

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE DEFESA**

**LUCIANA ESCOBAR GONÇALVES VIGNOLI**

**ABORDAGEM PARA A MODELAGEM E CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE  
SISTEMAS: UM ESTUDO DE CASO EM COMANDO E CONTROLE**

**RIO DE JANEIRO  
2025**

LUCIANA ESCOBAR GONÇALVES VIGNOLI

ABORDAGEM PARA A MODELAGEM E CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA  
DE SISTEMAS: UM ESTUDO DE CASO EM COMANDO E CONTROLE

Proposta de Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Defesa.

Orientador(es): Maria Claudia Reis Cavalcanti, D.Sc.  
Ricardo Choren Noya, D.Sc.

Rio de Janeiro  
2025

©2025

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Escobar Gonçalves Vignoli, Luciana.

Abordagem para a modelagem e concepção de um Sistema de Sistemas: Um estudo de caso em Comando e Controle / Luciana Escobar Gonçalves Vignoli.

– Rio de Janeiro, 2025.

99 f.

Orientador(es): Maria Claudia Reis Cavalcanti e Ricardo Choren Noya.

Proposta de Tese (doutorado) – Instituto Militar de Engenharia, Engenharia de Defesa, 2025.

1. Sistema de sistemas. 2. Comando e Controle. 3. Modelagem. i. Cavalcanti, Maria Claudia Reis (orient.) ii. Noya, Ricardo Choren (orient.) iii. Título

**LUCIANA ESCOBAR GONÇALVES VIGNOLI**

**Abordagem para a modelagem e concepção de um  
Sistema de Sistemas: Um estudo de caso em Comando e  
Controle**

Proposta de Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Defesa.

Orientador(es): Maria Claudia Reis Cavalcanti e Ricardo Choren Noya.

Aprovada em 20 de março de 2025, pela seguinte banca examinadora:

---

Prof. **Maria Claudia Reis Cavalcanti** - D.Sc. do IME - Presidente

---

Prof. **Ricardo Choren Noya** - D.Sc. do IME

---

Prof. **David Fernandes Cruz Moura** - D.Sc. do CTEX

---

Prof. **Julio Cesar Duarte** - D.Sc. do IME

---

Prof. **Ronaldo Ribeiro Goldschmidt** - D.Sc. do IME

---

Prof. **Flavia Maria Santoro** - D.Sc. da UERJ.

Rio de Janeiro  
2025

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,  
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

## AGRADECIMENTOS

*“Consagre ao Senhor tudo o que você faz,  
e os seus planos serão bem-sucedidos.  
(Bíblia Sagrada, Provérbios 16, 3)*

*Prefiram a minha instrução à prata,  
e o conhecimento ao ouro puro,  
pois a sabedoria é mais preciosa do que rubis;  
nada do que vocês possam desejar compara-se a ela.  
(Bíblia Sagrada, Provérbios 8:10-11)*

## RESUMO

Os Sistemas de Sistemas (SoS) são formados por combinações de sistemas constituintes que interagem para alcançar objetivos comuns por meio da interoperabilidade, permitindo a troca de informações e a cooperação entre eles. Apesar do avanço das pesquisas na área, a interoperabilidade ainda representa um desafio na integração desses sistemas, sobretudo pela ausência de um método estruturado de modelagem que detalhe os conceitos e elementos que compõem suas interações. Esta pesquisa propõe o desenvolvimento de um método para a modelagem e concepção de SoS, que forneça uma representação visual abrangente dos processos e interações entre os sistemas constituintes. A proposta visa suprir a carência de documentação organizacional e estrutural desses sistemas, facilitando a compreensão do contexto operacional e gerencial. Ao estruturar de forma clara e sistemática os fluxos de informação e as relações entre os sistemas, o método contribuirá para o planejamento, implementação e evolução contínua de SoS, oferecendo uma abordagem mais completa e aprofundada em relação aos estudos existentes.

**Palavras-chave:** Sistema de sistemas. Comando e Controle. Modelagem.



# ABSTRACT

Systems of Systems (SoS) are formed by combinations of constituent systems that interact to achieve common goals through interoperability, enabling the exchange of information and cooperation between them. Despite advances in research in this area, interoperability still represents a challenge in the integration of these systems, especially due to the lack of a structured modeling method that details the concepts and elements that make up their interactions. This research proposes the development of a method for modeling and designing SoS that provides a comprehensive visual representation of the processes and interactions between the constituent systems. The proposal aims to address the lack of organizational and structural documentation of these systems, facilitating the understanding of the operational and managerial context. By clearly and systematically structuring the information flows and relationships between the systems, the method will contribute to the planning, implementation,, and continuous evolution of SoS, offering a more complete and in-depth approach in relation to existing studies.

