos e decisões, mas também utilizam atalhos cognitivos para diminuir a carga computacional mental, conhecidos como heurísticas^[30]. Estes processos, em alguns casos, resultam em distorções e inconsistências denominados de vieses, consideradas respostas não lógicas ou não otimizadas em comparação ao modelo racionalista^[31–33].

Com o objetivo de criar uma referência (*benchmark*) para o status dos fundamentos de um risco, contendo diferentes caracterizações dos aspectos acima introduzidos, um modelo descritivo é proposto. Nesse

modelo, o risco melhor fundamentado é denominado “risco em conhecido”, enquanto o risco com menor fundamentação é denominado de “preocupação”, conforme apresentado na Tabela 2.

A classificação de um risco através desse modelo consiste em avaliação qualitativa utilizando os critérios descritivos que definem as diferentes categorias. Destaca-se que o conjunto de características apontadas em cada nível de classificação não deve ser julgado de forma absoluta, portanto, existindo a possibilidade de não convergência entre todos os critérios de um risco sob avaliação.

Tabela 2 – Modelo descritivo de classificação dos fundamentos de um risco.

Risco bem conhecido	Risco mensurável	Risco identificável	Risco suposto	Preocupação
O risco é fundamentado em vasto e bem estabelecidos: dados e informações, premissas, conhecimento e experiência do especialista, além de julgamento bastante seguro e concordância de outros especialistas.	O risco é fundamentado em suficiente e reconhecidos: dados e informações, premissas, conhecimento e pequena experiência do especialista, além de julgamento seguro e ausência de divergência de outros especialistas.	O risco é fundamentado em: poucos e relevantes dados e informações, premissas de base teórica, conhecimento geral e experiência singular do especialista, além de julgamento seguro e poucas discordâncias de outros especialistas.	O risco é fundamentado em dados e informações únicos com incerteza de: relevância, premissas de base teórica singular, conhecimento geral e sem experiência do especialista, além de julgamento incerto e não concordância de outros especialistas.	O risco é fundamentado em: informação única com grande incerteza de relevância, premissas são “best guess”, especialista com formação acadêmica em área relacionada e sem experiência, além de julgamento não seguro e fortes divergências de outros especialistas.
A tecnologia relacionada ao risco tem comprovação em voo e muito baixa dificuldade de realização, enquanto o projeto conceitual é bastante maduro.	A tecnologia relacionada ao risco é qualificada ou tem demonstração em ambiente espacial e há pequena ou moderada dificuldade de realização, enquanto o projeto conceitual tem boa maturidade.	A tecnologia relacionada ao risco tem demonstração ou validação em ambiente relevante e moderado ou alta dificuldade de realização, enquanto o estudo conceitual explorou o espaço de alternativas de soluções candidatas (arquiteturas).	A tecnologia relacionada ao risco tem validação em laboratório ou funcionalidades experimentalmente demonstradas e muito alta dificuldade de realização, enquanto o estudo conceitual analisou a viabilidade preliminar da missão e estabeleceu os requisitos.	A tecnologia relacionada ao risco é conceitual ou tem os princípios básicos observados e o grau de dificuldade de realização é extremo, enquanto o estudo explorou as necessidades de stakeholders e objetivos da missão.
Os processos de gerenciamento de risco são maduros, continuamente monitorados, revisados e otimizados. A cultura de risco é bem difundida, as estratégias partem do mais alto nível de governança e há o envolvimento proativo e colaborativo de todas as partes interessadas (internas e externas).	Os processos de gerenciamento de risco são consistentes, sistemáticos (organizacionais). A cultura de risco é conhecida e há o envolvimento por compartilhamento entre as partes interessadas, mas não são homogêneos em toda a organização.	Os processos de gerenciamento de risco são compartilhados entre alguns grupos. A cultura organizacional de risco está em desenvolvimento e há um envolvimento local e proativo das partes interessadas no gerenciamento de riscos.	Os processos de gerenciamento de riscos são locais e individuais. Não há uma cultura de risco estabelecida, apesar do reconhecimento dos seus benefícios e o envolvimento das partes interessadas é limitado.	Não existem processos de gerenciamento de riscos, noção sobre cultura de risco, entendimento dos princípios e processos de gerenciamento de riscos, além de existir comportamento reativo aos eventos de risco (“apagar incêndio”).
Os conceitos de psicologia e ciências sociais de tomadas de decisão ao risco são plenamente conhecidos. A possibilidade de existência de vieses, distorções provocadas pelo comportamento ao risco e seus potenciais impactos para o risco são identificados, analisados e informados ao usuário.	Os conceitos de psicologia e ciências sociais de tomadas de decisão ao risco são conhecidos. A possibilidade de existência de vieses, distorções provocadas pelo comportamento ao risco e seus potenciais impactos para o risco são identificados.	Os conceitos de psicologia e ciências sociais de tomadas de decisão ao risco são parcialmente conhecidos. A possibilidade de existência de vieses, distorções provocadas pelo comportamento ao risco e seus potenciais impactos para o risco são parcialmente ou pontualmente identificados.	Não é possível afirmar a existência de conhecimento (incipiente) ou há negligência sobre os conceitos de psicologia e ciências sociais de tomadas de decisão ao risco. A possibilidade de existência de vieses, distorções provocadas pelo comportamento ao risco e seus potenciais impactos para o risco não são identificados e avaliados.	Não há conhecimento dos conceitos de psicologia e ciências sociais de tomadas de decisão ao risco. Não há qualquer consciência sobre a possibilidade de existência de vieses, o comportamento ao risco e seus potenciais impactos para o risco.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Esta abordagem foi aplicada em um estudo de caso, com a avaliação de riscos (ID1 a ID14) derivados de um estudo conceitual realizado no CPRIME e contou com a participação dos especialistas (E1 a E7) responsáveis ou maiores afetados pela identificação e avaliação dos riscos à época do estudo. Os resultados obtidos são sumarizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados de avaliação dos fundamentos de riscos do estudo de caso.

