

**ARQUITETURA SOCIOTÉCNICA DE GESTÃO DO CONHECIMENTO
EM PROJETOS ACADÊMICOS CUBESAT*****SOCIOTECHNICAL KNOWLEDGE MANAGEMENT ARCHITECTURE
FOR ACADEMIC CUBESAT PROJECTS*****Maria Eduarda Mora-Camino Priante**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) – Brasil.

E-mail: eduardamora@ita.br

Thainara Pereira dos Santos

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) – Brasil.

E-mail: thainara19@outlook.com**Luís Eduardo Vergueiro Loures da Costa**

Dr. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) – Brasil.

E-mail: loures@ita.br**Carlos Henrique Netto Lahoz**

Dr. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) – Brasil.

E-mail: lahoz@ita.br**RESUMO**

Objetivo: este artigo propõe uma arquitetura sociotécnica de Gestão do Conhecimento para projetos acadêmicos CubeSat, articulando o Método de Gestão do Conhecimento Aeroespacial (MGCA), a Matriz de Competências e Habilidades (MCH) e o ciclo de vida de Engenharia de Sistemas. Originalidade/Valor: a contribuição está em deslocar a GC de uma prática documental posterior ao projeto para uma função transversal de governança do conhecimento crítico, capaz de apoiar decisões técnicas, sucessão de equipes e rastreabilidade entre conhecimentos, requisitos, competências e riscos. Metodologia: desenvolveu-se uma pesquisa aplicada, qualitativa, exploratória e propositiva, baseada em revisão narrativa-integrativa da literatura sobre GC, conhecimento tácito, conhecimento crítico, sistemas aeroespaciais, CubeSats acadêmicos e Engenharia de Sistemas, seguida da modelagem conceitual da arquitetura. Resultados: a arquitetura organiza a GC em camadas, ciclos decisórios e artefatos operacionais, conectando diagnóstico de criticidade, mapeamento de competências, risco de perda de conhecimento, repositório técnico e ações de transferência ao longo do ciclo de vida. Implicações Práticas: a proposta oferece orientação metodológica para coordenadores, equipes técnicas e instituições acadêmicas que buscam reduzir vulnerabilidades decorrentes da rotatividade estudantil, da concentração de conhecimento tácito e da documentação fragmentada em projetos CubeSat.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão do Conhecimento, CubeSat, Engenharia de Sistemas, Competências, Conhecimento Crítico.

ABSTRACT

Objective: this paper proposes a sociotechnical Knowledge Management architecture for academic CubeSat projects by integrating the Aerospace Knowledge Management Method (MGCA), the Competency and Skills Matrix (MCH), and the Systems Engineering life cycle. **Originality/Value:** the contribution lies in shifting Knowledge Management from a late documentation activity to a cross-cutting governance function for critical knowledge, supporting technical decisions, team succession, and traceability among knowledge, requirements, competencies, and risks. **Methodology:** the study is applied, qualitative, exploratory, and propositional, based on a narrative-integrative literature review on Knowledge Management, tacit knowledge, critical knowledge, aerospace systems, academic CubeSat projects, and Systems Engineering, followed by the conceptual modeling of the proposed architecture. **Results:** the architecture structures Knowledge Management into layers, decision cycles, and operational artifacts, linking criticality assessment, competency mapping, knowledge-loss risk, technical repositories, and transfer actions across the life cycle. **Practical Implications:** the proposal provides methodological guidance for coordinators, technical teams, and academic institutions seeking to reduce vulnerabilities caused by student turnover, tacit knowledge concentration, and fragmented documentation in CubeSat projects.

KEYWORDS: Knowledge Management, CubeSat, Systems Engineering, Competencies, Critical Knowledge.

1. INTRODUÇÃO

CubeSats são satélites de pequeno porte e arquitetura modular, baseados em unidades padronizadas, frequentemente empregados por universidades e centros de pesquisa em missões científicas, tecnológicas e de formação. Essa padronização favorece o desenvolvimento incremental e a integração de subsistemas, mas não elimina a complexidade técnica e organizacional típica de sistemas espaciais (HARTZELL et al., 2021; PRIANTE; SATO; COSTA, 2025). Projetos acadêmicos CubeSat ocupam uma posição singular entre a formação de recursos humanos, a experimentação tecnológica e o desenvolvimento de sistemas espaciais reais. Diferentemente de exercícios didáticos isolados, esses projetos combinam requisitos de missão, interfaces entre subsistemas, decisões de arquitetura, restrições de massa, potência e comunicação, processos de verificação e validação, além de aprendizado intensivo em equipe. Essa combinação faz com que o conhecimento técnico não seja apenas um insumo do projeto,

mas parte da própria infraestrutura que permite que o sistema evolua de uma ideia de missão para uma solução espacial integrada.

A literatura recente sobre gestão do conhecimento em engenharia tem reforçado que ambientes técnicos complexos dependem simultaneamente de conhecimento explícito, registrado em modelos, planilhas, relatórios e procedimentos, e de conhecimento tácito, incorporado em especialistas, práticas de bancada, decisões de projeto, critérios de julgamento e experiência acumulada. Revisões sobre conhecimento tácito em setores de engenharia indicam que a captura, a transferência e a reutilização desse conhecimento continuam sendo desafios centrais, especialmente quando há dependência de especialistas, baixa padronização de registros e dificuldade de explicitar raciocínios técnicos (JAYARAM; BHATTA, 2023; ADESINA, 2024).

Em projetos CubeSat conduzidos em universidades, esse desafio é ampliado por uma condição organizacional recorrente: a equipe técnica é temporária. Estudantes ingressam, aprendem, assumem responsabilidades, concluem disciplinas ou pesquisas e deixam o projeto, levando consigo parte do entendimento acumulado sobre decisões, erros, soluções testadas e justificativas de arquitetura. Assim, a perda de conhecimento não ocorre apenas quando documentos desaparecem; ela ocorre quando uma equipe já não consegue explicar por que determinada interface foi definida, por que certo componente foi selecionado, quais restrições orientaram um cálculo ou quais incertezas permaneceram abertas em uma fase anterior.

Essa situação evidencia uma limitação de abordagens de GC centradas exclusivamente na documentação. Embora relatórios, repositórios e lições aprendidas sejam necessários, eles não são suficientes quando não estão conectados aos momentos decisórios do ciclo de vida, às competências efetivamente disponíveis na equipe e aos riscos associados à concentração de conhecimento. A documentação isolada tende a registrar o resultado final de uma decisão; entretanto, projetos intensivos em engenharia demandam também a retenção do raciocínio técnico, dos critérios de trade-off, dos vínculos com requisitos e das competências necessárias para interpretar, atualizar e reutilizar os registros produzidos.

A Engenharia de Sistemas oferece uma base relevante para enfrentar essa lacuna, pois organiza o desenvolvimento de sistemas complexos por meio de processos técnicos e gerenciais ao longo do ciclo de vida. O manual de Engenharia de Sistemas da NASA destaca a natureza iterativa desses processos e a relação entre requisitos, arquitetura, integração, verificação, validação e gestão técnica. A quinta edição do Systems Engineering Handbook do INCOSE, alinhada à ISO/IEC/IEEE 15288:2023, reforça a importância dos processos de ciclo de vida e

da aplicação integrada de métodos, práticas e competências em sistemas complexos (NASA, 2016; INCOSE, 2023).

A questão que se coloca, portanto, não é apenas como armazenar conhecimento em projetos CubeSat acadêmicos, mas como governar conhecimento crítico ao longo do ciclo de vida. Isso implica identificar quais conhecimentos sustentam decisões técnicas relevantes, avaliar sua criticidade, mapear quem possui as competências associadas, reconhecer vulnerabilidades decorrentes de lacunas ou concentração de domínio e criar mecanismos de transferência e institucionalização antes que a perda de conhecimento comprometa a continuidade do projeto.

Este artigo parte dessa problemática para propor uma arquitetura sociotécnica de Gestão do Conhecimento que integra três eixos: o Método de Gestão do Conhecimento Aeroespacial (MGCA), a Matriz de Competências e Habilidades (MCH) e o ciclo de vida de Engenharia de Sistemas. O termo sociotécnico é adotado porque a arquitetura considera simultaneamente artefatos técnicos, processos de engenharia, competências humanas, responsabilidades organizacionais e mecanismos de aprendizagem coletiva.