**Keywords:** system of systems. command and control. modeling.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Escala de características associadas a um SoS. Adaptado de (1) . . . .	23
Figura 2 – Classificação de um SoS (2) . . . . .	27
Figura 3 – Tipos de SoS, adaptado de (3). . . . .	27
Figura 4 – Modelos e Linguagens presentes nos estudos selecionados por (4). . . .	33
Figura 5 – Abordagem de C2 colaborativa (5) . . . . .	38
Figura 6 – Abordagem de C2 periférica (5) . . . . .	39
Figura 7 – Método para identificação de potenciais links de interoperabilidade em SoIS. (6) . . . . .	44
Figura 8 – Modelo Conceitual para SoIS (7) . . . . .	45
Figura 9 – Modelo de processo “Vee” de Engenharia de Sistemas. (8) . . . . .	46
Figura 10 – Processo geral para desenvolver um método de modelagem de propósito geral para engenharia SoS, adaptado de (9) . . . . .	47
Figura 11 – Metamodelo MemSoS. (10) . . . . .	48
Figura 12 – Metamodelo proposto. (11) . . . . .	49
Figura 13 – Interação dos subsistemas para realizar missões específicas. (11) . . . .	50
Figura 14 – Modelo OV-5b DoDAF - Modelo de atividade operacional, adaptado de (12) . . . . .	51
Figura 15 – Metodologia de Pesquisa . . . . .	62
Figura 16 – Método para modelagem e concepção de um SoS . . . . .	63
Figura 17 – Planejamento do Pedido de Tiro no PC da Brigada . . . . .	72
Figura 18 – Composição do PFA . . . . .	72
Figura 19 – Pedido de Tiro . . . . .	74
Figura 20 – Diagrama de sequência do pedido de tiro partindo de um OA . . . . .	75
Figura 21 – Fluxo de interoperabilidade no SoS . . . . .	90



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos Relacionados . . . . .	53
Tabela 2 – Limitações dos Trabalhos Relacionados . . . . .	54
Tabela 3 – Cobertura dos Trabalhos Relacionados . . . . .	58
Tabela 4 – Cronograma Parte I . . . . .	94
Tabela 5 – Cronograma Parte II . . . . .	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C2	Comando e Controle
SoS	Sistema de Sistemas
SoSC2	Sistema de Sistemas de Comando e Controle
EM	Estado-Maior

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	JUSTIFICATIVA	19
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO	20
<b>2</b>	<b>BACKGROUND</b>	<b>22</b>
2.1	SISTEMA DE SISTEMAS (SOS)	22
2.1.1	INTEROPERABILIDADE EM SOS	30
2.1.2	ENGENHARIA DE SOS	31
2.1.2.1	LINGUAGENS DE ESPECIFICAÇÃO	32
2.2	COMANDO E CONTROLE (C2)	34
2.2.1	CLASSIFICAÇÃO DE C2	36
2.2.2	SISTEMAS DE COMANDO E CONTROLE	38
2.2.2.1	FAMÍLIA DE APLICATIVOS DE COMANDO E CONTROLE DA FORÇA TERRESTRE DO EXÉRCITO BRASILEIRO (FAC2FTER)	39
2.2.2.2	SISTEMA DIGITALIZADO DE ARTILHARIA DE CAMPANHA (SISDAC) - GÊNESIS	40
2.2.2.3	INTEGRAÇÃO ENTRE FAC2FTER E GÊNESIS	40
2.2.3	SISTEMA DE SISTEMAS DE COMANDO E CONTROLE (SOSC2)	41
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>42</b>
3.1	MÉTODO PARA MODELAGEM/CONCEPÇÃO DE SOSS	43
3.2	MODELAGEM DE UM SOS ESPECÍFICO	50
3.3	LACUNAS	53
<b>4</b>	<b>PROJETO DE PESQUISA</b>	<b>59</b>
4.1	PROBLEMA DE PESQUISA	60
4.2	OBJETIVOS	61
4.3	METODOLOGIA DE PESQUISA	61
4.4	VISÃO GERAL DA PROPOSTA	63
4.4.1	LEVANTAMENTO DE REQUISITOS DO SOS	64
4.4.2	PROJETO SOS	65
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>70</b>
5.1	ESTUDO DE CASO: PEDIDO DE TIRO	70
5.1.1	PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E O PEDIDO DE TIRO	70
5.1.2	O PEDIDO DE TIRO	73
5.1.3	O PEDIDO DE TIRO PARTINDO DO OBSERVADOR AVANÇADO	74

