

Modelagem de um Sistema de Evacuação Aeromédica para uma aeronave via ARCADIA/Capella

Filipe de Paulo Oliveira¹, Arthur Petrocchi G. Reis¹, James Bruce Lyncoln Belmonte Soares¹ e Christopher Shneider Cerqueira¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP - Brasil

Resumo—A eficácia da resposta médica em cenários de combate, tradicionalmente guiada pelo conceito da “hora de ouro”, enfrenta novos desafios em conflitos modernos, que transformaram a evacuação aeromédica (MEDEVAC) em uma complexa operação de sistema-de-sistemas. Este cenário expõe a necessidade de uma metodologia de engenharia robusta para projetar e validar sistemas MEDEVAC antes de seu emprego. Diante disso, o presente artigo analisa a arquitetura e os requisitos de um sistema MEDEVAC para uma aeronave em ambientes hostis, utilizando a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos com o método ARCADIA e a ferramenta Capella. A pesquisa demonstra a aplicação da metodologia desde a análise operacional até a arquitetura física, resultando em um modelo formal que aumenta a robustez, a resiliência e a visão holística do sistema.

Palavras-Chave—Engenharia de Sistemas, Evacuação Aeromédica, ARCADIA.

I. INTRODUÇÃO

A natureza dos conflitos modernos, caracterizados por operações em larga escala e cada vez mais assimétricos e tecnologicamente densos, impõe desafios que transcendem a logística [1], [2]. Neste contexto, evacuação aeromédica (MEDEVAC) evoluiu para uma complexa operação de sistema-de-sistemas, onde múltiplos agentes, plataformas e redes de comunicação devem operar em perfeita harmonia sob condições adversas e hostis [3]. Assim sendo, a necessidade de abordagens robustas para projetar e validar sistemas em domínios de alta criticidade, como o da saúde e o militar, é uma demanda crescente [4], [5]. A ausência de uma abordagem sistêmica expõe uma lacuna fundamental: a necessidade de uma metodologia de engenharia robusta e holística, capaz de modelar, analisar e validar sistemas MEDEVAC desde o início da sua concepção. Este sistema engloba não apenas os subsistemas da aeronave, como o do *Directed Infrared Countermeasures* (DIRCM) na aeronave KC-390 [6], mas também os módulos médicos, os protocolos de comunicação, as equipes de saúde, a inteligência sobre ameaças e a rede de comando e controle. A otimização da logística humanitária em cenários de desastre, por exemplo, já demonstrou que a eficiência depende de uma visão holística do sistema, desde o armazenamento até a entrega final, algo análogo aos desafios do MEDEVAC militar [7].

É neste ponto que a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) se apresenta como uma abordagem adequada, pois propõe uma mudança de paradigma, substituindo abordagem centrada em documentos textuais ambíguos e desconectados, por uma abordagem integrada, centrada em um modelo de sistema formal, coeso e rastreável [8]. Este modelo digital serve como uma fonte única de verdade, permitindo que engenheiros, operadores e decisores analisem o sistema como um todo, simulem cenários e verifiquem o cumprimento de requisitos de forma contínua [9]. A MBSE para projetar sistemas complexos para o serviço de emergência médica aérea tem sido empregada com sucesso em domínios igualmente desafiadores, como o desenvolvimento de Serviço de Ambulância Aérea com eVTOL [10].

Porém, no Brasil, há poucos estudos que abordem a utilização de métodos formais como o ARCADIA (*Architecture Analysis and Design Integrated Approach*) e de ferramentas como o Capella, que o implementa, permitindo estruturar o processo de design arquitetural de sistemas MEDEVAC, e garantindo que as necessidades operacionais sejam rastreáveis até os componentes físicos do sistema [11]. Este pensamento sistêmico é fundamental para mitigar riscos, reduzir custos de retrabalho e, no contexto do MEDEVAC, salvar vidas. A relevância deste tema, portanto, reside em aplicar a metodologia ARCADIA a um problema de defesa e humanitário de extrema importância, respondendo ao seguinte problema de pesquisa: De que maneira a aplicação da Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos, por meio do ARCADIA/Capella, analisa a arquitetura e os requisitos elicítados de um sistema MEDEVAC para uma aeronave em ambientes hostis?

Diante disso, o presente artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 detalha a metodologia de pesquisa, desde a análise operacional até a definição da arquitetura física no software Capella. A Seção 3 apresenta os resultados, exibindo os principais artefatos de modelo gerados. Em seguida, a Seção 4 discute criticamente estes resultados, analisando como eles contribuem para a robustez e resiliência da arquitetura do sistema. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões do estudo, sintetizando os achados, destacando a contribuição do trabalho e sugerindo caminhos para pesquisas futuras na área.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O campo desta pesquisa é o Sistema MEDEVAC para uma aeronave em ambientes hostis. A caracterização leva em conta

a doutrina e a experiência da Força Aérea Brasileira, que enfrentam os desafios de um território de vastas dimensões e a necessidade de interoperabilidade entre diferentes vetores [12], [13].