A pergunta de pesquisa que orienta o trabalho é: como estruturar uma arquitetura metodológica de GC capaz de integrar conhecimentos críticos, competências da equipe e fases do ciclo de vida em projetos acadêmicos CubeSat? O objetivo geral é propor uma arquitetura integrada que permita tratar o conhecimento crítico como ativo rastreável, avaliável e transferível, articulando decisões técnicas, competências humanas e riscos de perda de conhecimento. Como objetivos específicos, busca-se: caracterizar a lacuna entre documentação e governança do conhecimento; revisar fundamentos recentes de GC aplicáveis a ambientes de engenharia; modelar a integração entre MGCA, MCH e ciclo de vida; e demonstrar conceitualmente sua aplicação em subsistemas CubeSat.

Além desta introdução, o artigo está organizado em quatro seções principais. A Seção 2 apresenta o referencial teórico sobre Gestão do Conhecimento, conhecimento crítico, conhecimento tácito, competências, projetos CubeSat acadêmicos e Engenharia de Sistemas. A Seção 3 descreve a metodologia adotada para integrar o MGCA, a MCH e o ciclo de vida do sistema, explicitando os critérios de criticidade e proficiência utilizados na arquitetura. A Seção 4 apresenta os resultados e a discussão, detalhando as camadas funcionais, os artefatos operacionais e a aplicação conceitual em subsistemas CubeSat. Por fim, a Seção 5 reúne as considerações finais, contribuições, implicações teóricas, práticas e gerenciais, limitações e possibilidades de estudos futuros. A Figura 1 antecipa a lógica integrada da arquitetura,

representando a articulação entre ciclo de vida, aplicação do MGCA, curadoria e repositório de GC, e reutilização do conhecimento por equipes e projetos futuros.

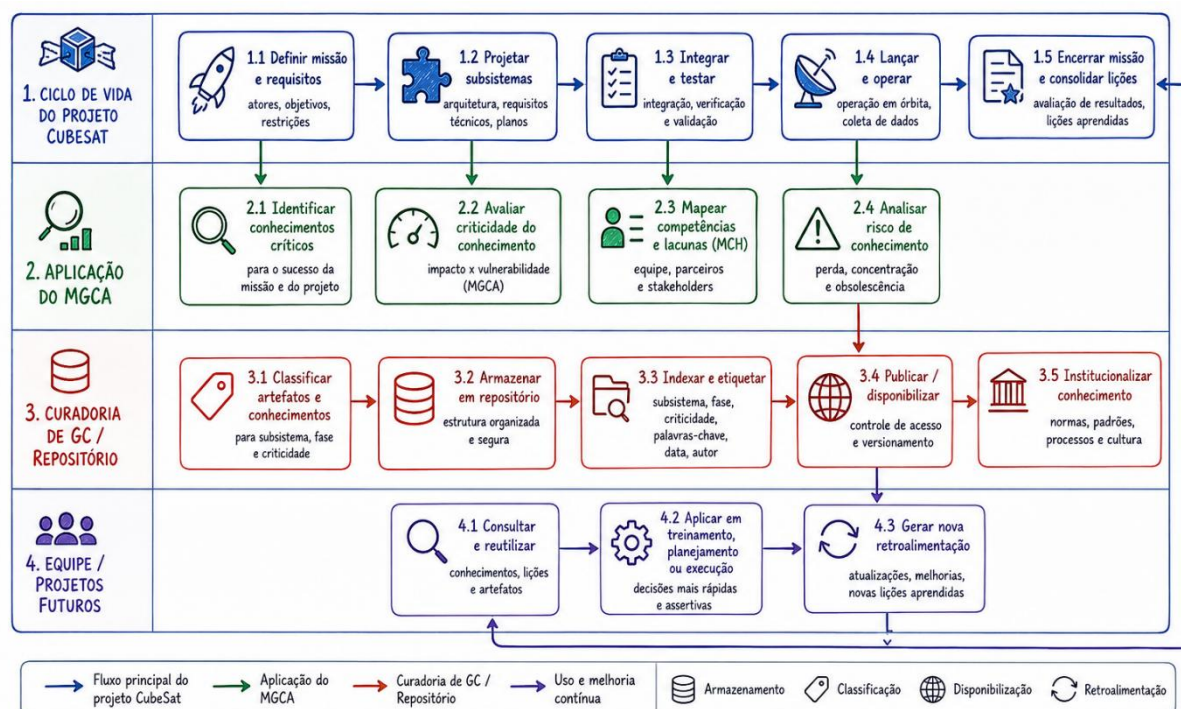


Figura 1 - Fluxo integrado da arquitetura sociotécnica de Gestão do Conhecimento

Fonte: Elaborado pelos autores

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conhecimento como infraestrutura sociotécnica em projetos de engenharia

A Gestão do Conhecimento (GC) pode ser compreendida como o conjunto de princípios, processos e práticas que permitem criar, compartilhar, preservar e aplicar conhecimento para gerar valor organizacional. Em ambientes de engenharia, esse valor está associado à capacidade de tomar decisões técnicas justificadas, evitar retrabalho, preservar memória de projeto, reduzir incertezas e sustentar a aprendizagem entre ciclos de desenvolvimento. A ISO 30401 define requisitos para estabelecer, implementar, manter, revisar e melhorar sistemas de gestão do conhecimento em organizações, reforçando que a GC deve ser tratada como sistema de gestão e não apenas como coleção de ferramentas (ISO, 2018). Em engenharia e desenvolvimento de software, revisões sobre sistemas de GC também enfatizam que a criação, o armazenamento, a recuperação, a transferência e a aplicação do conhecimento dependem de processos organizacionais e tecnológicos integrados (ALAVI; LEIDNER, 2001; BJØRNSON; DINGSØYR, 2008).

A perspectiva sociotécnica é particularmente adequada para projetos aeroespaciais porque o conhecimento de engenharia não reside apenas em documentos ou bases de dados. Ele

emerge da interação entre pessoas, métodos, artefatos, simulações, procedimentos, normas, plataformas digitais, revisões técnicas e práticas de integração. Assim, um relatório de teste ou uma planilha de orçamento de potência só se torna conhecimento reutilizável quando existem competências para interpretá-lo, critérios para avaliar sua validade, contexto para compreender suas premissas e mecanismos para conectá-lo a requisitos e decisões posteriores.

A literatura clássica de GC diferencia conhecimento tácito e explícito. O conhecimento explícito pode ser codificado, armazenado e transmitido por documentos, modelos, procedimentos e bases de dados. O conhecimento tácito, por sua vez, está associado à experiência, ao julgamento, às heurísticas e às habilidades incorporadas em indivíduos ou comunidades de prática. Em engenharia, essa distinção é crítica: uma equipe pode possuir todos os arquivos de um projeto anterior e, ainda assim, não conseguir reproduzir decisões se não compreender as premissas, exceções, raciocínios e aprendizados práticos que originaram tais arquivos.

2.2 Conhecimento tácito, criticidade e risco de perda

Conhecimento crítico é o conhecimento cuja ausência, perda, obsolescência ou indisponibilidade pode comprometer objetivos relevantes do projeto. Em sistemas aeroespaciais, essa criticidade pode estar associada ao desempenho da missão, à segurança, à confiabilidade, à conformidade regulatória, à integração entre subsistemas, à interpretação de dados de teste ou à continuidade da equipe. O conhecimento torna-se crítico não apenas por sua sofisticação técnica, mas por sua relação com decisões de alto impacto e pela dificuldade de substituição em prazo compatível com o projeto.

Revisões recentes sobre conhecimento tácito em indústrias de engenharia destacam que a gestão desse tipo de conhecimento exige instrumentos combinados: socialização, mentoria, observação de práticas, documentação contextualizada, comunidades técnicas, análise de lições aprendidas e mecanismos de retenção. Jayaram e Bhatta (2023) propõem uma leitura sistêmica da literatura sobre conhecimento tácito em engenharia, indicando que a transferência depende tanto de fatores humanos quanto de mecanismos organizacionais. Adesina (2024), ao revisar literatura do período da pandemia, identifica fatores como capacidade absorptiva, espaços colaborativos, aceitação de erros e disposição para compartilhar como condições relevantes para otimizar a gestão do conhecimento tácito.

Esses achados são importantes para projetos acadêmicos CubeSat porque a vulnerabilidade não decorre somente da falta de documentos, mas também da fragilidade das relações de aprendizagem. Quando um aluno domina um procedimento de calibração, um código de controle ou uma planilha de dimensionamento, mas esse domínio não é transferido,

validado e institucionalizado, o projeto fica exposto a risco de descontinuidade. Portanto, a GC deve incluir mecanismos para identificar conhecimentos concentrados em indivíduos, avaliar a maturidade de domínio da equipe e antecipar ações de transferência antes de transições de equipe, especialmente em contextos de sucessão e mudança geracional (IGOA-IRAOLA; DÍEZ, 2024).