5.2	RESULTADOS PARCIAIS . . . . .	76
5.3	INSTANCIAÇÃO DO META PROCESSO . . . . .	76
5.3.1	LEVANTAMENTO DE REQUISITOS DO SOS . . . . .	77
5.3.1.1	DEFINIR CENÁRIO ALVO . . . . .	77
5.3.1.2	REALIZAR ENTREVISTAS . . . . .	78
5.3.1.3	DEFINIR PROCESSOS ENVOLVIDOS . . . . .	79
5.3.1.4	DEFINIR PAPÉIS/ATORES/UNIDADES . . . . .	80
5.3.1.5	ESPECIFICAR PROCESSOS . . . . .	80
5.3.1.6	ESPECIFICAR PAPÉIS/ATORES/UNIDADES . . . . .	82
5.3.2	PROJETO SOS . . . . .	85
5.3.2.1	MAPEAR CONSTITUINTES . . . . .	86
5.3.2.2	MAPEAR REQUISITOS . . . . .	89
5.3.2.3	ESPECIFICAR INTERAÇÃO DOS CONSTITUINTES . . . . .	90
5.3.2.4	PROJETAR A ARQUITETURA DO SOS . . . . .	90
5.4	CONSIDERAÇÕES . . . . .	91
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>92</b>
6.1	CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS . . . . .	92
6.2	PLANO DE AÇÃO . . . . .	93
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>95</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Em um mundo cada vez mais conectado, a capacidade de trocar dados e informações entre diferentes sistemas se torna cada vez mais importante. Nesse contexto, os Sistemas de Sistemas (SoS) desempenham um papel fundamental ao possibilitar a coordenação, o planejamento e a execução eficiente de operações em ambientes complexos. Esses sistemas são projetados para integrar e conectar informações de diversas fontes, permitindo uma visão mais abrangente e detalhada do cenário. No entanto, alcançar a interoperabilidade entre os sistemas constituintes de um SoS não é uma tarefa simples, devido às diferenças em arquiteturas, protocolos e formatos de dados.

Pesquisas sobre Sistema de Sistemas (SoS) se intensificaram em diversas áreas de aplicação, sendo as mais comuns relacionadas a temas como defesa (13), militar (14), transportes (15) e robótica (16). Para garantir que a comunicação entre os sistemas que compõem um SoS ocorra de maneira eficiente é importante que o SoS atenda a requisitos como confiabilidade e robustez em seu modo operação (17).

A literatura apresenta inúmeras definições de SoS. Em sua maioria, os autores concordam que o nascimento de um SoS se dá quando um conjunto de necessidades é atendido através de uma combinação de funcionalidades de vários sistemas. Cada sistema pode operar de modo independente, mas cada um deve também interagir com outros sistemas em operação para atender às necessidades especificadas (13). A definição de Krygiel(18) é simples, porém oferece uma visão clara e abrangente sobre o conceito: *“Um SoS é um conjunto de diferentes sistemas conectados ou relacionados de forma a produzir resultados inatingíveis apenas pelos sistemas individuais”*. Essa definição encapsula a essência da colaboração e integração necessárias para que um SoS possa atingir seus objetivos.

Um SoS pode ser definido como um conjunto de sistemas independentes conhecidos como Constituintes, que operam de forma colaborativa para atender a um conjunto de necessidades. Essa definição destaca a importância da cooperação e interação entre os sistemas para alcançar objetivos mais amplos. Em um contexto de comando e controle, o SoS busca atender a demandas específicas de operações complexas, proporcionando acompanhamento em tempo real para as autoridades e gestores em diferentes níveis. Esse acompanhamento possibilita tomar decisões ágeis e fundamentadas em informações atualizadas. Garantir uma comunicação segura e eficiente pode ser desafiador devido à complexidade dos sistemas e das tecnologias envolvidas. Para superar esse obstáculo, é fundamental aprimorar a interoperabilidade, permitindo que os sistemas se conectem, troquem informações e trabalhem juntos.



As características de um SoS são complexas e envolvem a interação dos seus constituintes. Maier(19) identificou características importantes, como o Comportamento Emergente, onde o SoS exibe um comportamento coletivo que supera a simples soma das ações individuais dos seus constituintes, e o Desenvolvimento Evolutivo, que ressalta a capacidade do SoS de se adaptar e evoluir ao longo do tempo. Boardman e Sauser(20), por sua vez, adiciona características como Pertencimento, que abrange a integração e colaboração de novos constituintes. Essas características são amplas e sujeitas a diversas interpretações, refletindo a complexidade de um SoS.