Risco conhecido	Risco mensurável	Risco identificável	Risco suposto	Preocupação
ID5 (E6) ID8 (E2) ID13 (E4)	ID1 (E3) ID3 (E1, E2) ID4 (E2) ID6 (E5) ID8 (E1)	ID2 (E3) ID6 (E6) ID9 (E1, E2) ID11 (E2, E5) ID12 (E2)	ID4 (E1) ID10 (E7) ID11 (E1) ID14 (E4)	

	ID12 (E5) ID7 (E8)			
Notação: ID risco (ID especialista) ▼ Indicação de diferentes avaliações do mesmo risco, por diferentes especialistas.				

4. DISCUSSÃO

Os resultados do estudo de caso mostram que há uma distinção entre os fundamentos dos diferentes riscos avaliados, mostrando a eficácia da abordagem. Mesmo que alguns riscos avaliados, por diferentes especialistas, tenham apresentado julgamentos distintos, as diferenças são majoritariamente pequenas (exceto para o ID4).

Nota-se também que nenhum risco foi avaliado como “preocupação”, refletindo a característica da amostragem de riscos utilizada no estudo de caso. Ou seja, dado que os riscos são os resultados de um estudo conceitual e foram registrados no relatório final do estudo, são aqueles mais importantes e representativos.

Algumas limitações do método experimental adotado estão relacionadas à avaliação dos riscos (*a posteriori*), ao não exercício de todas as funcionalidades da abordagem (ex. diferentes contextos organizacionais com o envolvimento de especialistas de outras organizações), a dificuldade quanto a introdução de novos conceitos aos entrevistados (ex. percepção e comportamento ao risco) e a necessidade de julgamento de características globais do contexto do risco utilizando somente a visão do especialista (ex. maturidade da organização ao risco). Adicionalmente, os entrevistados registraram algumas dificuldades relacionadas diretamente a construção do método proposto:

- dificuldade de julgamento quanto à agregação de muitas características em um mesmo nível descritivo, gerando dúvida na decisão.
- restrição quanto a caracterização tecnológica apenas ao segmento espacial para os níveis mais altos de maturidade (i.e., qualificadores: comprovação em voo, demonstração em ambiente espacial).
- dificuldade de avaliação de características tecnológicas para riscos programáticos, devido à necessidade de associação do risco com uma tecnologia ou conjunto tecnológico (TRL *weakest link / roll-up* ^[34]).

Quanto às questões relacionadas à construção do método proposto, a agregação de muitas características para qualificar os diferentes níveis descritivos de fundamentos é utilizada para facilitar a diferenciação entre os níveis, dado que, descrições mais genéricas podem resultar em maior subjetividade e ambiguidade. A questão de restrição aos qualificadores tecnológicos utiliza como referência o TRL ^[2,22], mas é possível adotar outros qualificadores (ex. comprovação em ambiente operacional real). A dificuldade de avaliação de características tecnológicas para riscos programáticos é minimizada com a seguinte instrução para julgamento: quando o avaliador entende que não há qualquer impacto de natureza tecnológica para o risco em avaliação, o nível de maturidade tecnológica deve ser considerado o mais alto possível.