2.3 De lições aprendidas a arquiteturas de conhecimento

Lições aprendidas representam um instrumento tradicional de GC em projetos. Em organizações aeroespaciais, bases de lições aprendidas são utilizadas para registrar eventos, anomalias, recomendações e experiências de missões anteriores. A NASA mantém sistemas oficiais de lições aprendidas e iniciativas de gestão do conhecimento associadas a programas, projetos e aprendizagem técnica, evidenciando a relevância institucional da aprendizagem em ambientes de alta complexidade (NASA, 2025a; NASA, 2025b). Entretanto, a efetividade das lições aprendidas depende de sua integração aos processos decisórios. Quando são registradas apenas ao final do projeto ou desvinculadas de requisitos, riscos e responsáveis, podem se tornar um arquivo retrospectivo com baixo impacto sobre decisões futuras.

Experiências institucionais recentes também reforçam que sistemas de lições aprendidas e serviços de aprendizagem técnica devem preservar contexto, recomendações e acesso reutilizável ao conhecimento, apoiando treinamento, melhoria contínua e transferência entre equipes técnicas (NASA APPEL KNOWLEDGE SERVICES, 2025; NESC ACADEMY, 2024).

Uma arquitetura de conhecimento difere de uma simples base documental porque organiza relações entre elementos. Em vez de armazenar documentos de forma isolada, ela conecta conhecimentos críticos a subsistemas, requisitos, competências, fases do ciclo de vida, riscos, artefatos e responsáveis. Essa lógica dialoga com tendências recentes em engenharia baseada em conhecimento. Wittenborg et al. (2025), em revisão sistemática sobre Knowledge-Based Aerospace Engineering, identificam a relevância de abordagens estruturadas e semânticas para organizar processos, softwares, dados e conhecimento aeroespacial, incluindo grafos de conhecimento e artefatos reutilizáveis.

No contexto deste artigo, a arquitetura proposta não pretende substituir sistemas semânticos avançados ou plataformas digitais robustas. Seu objetivo é oferecer uma estrutura metodológica aplicável a projetos acadêmicos, nos quais os recursos são limitados, mas a necessidade de rastreabilidade e continuidade é elevada. Assim, a arquitetura organiza a GC em

camadas e artefatos mínimos, permitindo que a equipe avance gradualmente da documentação para a governança do conhecimento crítico.

2.4 Projetos acadêmicos CubeSat como organizações temporárias de conhecimento

CubeSats são satélites de pequeno porte baseados em unidades padronizadas, frequentemente utilizados por universidades, centros de pesquisa e equipes educacionais para desenvolver missões científicas, tecnológicas e de formação. Seu apelo está na possibilidade de acesso relativamente mais viável ao espaço, mas essa viabilidade não elimina a complexidade sistêmica. Um CubeSat integra subsistemas como estrutura, controle térmico, energia, comunicação, computador de bordo, controle de atitude, carga útil e segmento solo. Cada subsistema demanda conhecimentos especializados e, ao mesmo tempo, depende de interfaces com os demais.

Projetos acadêmicos CubeSat podem ser compreendidos como organizações temporárias de conhecimento. Eles reúnem estudantes, professores, pesquisadores, técnicos e parceiros em torno de uma missão com prazo, orçamento e escopo específicos. Essa temporalidade favorece aprendizagem acelerada, mas também cria fragilidade: a memória do projeto precisa sobreviver à troca de membros. Estudos sobre programas universitários CubeSat indicam que rotatividade estudantil, software e documentação estão entre os desafios recorrentes para sustentar missões conduzidas por estudantes, exigindo estratégias de gestão e continuidade técnica (HARTZELL et al., 2021).

Essa condição impõe uma exigência específica à GC: ela deve ser desenhada para ambientes nos quais a mudança de equipe não é uma exceção, mas parte estrutural do sistema organizacional. Portanto, a arquitetura de GC precisa apoiar a entrada de novos membros, a sucessão de responsáveis técnicos, a validação de conhecimentos herdados e a preservação de decisões ao longo de várias coortes acadêmicas.

2.5 Ciclo de vida de Engenharia de Sistemas como eixo organizador da GC

A Engenharia de Sistemas fornece uma lógica de ciclo de vida para organizar o desenvolvimento de sistemas complexos desde a identificação de necessidades até operação, manutenção e encerramento. O manual da NASA descreve processos técnicos e gerenciais interdependentes que atravessam fases de projeto, incluindo definição de requisitos, arquitetura, implementação, integração, verificação, validação e transição. A abordagem reforça que decisões técnicas devem ser rastreáveis, justificadas e avaliadas ao longo do projeto (NASA, 2016). De forma complementar, o NPR 7123.1D estabelece requisitos de processos de Engenharia de Sistemas para programas e projetos da NASA, reforçando a disciplina de

planejamento, definição, análise, verificação, validação e controle técnico ao longo do ciclo de vida (NASA, 2023a).

O INCOSE Systems Engineering Handbook, em sua quinta edição, aprofunda a relação entre conceitos de Engenharia de Sistemas, processos de ciclo de vida e métodos aplicáveis a diferentes domínios de sistemas, em alinhamento com a ISO/IEC/IEEE 15288:2023 (INCOSE, 2023). Essa perspectiva é útil para GC porque cada fase do ciclo de vida demanda e produz diferentes tipos de conhecimento. Na concepção, predominam conhecimentos sobre necessidades, objetivos de missão e stakeholders. Na fase de requisitos, tornam-se críticos conhecimentos sobre restrições, medidas de desempenho e critérios de aceitação. No projeto detalhado, emergem modelos, simulações, trade-offs e interfaces. Na integração e nos testes, aparecem procedimentos, anomalias, evidências e lições práticas. Na operação, o conhecimento crítico passa a envolver procedimentos de missão, contingências e interpretação de dados.

Ao associar GC ao ciclo de vida, evita-se a visão de que conhecimento deve ser organizado apenas ao final do projeto. A proposta defendida neste artigo é que o ciclo de vida funcione como uma sequência de gatilhos de GC. Em cada fase, a equipe deve perguntar: quais conhecimentos são críticos agora? Quem domina esses conhecimentos? Quais evidências demonstram sua maturidade? Quais riscos existem se o responsável sair? Quais artefatos devem ser produzidos para permitir transferência e reutilização?

2.6 Competências, habilidades e vulnerabilidade organizacional

A Matriz de Competências e Habilidades (MCH) é compreendida neste artigo como um instrumento de diagnóstico da capacidade humana disponível no projeto. Ela permite relacionar pessoas, competências técnicas, níveis de domínio, experiências práticas, lacunas de formação e necessidades de capacitação. Em projetos acadêmicos, a MCH tem papel estratégico porque torna visível a distribuição do conhecimento na equipe, especialmente quando determinados subsistemas dependem de poucos membros. Em aplicação anterior no contexto de projetos espaciais acadêmicos, Priante, Sato e Costa (2025) demonstraram que a MCH pode apoiar a identificação de lacunas, a distribuição de competências e decisões de capacitação e continuidade técnica.

A MCH complementa o MGCA porque criticidade de conhecimento e disponibilidade de competência são dimensões distintas. Um conhecimento pode ser tecnicamente crítico, mas bem distribuído entre vários membros capacitados; nesse caso, o risco de perda pode ser moderado. Outro conhecimento pode parecer operacionalmente simples, mas estar concentrado em uma única pessoa; nesse caso, a vulnerabilidade organizacional pode ser alta. A integração

entre MGCA e MCH permite distinguir importância técnica, maturidade de domínio, concentração de conhecimento e urgência de transferência.

Na literatura de competências, a competência é compreendida como mobilização integrada de conhecimentos, habilidades e atitudes em situações concretas de trabalho, o que reforça a necessidade de avaliar não apenas o conhecimento declarado, mas também a autonomia, a capacidade de aplicação e a possibilidade de transferência para outros membros (FLEURY; FLEURY, 2001). Estudos recentes sobre mapeamento de competências também indicam que matrizes desse tipo podem atuar como direcionadoras de conhecimento organizacional quando conectadas a objetivos, responsabilidades, lacunas e decisões de desenvolvimento da equipe (BADIE; ROSTOMYAN, 2025).