SoSs podem ser classificados em diferentes tipos, de acordo com a forma como seus componentes interagem e são gerenciados. Maier(19) propôs três categorias principais: (i) Direcionado, onde os constituintes operam de forma independente, mas sob um gerenciamento central para atender a objetivos específicos; (ii) Colaborativo, nos quais os constituintes colaboram voluntariamente sem um gerenciamento central; e (iii) Virtuais, que não possuem propósito nem gerenciamento central, e os constituintes podem nem estar cientes de sua participação no SoS. Dahmann e Baldwin(21) expandiu essa taxonomia com o tipo Reconhecido, onde há uma definição clara de objetivos, recursos dedicados e um gerenciamento central responsável por controlar o funcionamento e a colaboração do SoS.

Interoperar não é apenas uma característica desejável, mas um requisito fundamental que permite que o SoS integre seus Constituintes em um único sistema. A interoperabilidade garante que esses Constituintes possam se comunicar e operar de forma integrada, mesmo que tenham sido desenvolvidos de maneira independente e utilizem tecnologias diferentes.

A interoperabilidade em um SoS enfrenta vários desafios. Primeiro, a diversidade tecnológica entre os Constituintes pode criar uma barreira na integração, já que diferentes padrões, protocolos e formatos de dados precisam ser compatíveis. Além disso, a falta de uma abordagem unificada na modelagem e na comunicação entre os sistemas pode dificultar sua coordenação. Questões relacionadas à segurança também são significativas, pois é complexo garantir que diferentes sistemas possam interagir sem comprometer a integridade e a proteção dos dados. A escalabilidade é um outro problema a considerar, pois à medida que mais sistemas são adicionados ao SoS, a dificuldade para alcançar a interoperabilidade aumenta. Por fim, a evolução constante das tecnologias e a necessidade de atualizar ou substituir sistemas antigos sem interromper a operação do SoS adicionam uma camada adicional de complexidade. Superar esses desafios é importante para garantir que a interoperabilidade funcione e que o SoS consiga atingir seus objetivos.

Uma definição clássica de interoperabilidade é encontrada no documento *Standardization and Interoperability of Weapons Systems and Equipment within the North Atlantic Treaty Organization*(DoD, Washington DC, USA, 1980) (22). Segundo essa definição, interoperabilidade é a “*capacidade de sistemas, unidades ou forças de fornecer serviços e aceitar serviços de outros sistemas, unidades ou forças e usar os serviços assim*

*trocados para permitir que eles operem juntos de maneira eficaz*”. A capacidade de operar de maneira coordenada depende diretamente da interoperabilidade alcançada entre os Constituintes do SoS.

Neste contexto, a engenharia de SoS surge para enfrentar desafios de integração que incluem a interoperabilidade. Ela se concentra na modelagem, análise e design de SoS para garantir que sistemas diversos possam se integrar e funcionar de forma harmoniosa. A engenharia de SoS busca criar abordagens estruturadas que assegurem a integração, facilitando a comunicação e colaboração entre os diferentes sistemas e, assim, possibilitando que o SoS alcance seus objetivos.

Essa pesquisa tem como objetivo entregar um método que envolva a modelagem e concepção de um SoS, oferecendo uma abordagem estruturada e fundamentada para aprimorar a comunicação e a cooperação entre os sistemas. Ao superar os desafios relacionados, a pesquisa pode contribuir significativamente para a interoperabilidade em sistemas complexos, buscando melhorar sua capacidade operacional.

## 1.1 Motivação

SoSs representam combinações de sistemas Constituintes que interagem para alcançar objetivos comuns. Os Constituintes são projetados para cumprir missões específicas através da interoperabilidade, permitindo a troca de informações e a cooperação eficaz entre eles (19). A interoperabilidade, apesar de ser um problema bem definido na literatura, continua sendo um desafio no contexto da integração de sistemas em diversas áreas.

Apesar do grande número de trabalhos envolvendo SoS e interoperabilidade (7, 12, 23, 6, 24), falta um amadurecimento sobre o assunto, assim como uma compreensão mais abrangente de todos os aspectos envolvidos. Uma das principais lacunas é a ausência de um método para a modelagem que defina claramente os conceitos e elementos que compõem a cooperação e a troca de informações entre os sistemas. Para mapear esses cenários, é eficiente apresentar uma representação visual da modelagem de todo o processo. Essa carência de documentação organizacional sobre os processos e sistemas do SoS pode dificultar a compreensão do contexto operacional e gerencial.