A “coleta de dados” se deu pela geração sistemática de artefatos de modelo dentro da ferramenta Capella, conforme prescrito pelo método ARCADIA. Os dados primários são os próprios elementos do modelo, gerados em cada uma das quatro camadas de análise: (1) os atores e capacidades operacionais da Análise Operacional; (2) as funções e requisitos sistêmicos da Análise de Sistema; (3) os componentes lógicos e suas interfaces da Arquitetura Lógica; e (4) os componentes de hardware/software da Arquitetura Física [14], [9], [5], [11]. Tais dados serão apresentados na seção de Resultados.

A análise dos dados (os artefatos do modelo) consistiu em uma avaliação qualitativa da arquitetura resultante, focada em dois eixos principais: robustez e rastreabilidade. A análise de rastreabilidade diz respeito à capacidade de navegar bidirecionalmente no modelo, conectando uma camada de alto nível a um ou mais componentes das camadas inferiores que a implementam [14], [10]. A análise de robustez avaliou a capacidade de satisfazer os requisitos de forma consistente e de se adaptar a diferentes cenários (nominais, degradados, de falha) [9] e a futuras evoluções com o mínimo de retrabalho [14]. Este tipo de análise é um dos principais benefícios buscados ao se aplicar a MBSE, pois permite a verificação contínua e a redução de falhas de integração [8].

III. RESULTADOS

A. Análise Operacional

1) *Identificação dos Atores Operacionais e Entidades:* O passo inicial da Análise Operacional é a identificação das entidades e atores que participam da operação.

O Diagrama de Decomposição de Entidades Operacionais atende integralmente aos objetivos da etapa de modelagem, que visava a identificação e delimitação dos principais atores envolvidos no sistema. Para isso, foram detalhados os seguintes elementos-chave:

- **Equipe de Operação da Aeronave:** Este ator abrange todos os profissionais responsáveis pela condução e manutenção da aeronave durante a missão MEDEVAC, incluindo pilotos, copilotos, engenheiros de voo e tripulação de cabine.
- **Paciente:** Representa o indivíduo que necessita de evacuação médica urgente.
- **Forças Adversárias:** Este ator engloba qualquer entidade ou grupo que possa representar uma ameaça à operação de evacuação, como combatentes inimigos, atiradores ou elementos hostis.

A clara definição desses atores é crucial para a compreensão do fluxo de informações, das interações e das potenciais vulnerabilidades dentro do sistema MEDEVAC em zonas de conflito.

2) *Formalização das Capacidades Operacionais:* O passo seguinte da Análise Operacional consiste em capturar suas motivações, objetivos e intenções na forma de Capacidades Operacionais.

A Fig. 1 traduz os objetivos da missão em capacidades de alto nível que os atores devem possuir. Ele formaliza as metas

estratégicas da operação, garantindo que o desenvolvimento do sistema seja orientado por elas. As capacidades-chave identificadas são:

- **Voar:** Capacidade fundamental atribuída à “Equipe de operação da aeronave”, representando a necessidade primária de operar o vetor aéreo para cumprir a missão.
- **Transportar:** Capacidade central da missão MEDEVAC. Ela é decomposta nas sub-capacidades de “Transportar carga” (especificamente “Transportar remédios”) e “Transportar passageiros” (especificamente “Transportar paciente”). Esta capacidade envolve diretamente a “Equipe de operação da aeronave” e o “Paciente”.
- **Gerenciar ataques:** Capacidade crítica que reflete a natureza hostil do cenário. Envolve a interação entre a “Aeronave”, que possui os “Meios de defesa”, e as “Forças adversárias”, que possuem os “Meios de ataque”.

3) *Alocação das Atividades Operacionais aos Atores:* Este passo consiste em identificar e alocar as Atividades Operacionais a cada Ator ou Entidade responsável por executá-las, permitindo detalhar os processos operacionais e identificar as interações que ocorrerem.

A Fig. 2 detalha as responsabilidades funcionais de cada ator na missão para entender o fluxo de trabalho e as interações:

- **Equipe de Operação da Aeronave:** Este ator é responsável por atividades críticas, incluindo “Operar a aeronave”, “Inserir carga e pessoal na aeronave” e “Cuidar do paciente”.
- **Paciente:** Sua principal atividade é “Ser atendido”, que é o objetivo final da interação com a equipe médica durante a evacuação.
- **Forças Adversárias:** Este ator realiza a atividade hostil “Impedir a aeronave”, que desencadeia a necessidade das capacidades de defesa do sistema e define requisitos de segurança.

O diagrama também elucida as interações como o “Cuidado médico” fluindo da equipe para o paciente e a interação de “Ataque” e “Contramedida” entre as forças adversárias e a aeronave.

Assim, a Análise Operacional estabelece o domínio do problema para a missão MEDEVAC. Com a Análise Operacional concluída através da definição de atores, capacidades, atividades e cenários, temos uma compreensão formal do domínio do problema. O próximo passo é traduzir as necessidades operacionais em requisitos e funções que o sistema deverá executar na etapa de Análise de Sistema.

B. Análise de Sistema

1) *Definição do Contexto e dos Atores do Sistema:* O primeiro passo é a definição do contexto do sistema, onde os Atores do Sistema são identificados. Conforme a metodologia, os Atores do Sistema são derivados das Entidades e Atores Operacionais definidos na fase anterior.