A utilização do método proposto, provê aos stakeholders uma indicação sobre os fundamentos dos riscos identificados e avaliados, permitindo um nível próprio de julgamento para as tomadas de decisões. Onde um risco avaliado com fundamentos mais fracos, por exemplo, na categoria “preocupação”, combinado com a avaliação em níveis preocupantes da magnitude do risco (alta probabilidade de ocorrência e grandes consequências), poderiam ser melhor investigados anteriormente à realização de ações de mitigação do risco que envolvam muitos recursos. Essa característica também poderia ser empregada como critério de gerenciamento em outras atividades, inclusive para marcos de projeto.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma visão geral das diferentes abordagens de análise de risco utilizadas em um ambiente de engenharia simultânea para o desenvolvimento e análise conceitual de missões espaciais (CPRIME) e uma proposta de abordagem auxiliar visando melhorar o nível informacional disponibilizado aos stakeholders, quanto aos fundamentos que sustentam um risco identificado e avaliado, para tomadas de decisão informadas ao risco (RIDM).

Os resultados iniciais obtidos apresentam aceitável convergência de avaliação e sensibilidade na avaliação dos fundamentos de um risco. Algumas dificuldades de aplicação prática ainda estão em exploração, assim como as políticas de gestão para utilização desse parâmetro. A aplicação do método proposto, auxilia na

informação aos stakeholders sobre a solidez de um risco proposto, provendo mais elementos para suportar tomadas de decisão.

6. REFERÊNCIAS

- [1] NASA. (2011). *NASA/SP-2011-3422 NASA Risk Management Handbook* (Issue November, p. 256). <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20120000033>
- [2] NASA. (2016). *NASA/SP-2016-6105 NASA Systems Engineering Handbook*. In *NASA* (Issue Rev. 2, p. 297).
- [3] Case, K., Nash, A., Austin, A., & Murphy, J. (2021). The Evolution of Team-X: 25 Years of Concurrent Engineering Design Experience. *2021 IEEE Aerospace Conference (50100)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/AERO50100.2021.9438521>
- [4] Hihn, J. M., & Chattopadhyay, D. (2021). What Makes Hybrid Concurrent Engineering Teams Work and Not Work: A Theoretical Analysis. *2021 IEEE Aerospace Conference (50100)*, 1–17. <https://doi.org/10.1109/AERO50100.2021.9438283>
- [5] Hihn, J., Chattopadhyay, D., & Shishko, R. (2012). Risk identification and scoring in early-lifecycle concurrent engineering teams. *Innovations in Systems and Software Engineering*, 8(3), 213–221. <https://doi.org/10.1007/s11334-012-0187-2>
- [6] Hihn, J., Chattopadhyay, D., & Shishko, R. (2010). Risk Identification and Visualisation in a Concurrent Engineering Team Environment. *ISPA/SCEA 2010 Proceedings*, 10.
- [7] Hihn, J., Chattopadhyay, D., Hanna, R., Port, D., & Eggleston, S. (2010). Identification and Classification of Common Risks on Space Based Science Missions. *AIAA Space 2010 Conference, September*, 15.
- [8] Van Bossuyt, D., Hoyle, C., Tumer, I. Y., Malak, R., Doolen, T., & Dong, A. (2012). *Toward an Early-Phase Conceptual System Design Risk-Informed Decision Making Framework. Volume 3:*, 1777–1788. <https://doi.org/10.1115/IMECE2012-89639>
- [9] Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On The Quantitative Definition of Risk. *Risk Analysis*, 1(1), 11–27. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x>
- [10] Galavotti, M. C. (2017). The Interpretation of Probability: Still an Open Issue? 1. *Philosophies*, 2(4), 20. <https://doi.org/10.3390/philosophies2030020>
- [11] Aven, T. (2012). The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering & System Safety*, 99, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.11.006>
- [12] Aven, T., & Flage, R. (2020). Foundational Challenges for Advancing the Field and Discipline of Risk Analysis. *Risk Analysis*, 40(S1), 2128–2136. <https://doi.org/10.1111/risa.13496>
- [13] Cox, L. A. J. (2008). What's wrong with risk matrices? *Risk Analysis : An Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 28(2), 497–512. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x>
- [14] Duijm, N. J. (2015). Recommendations on the use and design of risk matrices. *Safety Science*, 76, 21–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.02.014>
- [15] Costa, L. L., & de Sousa, F. L. (2018). Abordagens de Análise de Risco no CPRIME. *Anais WETE 2018*, 27. <http://www.inpe.br/wete/2018/>
- [16] Chagas, R. A., de Sousa, F. L., Louro, A. C., & dos Santos, W. G. (2019). Modeling and design of a multidisciplinary simulator of the concept of operations for space mission pre-phase A studies. *Concurrent Engineering*, 27(1), 28–39. <https://doi.org/10.1177/1063293X18804006>
- [17] Paté-Cornell, E. (2007). Probabilistic Risk Analysis Versus Decision Analysis: Similarities, Differences and Illustrations. In M. Abdellaoui, R. D. Luce, M. J. Machina, & B. Munier (Eds.), *Uncertainty and*