A pesquisa busca preencher essas lacunas, fornecendo um método que detalhe a modelagem e concepção de um SoS de forma mais completa. Isso contribui significativamente ao oferecer uma estrutura que não apenas documenta, mas também facilita o planejamento, a implementação e a melhoria contínua do SoS. Ao criar uma representação visual que integra tanto os processos quanto as interações entre os sistemas, esta pesquisa busca superar os trabalhos existentes que se mostram superficiais ao abordar a temática do SoS.

Alguns trabalhos (4, 24, 25, 26, 27, 28, 29) utilizam a modelagem de processos de negócio para moldar um SoS, pois esta fornece uma notação gráfica em forma de diagrama de processo que é conhecida por BPMN (*Business Process Model and Notation*). Seu objetivo é oferecer suporte de modo intuitivo, representando a semântica dos processos complexos. Trabalhos como (24, 30, 31) utilizam também o SysML, que além de serem visuais, detalham a troca e cooperação entre os sistemas através de diagramas. No entanto, não há trabalhos que combinem as linguagens para suprir a carência da documentação organizacional sobre seus processos e sistemas. Paes et al.(24) utilizam as linguagens descritas, porém não chegam a propôr uma metodologia nem uma descrição formal que envolva não só o processo, como também o detalhamento da interoperabilidade. Teixeira et al.(32) destacam a importância de definir uma linguagem de modelagem específica que suporte todas as particularidades de uma arquitetura SoIS.

As linguagens BPMN e SysML se complementam ao oferecerem perspectivas distintas e integradas para a modelagem de sistemas complexos. Enquanto o BPMN é eficaz para mapear e representar visualmente os fluxos de processos de negócio de forma intuitiva, o SysML expande essa representação, permitindo detalhar a arquitetura e as interações entre os diferentes Constituintes do SoS. A combinação dessas linguagens proporciona uma visão holística que integra a descrição dos processos operacionais com os detalhes técnicos da cooperação e troca de informações entre os sistemas. Essa abordagem integrada é fundamental para documentar de maneira completa a interoperabilidade e a organização dos processos e sistemas em um SoS.

A motivação para esta pesquisa está na necessidade de preencher essa lacuna na literatura, fornecendo uma abordagem integrada para a modelagem e concepção de um SoS. No desenvolvimento de um SoS, é importante considerar sua capacidade de criação, adaptação e evolução contínua. Uma modelagem detalhada dos sistemas e seus processos facilita a identificação de pontos críticos e oportunidades para melhorias, tornando possível ao SoS responder às demandas específicas como tomada de decisão em tempo real, segurança, confiabilidade e integração. A pesquisa busca responder a seguinte questão: Como desenvolver um método que permita a modelagem e concepção de um SoS através da combinação de linguagens de modelagem para descrever a interação e cooperação entre os sistemas Constituintes?

Essa pesquisa tem o potencial de contribuir para o aprimoramento da interoperabilidade em SoS, fornecendo um método abrangente para a modelagem e concepção, avaliação da comunicação e cooperação entre os sistemas Constituintes.

## 1.2 Justificativa

Acerca do conhecimento obtido nas referências bibliográficas sobre o tema em estudo, uma justificativa se faz necessária para enfatizar o quanto a proposta descrita se relaciona com os interesses da Engenharia de Defesa e do Exército Brasileiro. Na Política Nacional de Defesa (PND) são evidenciados os conceitos de Segurança e de Defesa Nacional, e estabelecidos objetivos para que se possa atingir a Segurança Nacional.

Sistemas de computação modernos possuem alta tecnologia agregada, lidam com uma grande variedade de informações, e fornecem recursos computacionais para resolver problemas complexos. Como decorrência, demandas surgem aos softwares de Comando e Controle (C2), tendo como objetivo tornar a comunicação possível entre os sistemas existentes, de maneira eficiente e confiável.

Garantir a interoperabilidade entre os sistemas de C2 visa atender as demandas operacionais dos sistemas modernos e aumentar a capacidade operacional da Força Terrestre do Exército Brasileiro. O avanço tecnológico proporciona a utilização de satélites, sensores, assim como uma diversidade de dispositivos conectados, recebendo e enviando dados a todo instante. Toda essa tecnologia proporcionou uma maior eficiência nos sistemas militares; porém, por outro lado, motivou uma vulnerabilidade que pode ser explorada, inviabilizando o uso de nossos sistemas ao facilitar interferências e obtenção de informações sigilosas.