Para demonstrar o sincronismo entre as camadas no Capella, o “Paciente”, que era um Ator Operacional, foi removido do modelo neste nível. Além disso, percebemos que ele não era um usuário que interage diretamente com as interfaces do sistema, e sim como o objeto da missão de transporte.

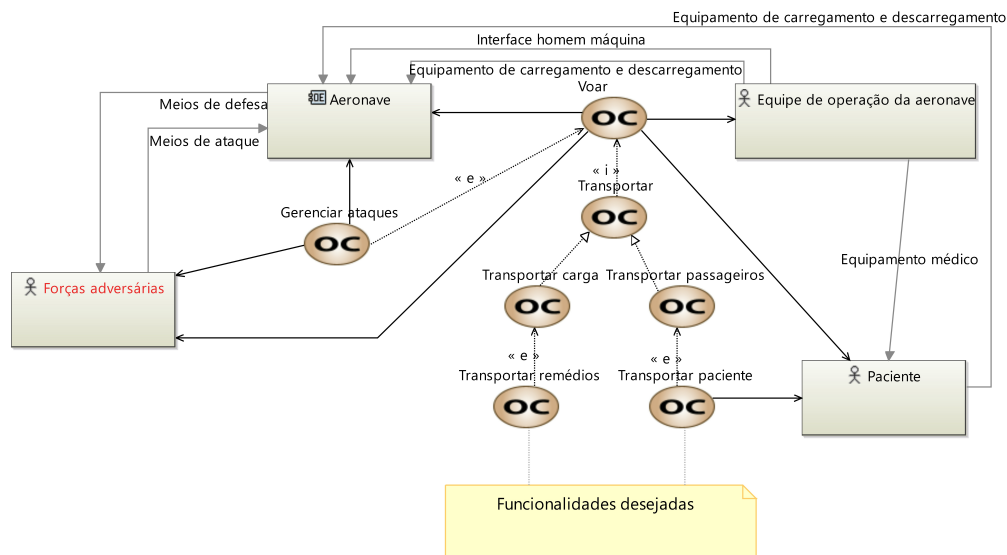


Fig. 1. Diagrama de Capacidades Operacionais.

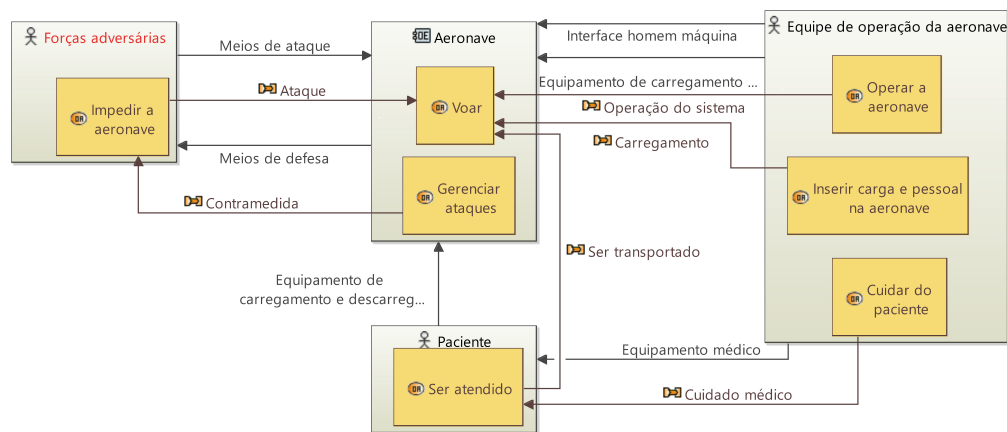


Fig. 2. Diagrama de Entidades Operacionais.

2) *Definição das Missões e Capacidades do Sistema:* O passo seguinte é a produção do diagrama de Missões e Capacidades do Sistema, que visa identificar o propósito do sistema (Missão) e os serviços que ele deve prover (Capacidades). Para isso, as Capacidades Operacionais, definidas na Análise Operacional, são transicionadas e refinadas em Capacidades de Sistema.

A **Missão** é o “**Transporte médico-farmacêutico**”, que é conduzir operações de evacuação aeromédica com sucesso em ambientes hostis. Já as **Capacidades** são habilitadas pela **Missão** e representam os serviços essenciais a serem fornecidos, por exemplo:

- **Transportar paciente:** Esta capacidade, derivada da Análise Operacional, representa o serviço primário do sistema: transportar pacientes de forma segura e eficaz.
- **Gerenciar Ataques:** Esta capacidade crítica, também transicionada da Análise Operacional, confirma que a autoproteção e a sobrevivência em ambiente hostil são um serviço fundamental que o sistema deve prover.

3) *Definição das Funções do Sistema:* As Atividades Operacionais identificadas na Análise Operacional são então transicionadas e refinadas em Funções de Sistema. Este passo

detalha o comportamento esperado, onde várias atividades operacionais podem resultar em uma única função, ou novas funções de sistema podem emergir para atender a necessidades não-funcionais, como autotestes. A análise foca apenas nas necessidades, excluindo escolhas de design.