A Figura 2 apresenta um exemplo anonimizado da MCH aplicada a domínios de competência, evidenciando como a escala 0-3 permite visualizar lacunas, concentração de domínio e potenciais necessidades de transferência. Essa integração também fortalece a dimensão formativa dos projetos CubeSat. A GC deixa de ser apenas mecanismo de retenção e passa a orientar trilhas de aprendizagem, mentoria, revisão por pares, distribuição de responsabilidades e planejamento de sucessão técnica. Dessa forma, a arquitetura proposta contribui simultaneamente para a continuidade do projeto e para a formação de competências aeroespaciais.

	ANA CAR		BRUNO	CAVALI	DEBORAC	DEN	Dougl	DOUGLAS	EDSON	FELIPE	ISABEL	LIDIA	LUI FER	MANUEL	MARCELO	MATHEUS
1. Management Skills																
GRAND TOTAL	2,5	1,6	0,7	2,5	2,6	0,9	1,2	1,6	2,6	0,9	1,2	2,5	1,0	0,8	2,0	1,2
2. System Engineering Skills																
GRAND TOTAL	1,1	1,5	0,5	0,2	2,4	1,5	1,8	2,1	2,1	1,5	0,9	2,7	0,5	0,9	1,4	1,1
3. Engineering Skills																
↳ Mechanical Engineering																
Partial avg:	0,6	0,0	0,1	0,9	1,1	2,7	0,0	1,4	0,0	1,3	0,7	0,9	0,0	0,0	0,9	1,0
↳ Electrical and Power Engineering																
Partial avg:	0,8	0,2	0,4	0,0	2,0	1,0	0,2	1,2	1,6	1,8	0,4	2,4	0,0	1,4	0,0	1,0
↳ Software and Firmware Engineering																
Partial avg:	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,5	2,0	1,8	0,0	2,3	0,5	0,3	0,0	0,8
↳ Communications Engineering																
Partial avg:	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3	1,0	0,0	0,3	3,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	2,0
↳ Attitude Determination and Control (ADCS)																
Partial avg:	0,7	0,0	1,3	0,0	0,3	1,0	0,0	1,7	0,0	3,0	0,0	1,7	0,0	1,0	0,0	1,7
↳ Thermal Engineering																
Partial avg:	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	1,7	0,0	1,0	0,0	0,7	0,0	1,0	0,0	0,7
↳ Propulsion Engineering																
Partial avg:	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	1,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	1,0
↳ Payload Development																
Partial avg:	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	1,0	0,7	2,0	0,0	3,0	0,0	2,7	0,0	0,3	0,0	2,0
GRAND TOTAL	0,4	0,2	0,3	0,2	0,8	1,5	0,1	1,2	0,8	1,5	0,2	1,7	0,1	0,5	0,2	1,2
4. Ground Systems and Operations																
GRAND TOTAL	0,8	0,4	1,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3	2,4	0,2	0,0	1,7	1,4	0,1	0,0	0,3
5. AIT Skills (Across Disciplines)																
GRAND TOTAL	0,1	0,0	0,0	0,0	2,4	2,9	0,0	2,5	1,4	1,4	0,0	2,4	0,0	0,4	1,0	1,4
6. Machine Learning Skills																
GRAND TOTAL	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,1	1,1	0,0	0,0	0,1
7. Cybersecurity Skills																
GRAND TOTAL	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,7	0,6	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0

Figura 2 - Exemplo real com os 7 subsistemas de MCH aplicada a domínios de competência.

Fonte: Elaborado pelos autores a partir da Matriz de Competências e Habilidades.

Nota: a escala 0-3 indica, respectivamente, ausência de conhecimento, domínio básico supervisionado, atuação intermediária autônoma e domínio avançado com capacidade de orientação técnica.

2.7 Síntese da lacuna teórica e posicionamento da proposta

A revisão bibliográfica indica três movimentos convergentes. Primeiro, a GC contemporânea enfatiza a necessidade de tratar conhecimento como sistema de gestão, integrando pessoas, processos e tecnologias. Segundo, a literatura sobre conhecimento tácito em engenharia evidencia que a transferência depende de práticas sociais, capacidades organizacionais e mecanismos de contextualização. Terceiro, a Engenharia de Sistemas oferece estrutura de ciclo de vida capaz de conectar decisões técnicas, requisitos, riscos e artefatos.

A lacuna explorada por este artigo está na ausência de uma arquitetura metodológica voltada ao contexto acadêmico CubeSat que integre essas três dimensões de forma operacional. A proposta MGCA + MCH + ciclo de vida busca preencher essa lacuna ao transformar a GC em uma função transversal de governança do conhecimento crítico, orientada por criticidade técnica, vulnerabilidade humana e temporalidade do projeto.

Tabela 1 - Referências estruturantes da arquitetura MGCA-MCH-ciclo de vida

Referência estruturante	Contribuição principal	Papel na arquitetura proposta
Nonaka e Takeuchi (1995); Davenport e Prusak (1998)	Diferenciação entre conhecimento tácito, explícito, criação e circulação do conhecimento.	Fundamenta a necessidade de combinar documentação, socialização, interpretação e reutilização.
ISO 30401:2018	Tratamento da GC como sistema de gestão, com processos, papéis e melhoria contínua.	Sustenta a leitura da GC como função de governança e não apenas como repositório.
NASA (2016); INCOSE (2023); ISO/IEC/IEEE 15288:2023	Estruturação de processos técnicos e gerenciais ao longo do ciclo de vida de sistemas.	Define o ciclo de vida como eixo de acionamento dos gatilhos de GC.
Jayaram e Bhatta (2023); Adesina (2024)	Evidenciam barreiras humanas e organizacionais à transferência de conhecimento tácito em engenharia.	Apoiam o uso de mentoria, revisão por pares e institucionalização de conhecimento crítico.
Hartzell et al. (2021); Wittenborg et al. (2025)	Apontam desafios em CubeSats universitários e tendências de engenharia aeroespacial baseada em conhecimento.	Justificam a aplicação em equipes acadêmicas temporárias e a evolução para artefatos rastreáveis.

Fonte: Elaborado pelos autores

3. METODOLOGIA

3.1 Desenho da pesquisa e natureza propositiva

Este estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada, qualitativa, exploratória e propositiva. É aplicada porque busca responder a um problema concreto de projetos acadêmicos CubeSat: a perda, concentração e baixa rastreabilidade de conhecimentos críticos. É qualitativa porque trabalha com categorias conceituais, relações metodológicas e interpretação de literatura, sem pretender produzir generalização estatística. É exploratória porque organiza um campo ainda pouco consolidado na interface entre GC, competências e Engenharia de Sistemas

em projetos CubeSat. É propositiva porque seu resultado principal é uma arquitetura metodológica.

O desenvolvimento do artigo foi conduzido em quatro movimentos metodológicos: revisão narrativa-integrativa, definição dos princípios de modelagem, integração dos instrumentos MGCA e MCH ao ciclo de vida e elaboração de artefatos operacionais para aplicação conceitual.

3.2 Revisão narrativa-integrativa da literatura

A revisão bibliográfica teve caráter narrativa-integrativa. A opção por esse tipo de revisão deve-se ao objetivo do artigo: propor uma arquitetura conceitual a partir da articulação de campos complementares, e não realizar uma revisão sistemática exaustiva. Foram considerados referenciais clássicos de GC, normas e guias aplicáveis a sistemas de GC e Engenharia de Sistemas, estudos recentes sobre conhecimento tácito em engenharia, trabalhos sobre engenharia aeroespacial baseada em conhecimento e publicações sobre desafios de projetos CubeSat acadêmicos.

Os critérios de seleção priorizaram obras capazes de sustentar quatro categorias: (i) natureza e gestão do conhecimento; (ii) conhecimento tácito e criticidade em engenharia; (iii) ciclo de vida e processos de Engenharia de Sistemas; e (iv) gestão de competências e continuidade técnica em equipes temporárias. A revisão também buscou referências recentes para atualizar a discussão e evitar repetição de enfoques exclusivamente clássicos.

3.3 Princípios de modelagem da arquitetura

A arquitetura foi modelada com base em cinco princípios. O primeiro é o princípio da rastreabilidade: todo conhecimento crítico deve poder ser relacionado a subsistemas, requisitos, decisões, artefatos e responsáveis. O segundo é o princípio da temporalidade: a GC deve ser acionada em momentos específicos do ciclo de vida, conforme os riscos e decisões de cada fase. O terceiro é o princípio da criticidade: os conhecimentos devem ser priorizados segundo impacto, dificuldade de substituição, nível de documentação, maturidade e dependência de especialistas. O quarto é o princípio da competência: a organização deve saber quem domina cada conhecimento e com qual nível de autonomia. O quinto é o princípio da institucionalização: conhecimentos críticos devem ser convertidos em artefatos, rotinas e mecanismos de transferência que sobrevivam à saída de indivíduos.