É desejável que os sistemas de C2 sejam interoperáveis, integrados, seguros e que atuem em rede desde o tempo de paz (33). O Catálogo de Capacidades do Exército, documento elaborado pelo Estado-Maior do Exército, estabelece que o Sistema de Comando e Controle deve ser capaz de *“Proporcionar ao Comandante, em todos os níveis de decisão, o exercício do Comando e Controle por meio da avaliação da situação e da tomada de decisões baseada em um processo eficaz de planejamento, de preparação, de execução e de avaliação das operações. Para isso, são necessários, nos níveis estratégico, operacional e tático, sistemas de informação e comunicações integrados que permitam obter e manter a superioridade de informações com relação a eventuais oponentes”*(33).

Contudo, a própria Política Nacional de Defesa sugere que seja buscado constantemente o aperfeiçoamento da capacidade de Comando e Controle, além do monitoramento e do sistema de inteligência dos órgãos envolvidos na Defesa Nacional. No âmbito da Estratégia Nacional de Defesa (END), pauta-se a diretriz do desenvolvimento da capacidade de responder a qualquer ameaça ou agressão através da mobilidade estratégica, onde o Exército Brasileiro buscará desempenhar suas atribuições nos tempos de paz e nos tempos de guerra. Tudo isso sob conceitos estratégicos de flexibilidade e elasticidade. O END ainda consolida que um sistema integrado de Comando e Controle de Defesa deverá ser capaz de disponibilizar, em função de seus sensores, monitoramento e controle do espaço

terrestre, marítimo e aéreo brasileiro (34).

Atendendo novamente aos pontos existentes nesta proposta, e para que se contemplem os conceitos de flexibilidade, as brigadas do Exército devem conter os elementos referentes a instrumentos de Comando e Controle, de tecnologia da informação, de comunicações e de monitoramento que lhes permitam operar em rede com outras unidades da Marinha, Exército e da Força Aérea. Além disso, devem receber e enviar informações tanto da terra quanto do ar e água. Módulos de brigada necessitam de equipamentos que operem por tecnologias desde simples às mais avançadas. Por exemplo, operar um radar portátil e se comunicar eficientemente em operações terrestres e também monitoramento espacial. A nível desta proposta, é necessário modelar um SoS de modo que seja alcançada a comunicação entre os sistemas.

Também é importante ressaltar que o Plano Estratégico de Ciência, Tecnologia e Inovação (PECTI) 2020-2023 é um instrumento que faz conexão entre um determinado objetivo estratégico e os caminhos para sua operacionalização. Sua missão é gerenciar o Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação do Exército para entregar soluções científico-tecnológicas necessárias à implementação das capacidades operacionais da Força Terrestre.

A Portaria No 1.122, de 19 de Março de 2020 define as prioridades (no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC) no que se refere a projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação. Em seu Art. 2º estabelece como prioritários os projetos de pesquisa voltados para a área de tecnologia estratégica, que engloba os setores nuclear, espacial, cibernético e de segurança pública, envolvendo aspectos da ampliação crescente e contínua da capacidade de defesa do território nacional, onde se enquadra o programa de Engenharia de Defesa e todo o escopo da proposta descrita.

Um desses projetos, já em andamento, é o projeto “Sistema de Sistemas de Comando e Controle” - S2C2), publicado no DOU nº 16 de 25 de janeiro de 2021, Seção 3, página 7, e cuja finalidade é o aprimoramento da interoperabilidade semântica de Comando e Controle das Forças Armadas Brasileiras, e conta com o financiamento da FINEP/DCT/FAPEB, referência número 2904/20 sobre o contrato de número 01.20.0272.00.

## 1.3 Estrutura do Texto

Além da introdução, o texto desta proposta de tese é composto de mais quatro capítulos que cobrem conceitos importantes relacionados a SoS e suas aplicações na literatura. O Capítulo 2 abrange os conceitos de SoS, sendo fundamental para a compreensão do tema da tese. Este capítulo explora conceitos e definições de SoS, sua classificação, características e tipos encontrados na literatura, buscando fornecer uma base sólida para a continuidade da pesquisa. Além disso, ao incluir uma subseção específica sobre Comando

e Controle e suas definições e classificações, o capítulo demonstra a conexão entre os conceitos de SoS e suas aplicações.