A Fig. 3 apresenta a decomposição funcional, demonstrando qual é o comportamento esperado do sistema:

- **Função Raiz:** Uma função raiz “Transportar” foi definida para conter todas as outras, garantindo uma estrutura hierárquica organizada.
- **Funções de Missão:** Funções diretamente ligadas à missão, como “Transportar equipe médica” e “Transportar medicamentos”, são detalhadas, mostrando as ações que o sistema deve realizar para cumprir seus objetivos primários.
- **Funções de Suporte e Segurança:** Funções críticas de suporte e segurança também emergem, como “Controlar a temperatura” e “Acomodar o paciente”. Estas funções são essenciais para garantir a sobrevivência e a eficácia da missão.
- **Alocação de Requisitos:** Importante notar que requisitos são alocados diretamente às funções que devem satisfazê-

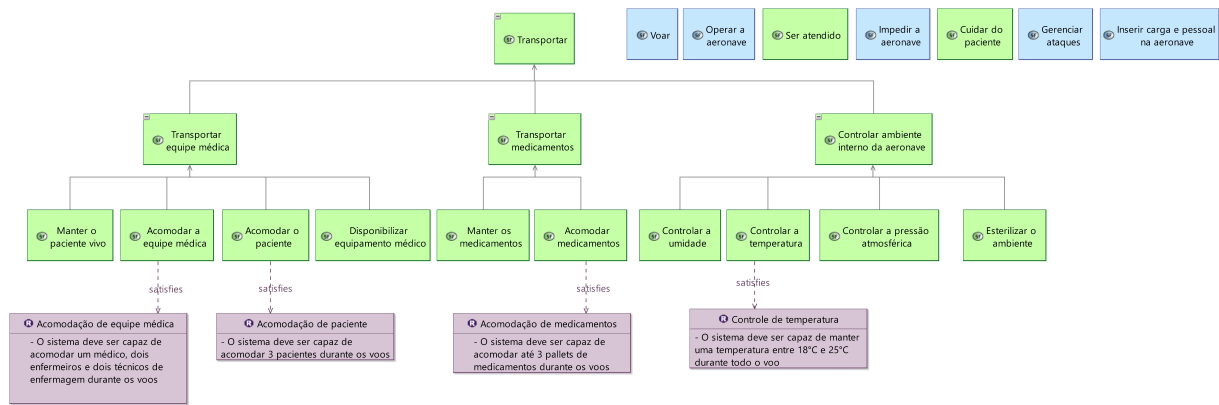


Fig. 3. Diagrama de Decomposição Funcional do Sistema.

los. Por exemplo, o requisito “O sistema deve ser capaz de manter a faixa de temperatura entre 18 °C e 25 °C” está diretamente ligado à função “Controlar a temperatura”, garantindo que esta restrição de desempenho seja considerada no projeto.

Esta decomposição funcional transforma Capacidades em um conjunto de comportamentos específicos e verificáveis

Enquanto a Fig. 4 mostra a Matriz de Rastreabilidade das Atividades Operacionais para as Funções de Sistema, evidenciando a rastreabilidade entre os diferentes níveis do modelo.

4) *Definição das Trocas Funcionais do Sistema:* Uma vez que as funções do sistema são capturadas, suas interações devem ser definidas na forma de Trocas Funcionais. Conforme a metodologia ARCADIA, assim que uma função é decomposta, é necessário atribuir as trocas funcionais às suas sub-funções, detalhando o fluxo de informações dentro do sistema.

A Fig. 5 torna explícitas as dependências e o fluxo de informações entre as sub-funções necessárias para realizar o transporte médico. A função “**Acomodar a equipe médica**” se conecta à função “**Disponibilizar equipamento médico**” através da troca funcional “**Utiliza**”.

Isso significa, por exemplo, que a equipe médica, para executar suas tarefas, precisa acessar os equipamentos que o sistema disponibiliza, formalizando a interface entre o pessoal e os recursos médicos a bordo. Este fluxo de informação, poderia ser “Status e Dados do Equipamento”, o que garante que a equipe médica tenha conhecimento em tempo real sobre a prontidão e os parâmetros operacionais dos dispositivos (e.g., carga da bateria de um desfibrilador, fluxo de oxigênio), sendo um requisito fundamental para a segurança do paciente e a eficácia do atendimento a bordo.

A definição explícita destas trocas funcionais detalha o fluxo de trabalho lógico e as dependências internas do sistema.

5) *Alocação das Funções de Sistema aos Atores e ao Sistema:* Com as funções do sistema identificadas, o passo seguinte é alocá-las, decidindo se cada função será realizada integralmente pelo sistema, parcialmente pelo sistema e atores, ou integralmente por um ator. Este passo define formalmente as responsabilidades funcionais entre o Sistema de Interesse e os Atores do Sistema.

O Diagrama de Arquitetura de Sistema define:

- **Funções Alocadas ao Sistema:** Funções como “Manter os medicamentos” e “Esterilizar o ambiente” são alocadas

das inteiramente ao Sistema de Interesse.

- **Funções Alocadas aos Atores:** Por outro lado, funções como “Operar a aeronave” e “Inserir carga e pessoal” são alocadas ao ator “Equipe de Operação da Aeronave”.