Esses princípios foram traduzidos em camadas, fluxos e artefatos. As camadas definem as funções da arquitetura; os fluxos indicam a sequência de diagnóstico, priorização,

transferência e retroalimentação; e os artefatos materializam os registros necessários para que a GC seja operacionalizada no projeto.

3.4 Protocolo de integração MGCA-MCH-ciclo de vida

Os fundamentos do MGCA retomam e ampliam a lógica de mapeamento de conhecimentos críticos desenvolvida por Priante (2023), enquanto a MCH incorpora aprendizados de sua aplicação em projetos espaciais acadêmicos (PRIANTE; SATO; COSTA, 2025). O protocolo de integração proposto parte do ciclo de vida do projeto. Para cada fase, a equipe identifica os conhecimentos necessários para executar atividades e tomar decisões. Em seguida, aplica-se o MGCA para classificar a criticidade desses conhecimentos. Depois, utiliza-se a MCH para mapear competências disponíveis, lacunas e concentração de domínio. A combinação entre criticidade e distribuição de competências permite estimar o risco de perda de conhecimento. Por fim, são definidas ações de GC: documentação contextualizada, mentoria, revisão por pares, trilhas de capacitação, registro de decisões, padronização de modelos, atualização do repositório e verificação de reutilização.

No MGCA, a classificação do conhecimento crítico não é tratada apenas de forma qualitativa. A priorização é realizada pelo cruzamento entre duas dimensões avaliativas: o valor do conhecimento para a missão (MV), que expressa sua relevância para requisitos, decisões técnicas, desempenho, segurança, integração e continuidade; e o impacto da indisponibilidade ou perda do conhecimento (MI), que representa as consequências de sua ausência para o projeto. A combinação MV x MI gera um escore de criticidade que permite ordenar os conhecimentos mapeados e definir o nível de urgência das ações de retenção, transferência e institucionalização. Em seguida, a MCH complementa essa leitura ao indicar se há pessoas com proficiência suficiente, se o domínio está concentrado em poucos membros e se existem sucessores ou aprendizes capazes de absorver o conhecimento.

Quadro 1 - Métrica de criticidade do MGCA e integração com a MCH

Elemento	Descrição	Uso na arquitetura
MV - valor do conhecimento	Nota atribuída ao valor técnico, estratégico e sistêmico do conhecimento para a missão, considerando requisitos, interfaces, desempenho, segurança, integração e continuidade.	Identifica quais conhecimentos sustentam decisões críticas e devem ser priorizados no MGCA.
MI - impacto da perda	Nota atribuída ao impacto da indisponibilidade, perda, obsolescência ou concentração do conhecimento em poucos membros.	Indica a consequência da ausência do conhecimento para cronograma, qualidade, verificação, operação e sucessão técnica.
Escore MV x MI	Produto ou cruzamento das duas dimensões, utilizado para classificar criticidade em faixas de prioridade, como baixa, moderada, alta ou crítica.	Define a urgência de documentação, mentoria, revisão por pares, treinamento cruzado e institucionalização.
Leitura pela MCH	Análise da proficiência disponível, da distribuição entre membros, das lacunas e da existência de backups técnicos.	Complementa o MGCA ao transformar criticidade em plano de ação humano e organizacional.

Fonte: Elaborado pelos autores

Esse protocolo permite que a GC deixe de ser uma atividade posterior ao projeto e passe a operar como ciclo contínuo: diagnosticar conhecimentos críticos, orientar competências, reduzir vulnerabilidades e institucionalizar aprendizado.

Tabela 2 - Movimentos metodológicos para construção da arquitetura

Movimento	Descrição	Produto metodológico
Revisão narrativa-integrativa	Articulação de literatura sobre GC, conhecimento tácito, engenharia, CubeSat e ciclo de vida.	Categorias conceituais da arquitetura
Definição de princípios	Formulação dos princípios de rastreabilidade, temporalidade, criticidade, competência e institucionalização.	Crítérios de modelagem
Integração MGCA-MCH	Relação entre conhecimento crítico, competência disponível, lacuna e risco de perda.	Matriz integrada de diagnóstico
Vinculação ao ciclo de vida	Associação de ações de GC às fases de concepção, requisitos, projeto, integração, operação e encerramento.	Mapa fase-conhecimento-artefato
Aplicação conceitual	Demonstração da lógica em subsistemas CubeSat.	Quadros de aplicação e discussão

Fonte: Elaborado pelos autores

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Nova lógica da arquitetura: de arquivo técnico a sistema de governança

O principal resultado do artigo é a proposição de uma arquitetura sociotécnica de GC para projetos acadêmicos CubeSat. A arquitetura parte da ideia de que o conhecimento deve ser governado como ativo crítico do projeto, e não apenas armazenado como documentação. Essa distinção é central. Um arquivo técnico preserva registros; uma arquitetura de governança define relações, responsabilidades, prioridades, ciclos de atualização e mecanismos de transferência.

A arquitetura organiza a GC em três movimentos complementares, sintetizados na Figura 3. O primeiro é diagnosticar, identificando conhecimentos críticos, competências disponíveis e vulnerabilidades. O segundo é orientar, vinculando ações de capacitação, documentação e transferência às fases do ciclo de vida. O terceiro é institucionalizar, transformando aprendizado em artefatos, procedimentos, repositórios, trilhas de treinamento e critérios de revisão. Esses movimentos formam um ciclo contínuo, retroalimentado por revisões técnicas, testes, mudanças de requisitos e transições de equipe.



Figura 3 - Arquitetura sociotécnica MGCA-MCH-ciclo de vida

Fonte: Elaborado pelos autores

4.2 Camadas funcionais da arquitetura proposta

A primeira camada é a camada de ciclo de vida. Ela define o momento em que a GC deve ser acionada e impede que a gestão do conhecimento seja concentrada apenas no encerramento do projeto. Cada fase produz perguntas diferentes: na concepção, quais conhecimentos sustentam a missão? Na definição de requisitos, quais critérios devem ser preservados? No projeto detalhado, quais modelos e decisões precisam ser rastreados? Na integração e nos testes, quais anomalias e correções devem ser aprendidas? Na operação, quais procedimentos e contingências são críticos?

A segunda camada é a camada de conhecimento crítico, operacionalizada pelo MGCA. Essa camada identifica conhecimentos essenciais, avalia sua criticidade e prioriza ações. A criticidade é avaliada por critérios como valor para a missão, impacto da perda, dificuldade de substituição, nível de documentação, maturidade técnica e dependência de especialista.

A terceira camada é a camada de competências e habilidades, operacionalizada pela MCH. Ela mapeia quem possui determinado domínio, em que nível, com qual evidência e em qual subsistema. Essa camada permite identificar lacunas e concentração de conhecimento, fornecendo base para mentoria, capacitação e sucessão técnica.

A quarta camada é a camada de risco de conhecimento. Nela, a criticidade técnica é combinada com a vulnerabilidade organizacional. O resultado é a priorização de riscos como dependência de um único membro, ausência de documentação contextualizada, conhecimento não validado, obsolescência de modelos ou baixa capacidade de reutilização.

A quinta camada é a camada de institucionalização. Ela transforma conhecimento crítico em artefatos e práticas: registros de decisão, modelos validados, checklists, guias de cálculo, procedimentos de teste, repositórios versionados, trilhas de capacitação, vídeos técnicos, revisões por pares e relatórios de lições aprendidas.