A discussão sobre interoperabilidade, com suas definições e tipos, também é relevante para entender o desafio de garantir a cooperação e troca de informações entre os sistemas constituintes em um SoS. A análise das linguagens de especificação, como o BPMN e o SysML, para a modelagem do SoS com suas propriedades pode enriquecer a pesquisa ao fornecer uma visão prática de como os conceitos podem ser aplicados na prática.

O Capítulo 3 discorre sobre os trabalhos relacionados, para posicionar a pesquisa dentro do contexto acadêmico e científico existente. A apresentação de taxonomias de SoS, abordagens de interoperabilidade e modelagens presentes na literatura permite a identificação de lacunas e oportunidades de pesquisa, possibilitando a definição de um arcabouço teórico sólido. A inclusão da tabela que consolida os trabalhos relacionados e os separa nas temáticas de SoS, como concepção, modelagem, mapear E/S, interoperabilidade e metodologia, demonstra uma abordagem sistemática na revisão da literatura e na organização das referências.

A apresentação do projeto de pesquisa no Capítulo 4 traz uma delineação da metodologia de pesquisa, do método e de seus objetivos. Essa estrutura da pesquisa é importante para garantir a clareza dos passos a serem seguidos no decorrer do trabalho. Na sequência, o Capítulo 5 traz os resultados parciais obtidos com o estudo de caso e a instanciamento do método. Já as considerações finais no Capítulo 6 permitem uma visão resumida dos principais pontos discutidos ao longo desta proposta e o entendimento das direções futuras da pesquisa.

## 2 BACKGROUND

Nesse capítulo são apresentados conceitos existentes sobre SoS, detalhando sua interoperabilidade, engenharia, assim como as linguagens de especificação existentes que foram encontradas na literatura como formas de modelar um SoS.

### 2.1 Sistema de Sistemas (SoS)

Pesquisas na área de Sistemas de Sistemas (SoS) têm crescido rapidamente na última década. Axelsson(35) realizou um mapeamento sistemático da Engenharia de Sistema-de-Sistemas (SoSE, do inglês *System-of-System Engineering*) em 2015 que revelou esse aumento significativo. A pesquisa revelou que até 2003 haviam menos de 50 publicações anuais na área. No entanto, entre 2006 e 2012 ultrapassou 350 por ano. Uma das principais contribuições desse mapeamento é esclarecer a necessidade de melhorar o entendimento dos pesquisadores sobre os princípios fundamentais dos SoS, evidenciando uma falta de clareza entre eles sobre o que realmente constitui um SoS.

Algumas definições de SoS foram encontradas na literatura:

- “*Um SoS é um conjunto de sistemas integrados de forma colaborativa que possuem duas propriedades adicionais: independência operacional dos componentes e independência gerencial dos componentes*” (19).
- “*Um SoS é um conjunto de diferentes sistemas conectados ou relacionados de forma a produzir resultados inatingíveis apenas pelos sistemas individuais*” (18).
- “*Integração de Sistema de Sistemas é um método para buscar o desenvolvimento, integração, interoperabilidade e otimização de sistemas para melhorar o desempenho em futuros cenários de campo de batalha*” (36).
- “*SoS existe quando há a presença da maioria das seguintes cinco características: independência operacional e gerencial, distribuição geográfica, comportamento emergente e desenvolvimento evolutivo*” (37).
- “*Um SoS é qualquer sistema relativamente grande e complexo, em evolução dinâmica e sistema fisicamente distribuído de sistemas pré-existentes, heterogêneos, autônomos e governados de forma independente, em que o sistema de sistemas exibe quantidades significativas de comportamento e características emergentes inesperadas*” (1).

As definições acerca de um SoS foram evoluindo com o avanço das pesquisas sobre o tema. Em 1998, Maier(19) destacou que um SoS trabalha em colaboração com

outros Constituintes, sendo necessário suas propriedades de independência atingir os níveis operacional e gerencial. Os constituintes tem a missão de abranger propósitos bem fundamentados, continuando a operar e cumprir seus objetivos mesmo quando estão fora do SoS. Indo além, incorporam propósitos do SoS que geralmente não são cobertos pelos constituintes quando estes estão agindo de modo independente, como complementam Krygiel(18) no ano seguinte. Na sequência, Sage e Cuppan(37) destacam que um SoS existe quando torna-se evidente a presença da maioria das cinco características de *Maier*.

Pei(36) destaca o desenvolvimento, a integração, a interoperabilidade e a otimização como pontos de conectividade entre um SoS e seus constituintes, acompanhando a dinâmica das inúmeras conexões que possam acontecer em um campo de batalha. Aproximadamente 10 anos depois, as definições evoluíram, mas não perderam sua essência original. Firesmith(1) admite um SoS como um sistema grande e complexo com evolução dinâmica, que possui características e atributos de qualidade, como interoperabilidade, robustez, segurança e usabilidade. Além disso, está alinhado a características programáticas, como as organizações envolvidas com sua aquisição, desenvolvimento e operações.