Sendo assim, Análise de Sistema serviu como a ponte fundamental entre o domínio do problema e o domínio da solução, resultando em um conjunto de funções e requisitos sistêmicos rastreáveis. Com o “o quê” funcional claramente especificado, o próximo passo metodológico consiste em projetar o “como”, definindo uma Arquitetura Lógica que organize estas funções de maneira coesa e eficiente.

C. Arquitetura Lógica

1) *Definição das Funções Lógicas:* Iniciando a Arquitetura Lógica, as Funções de Sistema (definidas na Análise de Sistema) são transicionadas e refinadas em Funções Lógicas. Este passo permite detalhar o comportamento da solução de forma abstrata, agrupando funções em hierarquias lógicas e refinando a análise funcional realizada na camada anterior.

Na **Transição de Funções** as Funções de Sistema são diretamente transicionadas para Funções Lógicas, mantendo a mesma nomenclatura e hierarquia. Isso estabelece a base da arquitetura lógica, garantindo que todo o escopo funcional definido na Análise de Sistema seja transportado para a camada de solução. Enquanto o **Enriquecimento com Requisitos** apresenta novos requisitos capturados e alocados às Funções Lógicas. Por exemplo, o requisito “A esterilização do sistema deve demorar no máximo 30 minutos” é alocado à função “Esterilizar o ambiente”, bem como o requisito “O sistema deve ser capaz de acomodar 3 pacientes” é alocado à função “Acomodar o paciente”.

2) *Definição das Trocas Funcionais Lógicas:* Uma vez que as funções são definidas na camada lógica, suas interações são estabelecidas na forma de Trocas Funcionais. Estas trocas são definidas entre as funções “folha” (aquelas no nível mais baixo da hierarquia), detalhando o fluxo de informações necessário para a realização das capacidades do sistema.

A formalização dessas trocas lógicas define as interfaces de dados que precisarão ser implementadas entre os diferentes componentes de software e hardware que realizarão estas funções na Arquitetura Física. Por exemplo, a troca “Controla” implica na necessidade de uma interface (física ou de software) entre o painel de controle da equipe médica e o sistema de climatização.

	Voar	Ser atendido	Impedir a aeronave	Cuidar do paciente	Gerenciar ataques	Operar a aeronave	Inserir carga e pessoa
Operar a aeronave						X	
Voar	X						
Ser atendido		X					
Impedir a aeronave			X				
Cuidar do paciente				X			
Gerenciar ataques					X		
Transportar							X
Controlar ambiente interno da aeronave						X	X
Controlar a umidade							
Controlar a temperatura							
Controlar a pressão atmosférica							
Esterilizar o ambiente							
Transportar equipe médica				X			X
Manter o paciente vivo							
Acomodar a equipe médica							
Acomodar o paciente							
Disponibilizar equipamento médico							
Transportar medicamentos							X

Fig. 4. Matriz de Rastreabilidade.

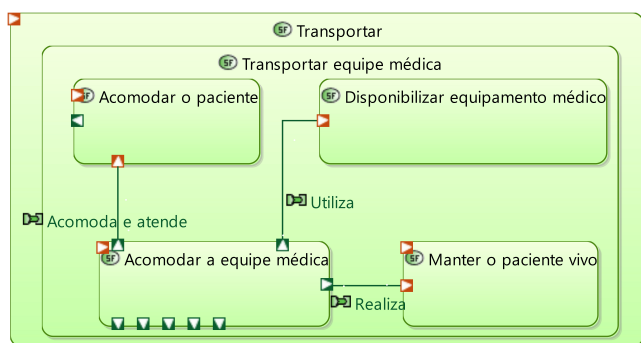


Fig. 5. Diagrama de Fluxo de Dados do Sistema.

3) *Definição das Interfaces e Trocas Funcionais*: Quando as funções e componentes lógicos são identificados, o passo seguinte é alocar as funções aos componentes relevantes. Através de um Diagrama de Arquitetura Lógica, as funções são alocadas e as Trocas de Componentes, que implementam as Trocas Funcionais, são definidas.

A Fig. 6 apresenta a estrutura da solução:

- **Decomposição em Componentes Lógicos**: O “Sistema de transporte médico-farmacêutico” é decomposto em subsistemas lógicos com responsabilidades claras: o “**Módulo de transporte médico**” (encapsulando funções de cuidado ao paciente como “Manter o paciente vivo”), o “**Módulo de transporte farmacêutico**” (para gerenciamento de medicamentos) e o “**Módulo de controle do ambiente**” (agrupando funções como “Controlar a temperatura”).
- **Alocação de Funções**: As funções lógicas definidas anteriormente são formalmente alocadas aos seus respectivos componentes. Por exemplo, a função “Acomodar a equipe médica” é alocada ao “Módulo de transporte médico”, definindo qual parte da arquitetura é responsável por qual comportamento.

Com esta Arquitetura Lógica definida, a solução está completamente especificada de uma forma abstrata e independente de tecnologia, concluindo a fase de Arquitetura Lógica e preparando o caminho para a fase final do projeto: implementação na **Arquitetura Física**, com componentes de hardware e software definidos.