Tabela 3 - Camadas funcionais da arquitetura sociotécnica

Camada	Questão orientadora	Artefatos resultantes
Ciclo de vida	Em que momento do projeto o conhecimento é necessário, produzido ou validado?	Mapa fase-conhecimento; calendário de revisões de GC
Conhecimento crítico	Quais conhecimentos sustentam decisões, requisitos e continuidade técnica?	Matriz MGCA; ranking de criticidade
Competências e habilidades	Quem domina o conhecimento e qual é a maturidade desse domínio?	MCH; mapa de lacunas; mapa de concentração
Risco de conhecimento	O que acontece se o conhecimento for perdido, ficar obsoleto ou não for transferido?	Matriz de risco de perda de conhecimento
Institucionalização	Como o conhecimento será retido, transferido, atualizado e reutilizado?	Repositório, guias, checklists, registros de decisão e trilhas de formação

Fonte: Elaborado pelos autores

Matriz de Ação do MGCA e MCH

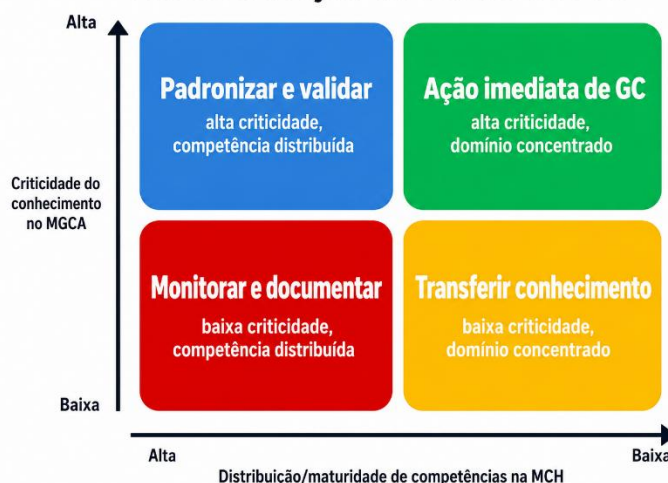


Figura 4 - Matriz de priorização entre criticidade do conhecimento e distribuição de competências

Fonte: Elaborado pelos autores

A matriz da Figura 4 sintetiza a decisão central da arquitetura: conhecimentos de alta criticidade e baixa distribuição de competências devem receber ação imediata de GC, enquanto conhecimentos de baixa criticidade ou já distribuídos podem ser acompanhados por rotinas de monitoramento, documentação e revisão periódica.

4.3 Artefatos operacionais e pontos de decisão

Para que a arquitetura seja aplicável, ela precisa ser traduzida em artefatos simples e recorrentes. O primeiro artefato é o mapa fase-conhecimento, que relaciona cada fase do ciclo de vida aos conhecimentos necessários, produzidos ou validados. O segundo é a matriz MGCA, usada para classificar criticidade. O terceiro é a MCH, que indica domínio, evidência e lacunas. O quarto é a matriz de risco de conhecimento, que combina criticidade e vulnerabilidade. O quinto é o plano de transferência e institucionalização, responsável por definir ações, prazos, responsáveis e artefatos de retenção.

Além dos artefatos, a arquitetura propõe pontos de decisão de GC distribuídos ao longo do ciclo de vida, conforme representado na Figura 5. Antes de uma revisão de requisitos, por exemplo, deve-se verificar se as justificativas de requisitos críticos estão documentadas e se mais de um membro compreende suas premissas. Antes de uma revisão de projeto, deve-se avaliar se os modelos e trade-offs estão rastreados. Antes da integração, deve-se verificar se interfaces, procedimentos e critérios de teste estão disponíveis. Antes de transições de equipe, deve-se acionar mentoria, revisão por pares e atualização do repositório.

Tabela 4 - Gatilhos de GC por fase do ciclo de vida

Fase do ciclo de vida	Gatilho de GC	Exemplo de ação
Concepção da missão	Definição de objetivos, stakeholders e restrições iniciais.	Registrar racional da missão, premissas e necessidades de conhecimento.
Requisitos e arquitetura	Transformação de necessidades em requisitos e interfaces.	Relacionar requisitos a conhecimentos críticos e responsáveis técnicos.
Projeto detalhado	Escolha de soluções, modelos, componentes e trade-offs.	Registrar decisões, alternativas descartadas, modelos e critérios de seleção.
Integração e testes	Execução de procedimentos, anomalias e correções.	Documentar evidências, falhas, ajustes, não conformidades e lições aprendidas.
Operação	Execução da missão, contingências e interpretação de dados.	Preservar procedimentos operacionais, logs, decisões de contingência e análise de dados.
Encerramento e sucessão	Transição de equipe e reutilização em projetos futuros.	Atualizar repositório, consolidar trilhas de capacitação e realizar revisão pós-projeto.

Fonte: Elaborado pelos autores



Figura 5 - Pontos de decisão de GC distribuídos ao longo do ciclo de vida

Fonte: Elaborado pelos autores

4.4 Aplicação conceitual em subsistemas CubeSat

A aplicação conceitual da arquitetura pode ser demonstrada em subsistemas típicos de um CubeSat. O objetivo não é apresentar resultados empíricos finais, mas evidenciar como a arquitetura orienta a identificação, priorização e transferência de conhecimentos críticos. Em cada subsistema, a equipe identifica conhecimentos essenciais, associa competências, avalia riscos e define artefatos de institucionalização.

No ADCS, por exemplo, conhecimentos sobre modelagem de atitude, sensores, atuadores, leis de controle e simulação são críticos porque afetam diretamente apontamento, estabilidade e desempenho da missão. A perda desse conhecimento pode impedir a interpretação de resultados de simulação ou a correção de problemas de integração. No EPS, conhecimentos sobre orçamento de potência, baterias, painéis solares, modos de operação e margens de segurança são essenciais para evitar falhas energéticas. No TT&C, orçamento de enlace, antenas, protocolos e restrições regulatórias precisam estar rastreados para garantir comunicação com a estação solo.

No OBDH, a criticidade está na arquitetura de software embarcado, protocolos de comunicação, tratamento de telemetria, tolerância a falhas e versionamento. No payload, conhecimentos de calibração, operação, processamento de dados e critérios científicos precisam ser conectados às necessidades da missão. No segmento solo, procedimentos de operação, scripts, janelas de comunicação, contingências e análise de telemetria constituem conhecimento operacional que deve ser preservado e treinado.

Tabela 5 - Aplicação conceitual por subsistema CubeSat

Subsistema	Conhecimento crítico	Competência associada	Risco predominante	Artefato de GC
ADCS	Modelagem de atitude, sensores, atuadores e leis de controle.	Dinâmica orbital, controle, simulação e análise de estabilidade.	Dependência de poucos especialistas e baixa reprodutibilidade de simulações.	Guia de simulação, registro de parâmetros, revisão por pares e base de modelos.
EPS	Dimensionamento energético, baterias, painéis solares e modos de operação.	Eletrônica de potência, balanço energético e análise de margens.	Perda de premissas de cálculo e incompatibilidade entre consumo e geração.	Planilha validada, checklist de margens e registro de decisões.
TT&C	Orçamento de enlace, antenas, frequências e protocolos.	RF, telecomunicações, regulação e análise de link budget.	Falha de comunicação por perda de premissas ou interfaces.	Template de link budget, guia de antenas e histórico de testes.
OBDH	Arquitetura de software embarcado, telemetria e protocolos internos.	Programação embarcada, versionamento, interfaces e tolerância a falhas.	Código sem documentação e conhecimento concentrado em desenvolvedores.	Repositório versionado, documentação de interfaces e plano de revisão de código.
Payload	Calibração, operação e interpretação de dados científicos.	Instrumentação, ciência da missão e processamento de dados.	Dados sem rastreabilidade metrológica ou perda de critérios de calibração.	Procedimento de calibração, caderno de dados e lições aprendidas.
Segmento solo	Procedimentos operacionais, scripts, contingências e análise de telemetria.	Operação de missão, automação, comunicação e análise de dados.	Dependência de operadores experientes e baixa padronização de contingências.	Manual de operação, scripts comentados e treinamento de operadores.

Fonte: Elaborado pelos autores

4.5 Discussão: contribuição metodológica e nova visão para GC em CubeSats acadêmicos

A arquitetura proposta oferece uma mudança de perspectiva. A GC deixa de ser tratada como etapa de documentação e passa a ser entendida como mecanismo de governança sociotécnica. Essa mudança é relevante porque projetos CubeSat acadêmicos não fracassam apenas por limitações técnicas; eles também podem ser comprometidos por rupturas de

memória, perda de contexto, baixa maturidade de competências e incapacidade de reutilizar aprendizados anteriores.

A integração MGCA-MCH-ciclo de vida permite distinguir três dimensões frequentemente confundidas. A primeira é a importância técnica do conhecimento, avaliada pelo impacto sobre missão, requisitos e desempenho. A segunda é a maturidade de domínio da equipe, avaliada pela MCH. A terceira é a vulnerabilidade organizacional, relacionada à concentração, documentação, transferibilidade e obsolescência. Ao separar essas dimensões, a arquitetura evita que a equipe priorize apenas aquilo que parece tecnicamente sofisticado, negligenciando conhecimentos simples, mas altamente concentrados ou essenciais para a continuidade.