Risk: Mental, Formal, Experimental Representations (pp. 223–242). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-48935-1_13

- [18] SRA. (2018). *Society for Risk Analysis Glossary* (Issue August, p. 9). <http://www.sra.org/resources>
- [19] Flage, R., & Aven, T. (2009). EXPRESSING AND COMMUNICATING UNCERTAINTY IN RELATION TO QUANTITATIVE RISK ANALYSIS. *Reliability: Theory & Applications*, 4(#2 (13)), 9–18.
- [20] Aven, T. (2013). A conceptual framework for linking risk and the elements of the data–information–knowledge–wisdom (DIKW) hierarchy. *Reliability Engineering & System Safety*, 111, 30–36.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.09.014>
- [21] Sherwood, B., & McCleese, D. (2011). JPL Innovation Foundry. *Acta Astronautica*, 89, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2013.04.020>
- [22] Mankins, J. C. (1995). *Technology Readiness Levels – A White Paper* (p. 5). Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology (NASA).
- [23] Mankins, J. C. (2009). Technology readiness and risk assessments: A new approach. *Acta Astronautica*, 65(9–10), 1208–1215. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2009.03.059>
- [24] INCOSE, R., PMI, R., & APM (UK), R. (2002). *Risk Management Maturity Level Development (RMRP-2002-02)*.
- [25] Raz, T., Shenhar, A. J., & Dvir, D. (2002). Risk management, project success, and technological uncertainty. *R&D Management*, 32(2), 101–109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1467-9310.00243>
- [26] Slovic, P. (2010). The Psychology of risk. *Saude e Sociedade*, 19, 731–747.
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-12902010000400002&nrm=iso
- [27] Renn, O. (2008). Risk Perception. In O. Renn (Ed.), *Risk Governance Coping with Uncertainty in a Complex World* (1st ed., pp. 93–148). Earthscan. <https://doi.org/10.4324/9781849772440>
- [28] Wärneryd, K. E. (1996). Risk attitudes and risky behavior. *Journal of Economic Psychology*, 17(6), 749–770. [https://doi.org/10.1016/S0167-4870\(96\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0167-4870(96)00034-7)
- [29] Renn, O., & Rohrman, B. (2000). Cross-Cultural Risk Perception: State and Challenges. In O. Renn & B. Rohrman (Eds.), *Cross-Cultural Risk Perception: A Survey of Empirical Studies* (pp. 211–233). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4891-8_6
- [30] Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science*, 185(4157), 1124 LP – 1131. <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>
- [31] Trimpop, R. M. (1994). Chapter 1: What Is Risk Taking Behavior’. In *Advances in Psychology* (Vol. 107, pp. 1–14). North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)61295-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61295-9)
- [32] Kahneman, D. (2003). Maps of Bounded Rationality: Psychology for Behavioral Economics. *The American Economic Review*, 93(5), 1449–1475. <http://www.jstor.org/stable/3132137>
- [33] Gigerenzer, G. (2011). Heuristics: The foundations of adaptive behavior. In G. Gigerenzer, R. Hertwig, & T. Pachur (Eds.), *Heuristics: The foundations of adaptive behavior*. Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199744282.001.0001>
- [34] Hirshorn, S., & Jefferies, S. (2016). *Final Report of the NASA Technology Readiness Assessment (TRA) Study Team* (Issue March 2016). <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20170005794>