D. Arquitetura Física

1) *Definição dos Componentes e Nós Físicos*: Iniciando a Arquitetura Física, o primeiro passo é a definição dos componentes e nós físicos que irão implementar a solução. A arquitetura é detalhada em seus constituintes concretos, distinguindo entre “Componentes Físicos de Comportamento” (que executam funções) e “Nós Físicos” (o hardware que os hospeda).

A Fig. 7 materializa a solução, mostrando a transição da camada lógica para a física e estabelecendo a estrutura concreta do sistema: Os componentes lógicos definidos anteriormente, como “Módulo de transporte médico” e “Módulo de controle do ambiente”, são transicionados e refinados em **Componentes de Comportamento** e **Nós Físicos**. Estes componentes herdam as responsabilidades funcionais da camada lógica e representam os blocos de comportamento da solução física.

Assim, a Arquitetura Física é a base para o passo final da modelagem: a alocação das Funções Lógicas a estes componentes e a implantação dos componentes comportamentais nos nós físicos. Esta perspectiva detalha não apenas os componentes que constituem o sistema, mas também sua natureza, origem e interconexões físicas, respondendo à questão de como o sistema será construído.

2) *Alocação de Funções e Implantação de Componentes Físicos*: Através de um Diagrama de Arquitetura Física, as funções são alocadas, as trocas entre componentes são definidas, e os componentes de comportamento são implantados nos nós físicos, criando a representação completa e concreta da solução.

Esta camada completa o projeto da solução ao materializar a arquitetura e detalhar como as responsabilidades funcionais são implementadas e interconectadas. Isso é feito através das seguintes atividades de modelagem, visíveis no diagrama:

- **Alocação de Funções Físicas a Componentes**: As Funções Físicas são alocadas aos Componentes Físicos de Comportamento que as executam. Por exemplo, a função “Manter paciente seguro para voo” é alocada ao componente “Maca”, que é um componente primariamente mecânico (Nó Físico do tipo *Hardware Configuration Item* - HWCI), mas fundamental para a segurança, pois deve atender a rigorosos padrões de certificação aeronáutica (e.g., fixação, resistência a G), exigindo um design específico para a aeronave e, portanto, tratado como um nó principal. Já a função “Controlar a tempera-

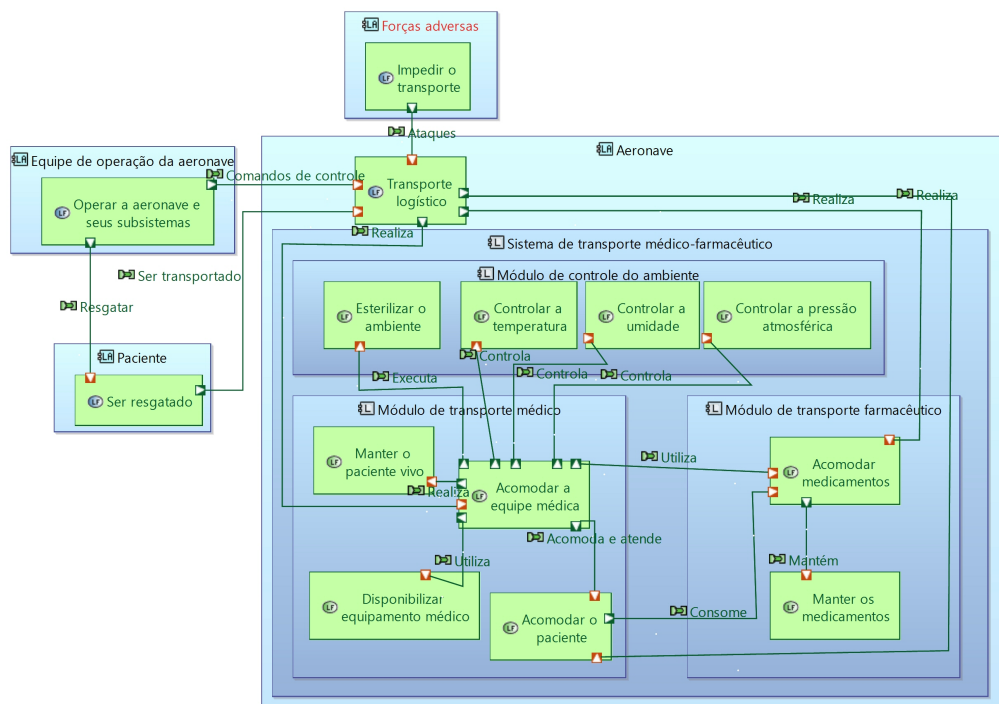


Fig. 6. Diagrama de Arquitetura Lógica.