A força da integração está justamente no fato de que os dois instrumentos respondem a perguntas diferentes e complementares. O MGCA informa quais conhecimentos são críticos e qual é a severidade de sua perda; a MCH informa se a equipe possui proficiência, redundância e capacidade de sucessão para sustentar esses conhecimentos. Assim, um conhecimento com escore elevado no MGCA somente se converte em risco gerenciável quando a MCH revela quem domina o tema, quem pode atuar como backup, quais lacunas precisam ser tratadas e quais ações de capacitação ou transferência devem ser priorizadas.

A proposta também amplia o papel da MCH. Em vez de funcionar apenas como diagnóstico de capacitação, a matriz passa a ser instrumento de gestão de risco. Quando cruzada com o MGCA, ela indica onde a saída de um membro pode gerar lacuna crítica e onde a formação de substitutos deve ser planejada. Isso permite transformar dados de competência em decisões gerenciais: alocar mentores, distribuir responsabilidades, definir trilhas de aprendizagem, antecipar treinamentos e proteger o conhecimento antes de sua perda.

Outro ponto de discussão é a relação entre GC e Engenharia de Sistemas. A arquitetura proposta não cria uma camada paralela ao projeto; ela se conecta aos processos já existentes de requisitos, arquitetura, integração, verificação, validação e operação. Dessa forma, a GC passa a produzir evidências úteis para revisões técnicas. Um requisito crítico, por exemplo, deve estar associado não apenas a uma justificativa técnica, mas também ao conhecimento necessário para interpretá-lo e às competências disponíveis para verificá-lo.

Por fim, a proposta dialoga com tendências recentes de engenharia baseada em conhecimento e organização semântica de artefatos, mas preserva aplicabilidade em contextos acadêmicos. A arquitetura pode ser implementada inicialmente com planilhas, repositórios versionados e formulários estruturados, evoluindo posteriormente para bases mais sofisticadas,

ontologias, grafos de conhecimento ou ambientes MBSE, como sugerem aplicações recentes de grafos de conhecimento em domínios aeroespaciais (TIMMER et al., 2023).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E IMPLICAÇÕES

Este artigo propôs uma arquitetura sociotécnica de Gestão do Conhecimento para projetos acadêmicos CubeSat, integrando o MGCA, a MCH e o ciclo de vida de Engenharia de Sistemas. A proposta parte da premissa de que a continuidade técnica em projetos acadêmicos depende de mais do que documentação: requer governança de conhecimentos críticos, competências humanas e riscos de perda ao longo das fases do projeto.

A principal conclusão é que a GC deve ser concebida como função transversal de Engenharia de Sistemas. Quando associada ao ciclo de vida, ela permite identificar conhecimentos necessários, registrar decisões, orientar capacitações, reduzir concentração de domínio e institucionalizar aprendizados. Quando integrada à MCH, permite avaliar não apenas quais conhecimentos são críticos, mas se a equipe possui capacidade suficiente para mantê-los e transferi-los.

5.1 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

A contribuição central do trabalho está na proposição de uma arquitetura metodológica que conecta criticidade técnica, competências da equipe e temporalidade do ciclo de vida. A proposta contribui para o campo de GC ao deslocar o foco da documentação para a governança do conhecimento crítico em ambientes acadêmicos intensivos em engenharia.

No contexto de projetos CubeSat, a arquitetura oferece um caminho para reduzir vulnerabilidades associadas à rotatividade estudantil, à dependência de especialistas, à fragmentação de registros e à perda de racional técnico. A abordagem também fortalece a formação de equipes ao transformar lacunas de conhecimento em trilhas de capacitação e ações de sucessão técnica.

5.2 IMPLICAÇÕES TEÓRICAS E PRÁTICAS

Do ponto de vista teórico, o artigo aproxima três campos: Gestão do Conhecimento, Engenharia de Sistemas e Gestão de Competências. Essa aproximação permite interpretar projetos CubeSat acadêmicos como sistemas sociotécnicos de conhecimento, nos quais artefatos, processos e pessoas precisam ser analisados conjuntamente.

Do ponto de vista prático, a arquitetura pode orientar a criação de formulários de diagnóstico, matrizes de criticidade, mapas de competências, planos de transferência, repositórios técnicos e checklists de revisão. Sua aplicação pode ser gradual, iniciando por

subsistemas de maior criticidade ou por fases de maior risco, como integração, testes e transição de equipe.

5.3 IMPLICAÇÕES GERENCIAIS

Gerencialmente, a proposta oferece aos coordenadores de projetos uma forma de monitorar riscos de conhecimento. Em vez de avaliar apenas cronograma, orçamento e entregáveis técnicos, a gestão do projeto passa a acompanhar indicadores como concentração de conhecimento, nível de documentação, maturidade de competências, evidências de transferência e atualização de artefatos críticos.

A arquitetura também apoia decisões de alocação de pessoas. Quando um conhecimento crítico está concentrado em um único membro, a coordenação pode priorizar mentoria, revisão por pares, treinamento cruzado e documentação contextualizada. Isso torna a sucessão técnica parte do planejamento do projeto, e não uma reação tardia à saída de estudantes.

5.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA E ESTUDOS FUTUROS

A principal limitação deste estudo é seu caráter conceitual e propositivo. A arquitetura ainda necessita de aplicação empírica em projetos CubeSat reais ou simulados para avaliação de aderência, esforço de implementação, aceitação pela equipe e impacto sobre continuidade técnica. Outra limitação é a ausência de validação quantitativa dos critérios de criticidade e risco, que podem variar conforme maturidade da equipe, escopo da missão e estrutura institucional.

Como estudos futuros, recomenda-se aplicar a arquitetura em um estudo de caso longitudinal, desenvolver instrumentos padronizados para o MGCA e a MCH, definir indicadores de maturidade de GC, integrar a arquitetura a ambientes MBSE e explorar o uso de grafos de conhecimento ou ontologias para aumentar a rastreabilidade entre requisitos, competências, artefatos e lições aprendidas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Espacial ITA e ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) pelo suporte técnico e pela infraestrutura disponibilizados. Este trabalho contou com apoio financeiro dos projetos FINEP nº 01.20.0194.01 (2700/20) - ITASAT-2 e nº 01.22.0488.00 (1308/22). Os autores agradecem ainda à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão das bolsas de mestrado e doutorado.

6. REFERÊNCIAS

ADESINA, A. O. **Optimising tacit knowledge in organisational knowledge management: a systematic review of Covid-era literature.** In: OCHOLLA, D. (ed.). Information, Knowledge, and Technology for Teaching and Research in Africa. Cham: Springer, 2024.

ALAVI, Maryam; LEIDNER, Dorothy E. **Review: knowledge management and knowledge management systems: conceptual foundations and research issues.** MIS Quarterly, Minneapolis, v. 25, n. 1, p. 107-136, 2001.

BADIE, Farshad; ROSTOMYAN, Anna. **Competency mapping as a knowledge driver in modern organisations.** Knowledge, Basel, v. 5, n. 3, art. 13, 2025. DOI: 10.3390/knowledge5030013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/knowledge5030013>. Acesso em: 12 jun. 2026.

BJØRNSON, F. O.; DINGSØYR, T. **Knowledge management in software engineering: a systematic review of studied concepts, findings and research methods used.** Information and Software Technology, v. 50, n. 11, p. 1055-1068, 2008.

DAVENPORT, Thomas H.; PRUSAK, Laurence. **Working knowledge: how organizations manage what they know.** Boston: Harvard Business School Press, 1998.

FLEURY, Maria Tereza Leme; FLEURY, Afonso. **Construindo o conceito de competência.** Revista de Administração Contemporânea, Curitiba, v. 5, n. esp., p. 183-196, 2001.

HARTZELL, C. M. et al. **A methodology for successful university graduate CubeSat programs.** In: AIAA/USU CONFERENCE ON SMALL SATELLITES, 2021, Logan. Proceedings [...]. Logan: Utah State University, 2021.

IGOA-IRAOLA, Elene; DÍEZ, Fernando. **Procedures for transferring organizational knowledge during generational change: a systematic review.** Heliyon, Amsterdam, v. 10, e27092, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27092. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27092>. Acesso em: 12 jun. 2026.

INCOSE. **Systems Engineering Handbook: a guide for system life cycle processes and activities.** 5. ed. Hoboken: Wiley, 2023.