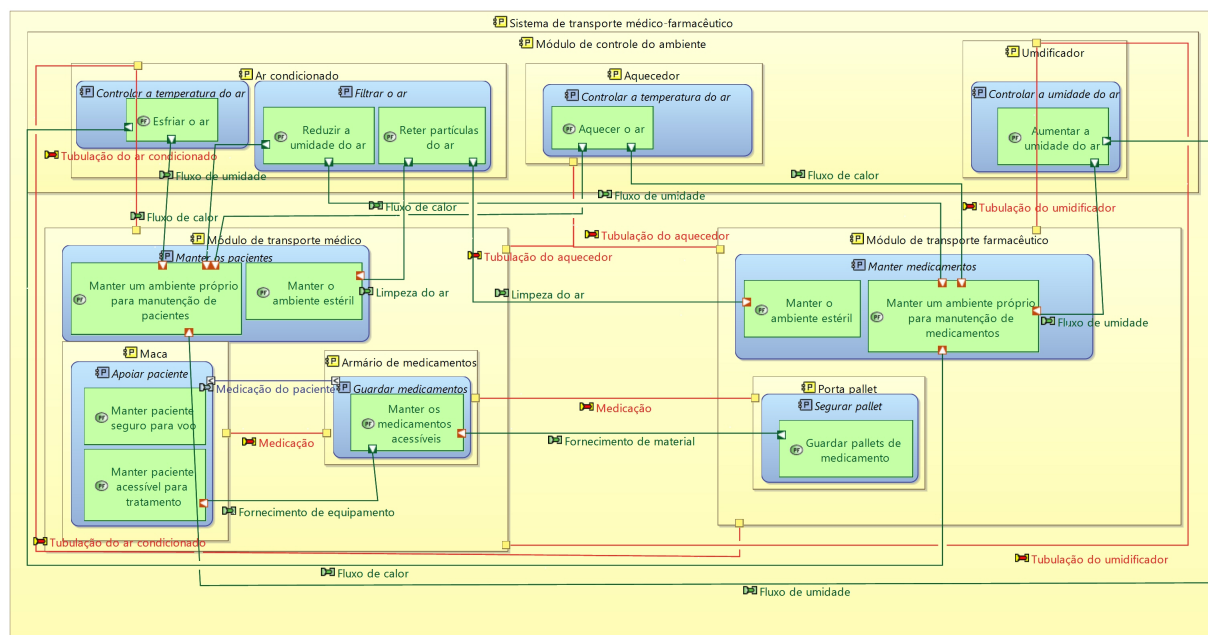


Fig. 7. Diagrama de Arquitetura Física.

tura do ar” é alocada ao componente “Ar condicionado”, que também representa um nó físico do tipo HWCI porém hospeda sua própria lógica de controle, o que implica a existência de um “Controlador de Temperatura” embarcado (Componente comportamental do tipo *Computer Software Configuration Item* - CSCI) que executa essa lógica.

- **Definição das Trocas entre Componentes Físicos:** As interações entre os componentes são definidas como Trocas de Componentes Físicos. Um exemplo claro é a troca “Medicação” que parte do “Armário de medicamentos” para a “Maca”, representando a provisão de

medicamentos ao paciente.

- **Definição dos Caminhos Físicos:** O diagrama também especifica os Caminhos Físicos que transportam essas trocas. Por exemplo, a interação “Fluxo de calor” entre o “Aquecedor” e outros módulos é realizada através de um caminho físico explícito, a “Tubulação do aquecedor”. Isso detalha não apenas “o que” é comunicado, mas “como” a conexão física é estabelecida.

Com a conclusão da Arquitetura Física, o modelo de sistema está completo, com rastreabilidade desde a necessidade operacional até a solução de implementação. Assim, este trabalho avança para a análise crítica e interpretação destes

artefatos na seção de **Discussão**.

IV. DISCUSSÃO

Através do ARCADIA, com suas perspectivas de camadas (Análise Operacional, de Sistema, Arquiteturas Lógica e Física), as visões de cada parte interessada ficaram bem separadas e todas as decisões foram tomadas de acordo com as necessidades que a geraram. Essa abordagem em camadas é essencial para gerenciar a complexidade de sistemas como o transporte médico-farmacêutico em ambientes hostis, pois a transição das camadas garante rastreabilidade para verificação e validação futura, bem como os requisitos estão bem alinhados com as decisões iniciais no ciclo de vida do sistema. A evidência dessa rastreabilidade foi apresentada por meio da uma Matriz de Rastreabilidade (4), em conformidade com [14] e [10], pois essa propriedade é garantida pela transição estruturada entre as camadas de análise (Operacional, Sistêmica, Lógica e Física) e pela capacidade de gerar matrizes de alocação que validam a cobertura das funções pelos componentes.

O modelo de sistema de transporte que compreende situações de evacuação aeromédica, resultado da aplicação do ARCADIA/Capella, funcionou como documentação de projeto e como base para análise formal de especialistas sobre a aderência aos requisitos de forma consistente e a aplicação a diferentes cenários e a futuras evoluções, demonstrando a robustez do método [9]. A ferramenta Capella garantiu que a arquitetura permanecesse consistente, propagando modificações através das camadas e prevenindo inconsistências que poderiam levar a falhas de integração. Isso o alinha tanto com as modernas iniciativas de transformação digital quanto com os padrões da indústria, além de convergir com a literatura científica mais moderna.

V. CONCLUSÃO

O presente artigo demonstrou como a aplicação da Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos, por meio do ARCADIA/Capella, permite uma análise rigorosa da arquitetura e dos requisitos de um sistema MEDEVAC para operações em ambientes hostis.

Para responder a pergunta de pesquisa, partiu-se da Análise Operacional para definir o as suas Capacidades, que levam à missão de "Transporte médico-farmacêutico", e os atores, que são "Equipe de Operação da Aeronave", "Paciente" e "Forças Adversárias". Em seguida, as necessidades operacionais foram traduzidas em funções (representadas por meio da "Matriz de Rastreabilidade") e requisitos formais na Análise de Sistema (por meio do "Diagrama de Decomposição Funcional do Sistema"). A solução foi então projetada nas duas camadas seguintes: primeiro, a Arquitetura Lógica, a qual apresentou a decomposição do sistema em subsistemas (módulos), e depois a Arquitetura Física, que materializou o design em nós físicos (HWCI) e componentes de comportamento (CSCI). Finalmente, a análise deste modelo, apresentada na Discussão, avaliou a robustez do projeto e o valor da abordagem MBSE no que se refere à rastreabilidade da modelagem.

É importante reconhecer as limitações deste estudo. O modelo de sistema desenvolvido possui uma natureza conceitual, e seu principal objetivo foi demonstrar a aplicação

e o valor da metodologia para problemas complexos no domínio de defesa. Desta forma, o trabalho não utilizou dados técnicos detalhados ou de desempenho dos sistemas reais da aeronave, e a arquitetura proposta representa uma solução de referência, não um projeto de engenharia final pronto para implementação.

Um desdobramento natural seria a integração deste modelo arquitetural com ferramentas de simulação para realizar a análise de desempenho quantitativa. Além disso, o modelo serve como uma base sólida para a realização de análises de *trade-off* entre diferentes tecnologias de componentes físicos, permitindo a otimização da solução com base em critérios de custo, peso e confiabilidade.

Em suma, este trabalho demonstrou que a aplicação rigorosa do método ARCADIA/Capella é uma abordagem poderosa e eficaz para projetar e analisar sistemas críticos para o domínio de defesa. O modelo arquitetural resultante não é apenas um artefato de projeto, mas um ativo de engenharia que aumenta a clareza, mitiga riscos e pavimentação o caminho para o desenvolvimento de um sistema mais seguro e resiliente, capaz de operar nos cenários mais desafiadores.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Al-Husseini, K. H. Wray, and M. J. Kochenderfer, "Watercraft as overwater ambulance exchange points to enhance aeromedical evacuation," aug 2024.
- [2] J. J. Hatzfeld *et al.*, "Top 10 research priorities for U.S. military en route combat casualty care," *Military Medicine*, vol. 186, no. 3-4, pp. e359–e365, mar 2021.
- [3] K. Henderson and A. Salado, "Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature," *Systems Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 51–66, jan 2021.
- [4] A. Awadid, B. Robert, and B. Langlois, "MBSE to support engineering of trustworthy AI-Based critical systems," in *Proceedings of the 12th International Conference on Model-Based Software and Systems Engineering*. SciTePress, 2024.
- [5] T. Golgolinia *et al.*, "Implementing the model-based systems engineering (MBSE) approach to develop an assessment framework for healthcare facility design," *Proceedings of the Design Society*, vol. 4, pp. 1577–1586, may 2024.
- [6] B. A. Pereira and C. A. D. M. Silvestre, "Directed infrared countermeasures (DIRCM): Estamos protegidos?" *Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, vol. 21, pp. 04–09, jul 2020.
- [7] K. A. Stanzione, R. Ruff, and D. P. Schrage, "Impact of aeromedical evacuation air mobility operations on autonomous systems," in *AHS International 74th Annual Forum & Technology Display*. Vertical Flight Society, 2018.
- [8] P. Assef and J. Geiger, "Adoption of model-based systems engineering in traditional dod systems," *Defense Acquisition Research Journal*, vol. 30, no. 103, pp. 46–73, apr 2023.
- [9] J. N. Buitrago-Leiva *et al.*, "Preliminary design of satellite systems through the integration of model-based system engineering and agile methodologies: Application to the 3colstar mission," *Aerospace*, vol. 11, no. 9, p. 733, 2024.
- [10] Y. Liu *et al.*, "Application of MBSE approach in eVTOL development for air ambulance service," in *2024 IEEE 5th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCSIT)*. IEEE, 2024, pp. 907–912.
- [11] C. E. d. S. A. Oliveira, "CONCEPTUAL PROJECT OF A SPACE SURVEILLANCE AND TRACKING SYSTEM (SST): A CASE STUDY FOR THE ITA SPACE CENTER," 2022, master's Thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- [12] B. Avelino, M. Caetano, and E. José Da Silva, "Um modelo conceitual para drones e caminhões cooperativos inteligentes em operação logística," *Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, vol. 24, no. 1, pp. 24–28, sep 2023.
- [13] J. P. D. A. Dantas and C. A. D. M. Silvestre, "Modelo de simulação aplicado às missões de transporte na região amazônica," *Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, vol. 21, pp. 10–15, jul 2020.
- [14] C. Baron *et al.*, "Using the ARCADIA/Capella systems engineering method and tool to design manufacturing systems—case study and industrial feedback," *Systems*, vol. 11, no. 8, p. 429, aug 2023.