ISO. **ISO 30401:2018: knowledge management systems: requirements.** Geneva: ISO, 2018. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/68683.html>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ISO; IEC; IEEE. **ISO/IEC/IEEE 15288:2023: systems and software engineering: system life cycle processes.** Geneva: ISO, 2023.

JAYARAM, N.; BHATTA, N. M. K. **Tacit knowledge management in engineering industries: systematic literature review and development of a conceptual model.** Journal of Information & Knowledge Management, v. 22, n. 4, art. 2350012, 2023.

NASA. **NASA Systems Engineering Handbook**. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2016. NASA/SP-2016-6105 Rev. 2. Disponível em: https://soma.larc.nasa.gov/lws/vfmo/pdf_files/%5BNASA-SP-2016-6105_Rev2_%5Dnasa_systems_engineering_handbook_0.pdf. Acesso em: 12 jun. 2026.

NASA. **NPR 7123.1D: NASA systems engineering processes and requirements**. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2023a. Disponível em: <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?c=7123&s=1&t=NPR>. Acesso em: 12 jun. 2026.

NASA. **Knowledge Management**. Washington, DC: NASA APPEL Knowledge Services, 2025a. Disponível em: <https://www.nasa.gov/learning-resources/for-professionals/appel-knowledge-management/>. Acesso em: 12 jun. 2026.

NASA. **NASA Lessons Learned**. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2025b. Disponível em: <https://www.nasa.gov/nasa-lessons-learned/>. Acesso em: 12 jun. 2026.

NASA APPEL KNOWLEDGE SERVICES. **APPEL Knowledge Services**. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2025. Disponível em: <https://www.nasa.gov/learning-resources/for-professionals/appel/>. Acesso em: 12 jun. 2026.

NESC ACADEMY. **Technical resources**. Hampton: NASA Engineering and Safety Center, 2024. Disponível em: https://nescacademy.nasa.gov/technical_resources. Acesso em: 12 jun. 2026.

NONAKA, Ikujiro; TAKEUCHI, Hirotaka. **The knowledge-creating company: how Japanese companies create the dynamics of innovation**. New York: Oxford University Press, 1995.

PRIANTE, Maria Eduarda Mora-Camino. **Engenharia versus conhecimento: um estudo de caso de um método de mapeamento de conhecimentos críticos**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2023.

PRIANTE, Maria Eduarda Mora-Camino; SATO, Lidia Hissae Shibuya; COSTA, Luís Eduardo Vergueiro Loures da. **Aplicação de uma Matriz de Competências e Habilidades como ferramenta de Gestão do Conhecimento em projetos espaciais: estudo de caso na missão ITASAT-2 e SelenITA**. In: SIMPÓSIO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (SAEPRO), 9., 2025, Lorena. Anais [...]. Lorena: EEL-USP, 2025. ISBN 978-65-272-2155-5.

SENGE, Peter M. **The fifth discipline: the art and practice of the learning organization**. New York: Doubleday, 1990.

TIMMER, Roelien C. et al. **NASA Science Mission Directorate Knowledge Graph Discovery**. In: ACM WEB CONFERENCE 2023, Austin. Companion Proceedings [...]. New York: ACM, 2023. DOI: 10.1145/3543873.3587585. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3543873.3587585>. Acesso em: 12 jun. 2026.

WITTENBORG, Tim et al. **Knowledge-based aerospace engineering: a systematic literature review**. arXiv, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2505.10142. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2505.10142>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ANEXO

CEI — GUIA DE USO & LEGENDA				
				
Leia antes de usar  SKILL MATRIX é a fonte de dados				
COMO O SISTEMA FUNCIONA — Fonte Única de Verdade				
FONTE ÚNICA DE DADOS: A aba '  SKILL MATRIX ' contém as notas individuais de cada membro em cada habilidade. TODAS as outras abas leem os Grand Totals da Skill Matrix via fórmulas automáticas. Ao alterar qualquer nota na Skill Matrix → os Grand Totals recalculam → TODAS as abas atualizam automaticamente. Não é necessário alterar nada manualmente em outras abas.				
ESCALA DE PROFICIÊNCIA TÉCNICA — LEGENDA OFICIAL				
NOTA	NÍVEL	DESCRIÇÃO	NA PRÁTICA	COR
0	SEM CAPACIDADE	Nenhum conhecimento ou experiência na área.	Não consegue executar. Começa do zero.	■ SEM CAPACIDADE
1	BÁSICO	Conhecimento introdutório. Supervisão constante necessária.	Executa com orientação. Não opera sozinho.	■ BÁSICO
2	INTERMEDIÁRIO	Trabalha de forma independente na maioria das situações.	Entrega sem supervisão. Pode apoiar colegas.	■ INTERMEDIÁRIO
3	AVANÇADO	Domina o tema. Gerencia, orienta a equipe e toma decisões.	Referência técnica. Treina outros. Lidera decisões.	■ AVANÇADO
#	INTERESSE ★	Marcou # = interesse em desenvolver esta habilidade.	Nota e # são independentes. '2#' = nota 2 + quer evoluir.	■ INTERESSE ★
⚠ '2#' = nota 2 (Intermediário) + interesse em crescer. O # NÃO altera a nota. Scores com # são calculados normalmente.				
DESCRIÇÃO DAS ABAS				
	Resumo:	Esta aba. Legenda e instruções.		
	Conteúdo:	Escala 0-3, significado do #, como o sistema de fórmulas funciona.		
	Como usar:	Leitura. Consulte quando tiver dúvidas.		
	Resumo:	★ FONTE DE DADOS — edite as notas aqui.		
	Conteúdo:	213 skills organizadas por seção/grupo. Nota individual de cada membro. Grand Totals calculados automaticamente. Altere aqui → tudo atualiza.		
	Como usar:	🛠 EDITÁVEL — altere as notas nesta aba. Tudo o mais atualiza automaticamente.		
	Resumo:	Visão geral. Scores vêm da Skill Matrix via fórmula.		
	Conteúdo:	Membros ordenados por Overall. 7 domínios com fundo por nível. Overall = MÉDIA dos 7 Grand Totals.		
	Como usar:	Leitura. Os scores atualizam quando você altera a Skill Matrix.		
	Resumo:	Filtrar por subsistema. Dropdown E5.		
	Conteúdo:	Selecione o grupo → outros grupos ficam em cinza. Scores sempre atualizados.		
	Como usar:	Interativo: clique E5 e escolha o grupo.		
	Resumo:	Leaderboard + líderes por domínio.		
	Conteúdo:	🏆 por Overall. Líder de cada domínio.		
	Como usar:	Leitura. Atualiza com a Skill Matrix.		
	Resumo:	Mapa de calor Subsistema × Domínio.		
	Conteúdo:	Médias por grupo. Gráfico de barras e radar.		
	Como usar:	Leitura analítica.		
	Resumo:	Painel de treinamento prioritário.		
	Conteúdo:	🔴 Overall < 1.0 urgente. 🟡 1.0-1.5 em desenvolvimento. Risco por domínio.		
	Como usar:	Decisão: planejar capacitações.		
	Resumo:	Mapa visual por subsistema.		
	Conteúdo:	Cards com tiles de membro. Cor = nível. Número = Overall.		
	Como usar:	Visão visual rápida.		

 PERFIL	Resumo:	Score mínimo definido por subsistema.
	Conteúdo:	Seus valores reais. ✓ atingiu / X abaixo. Status de missão.
	Como usar:	Comparação real vs esperado.
 HISTÓRICO	Resumo:	Evolução ao longo do tempo.
	Conteúdo:	V1 = dados atuais. V2-V5 editáveis. Tendência automática.
	Como usar:	Registre novas avaliações nas colunas V2+.
 PDI	Resumo:	Plano de Desenvolvimento Individual.
	Conteúdo:	Cruza gap real com interesse (#). Prioridade máxima/alta/média.
	Como usar:	Planejamento de capacitações.
 COMPARAÇÃO	Resumo:	Comparar dois membros lado a lado.
	Conteúdo:	Dropdowns E5 e H5. 7 domínios comparados com diferença.
	Como usar:	Altere os dropdowns para comparar qualquer par.
 MISSÃO	Resumo:	Cobertura de missão por subsistema.
	Conteúdo:	Líder, backup, % operacional, risco SPF.
	Como usar:	Decisão: onde há risco de ponto único de falha.
 INTERESTS	Resumo:	Áreas de interesse detalhadas (#).
	Conteúdo:	Grupos específicos com # por membro. Ranking de demanda.
	Como usar:	Planejamento de carreira baseado em interesse declarado.