As características de um SoS são comumente encontradas na literatura, e cada característica pode ser associada a uma escala, na qual sistemas comuns (“trivial”) possuem graus menores, e SoS (“sistemas de escala ultra grande”) possuem graus maiores (1). A Figura 1 apresenta essa escala trazendo as principais características presentes em trabalhos acadêmicos. As marcações mais próximas de “sistemas de escala ultra grande” apontam para características mais aderentes a um SoS.

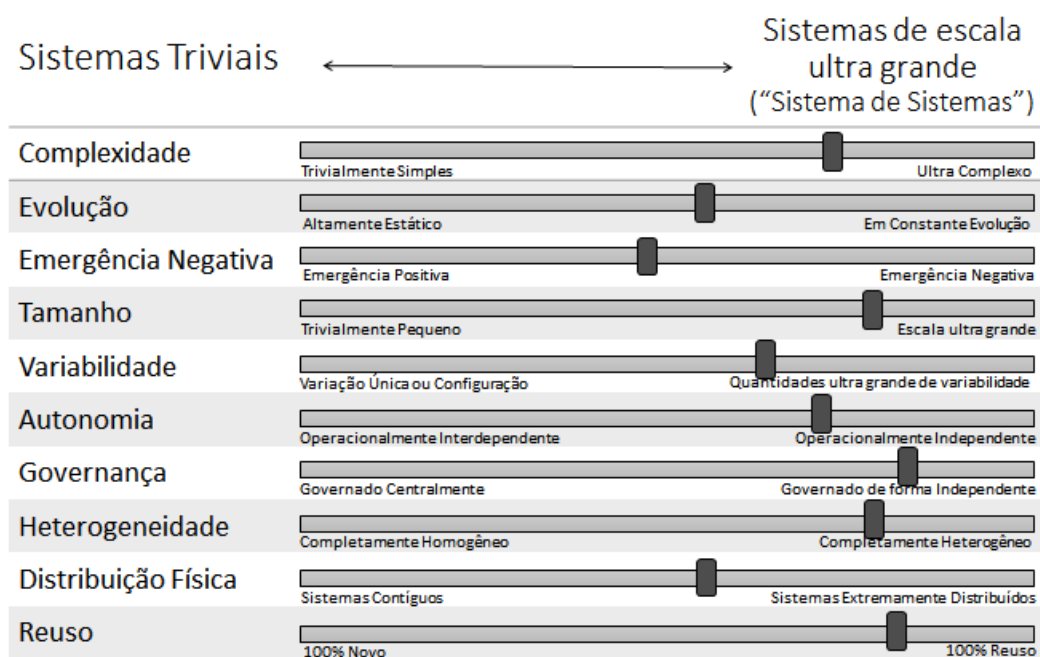


Figura 1 – Escala de características associadas a um SoS. Adaptado de (1)

Firesmith(1) ainda aborda alguns pontos importantes a serem considerados sobre



um SoS, partindo de caracterizações que serão abordadas nesta seção:

- exibir comportamento emergente
- são muito grandes e complexos
- são (ou precisam ser) altamente flexíveis
- estão evoluindo dinamicamente
- são distribuídos geograficamente

Definir características de um SoS vai muito além da definição, pois envolvem diversos constituintes que tentam operar em prol de um objetivo comum, tendo cada um deles seus objetivos específicos. Devem ser estabelecidos mecanismos que permitam que os constituintes interajam entre si, onde devem aprender a colaborar uns com os outros. As definições existentes em pesquisas encontradas especificam um subconjunto das características “obrigatórias” de SoS. *Maier* (19) apresentou cinco características fundamentais que descrevem um SoS:

- Independência Operacional
- Independência Gerencial
- Distribuição Geográfica
- Comportamento Emergente
- Desenvolvimento Evolutivo

Para entender o conceito de Independência Operacional, primeiro é necessário entender que um SoS consiste em um conjunto de Constituintes que são independentes. O fato de um sistema ser independente significa que ele é capaz de agir por conta própria, cumprindo seus objetivos. Por não dependerem uns dos outros, podem operar de modo independente. Se um SoS for decomposto, cada Constituinte ainda deve manter seu próprio desempenho. No entanto, quando esses Constituintes são integrados e mantidos de forma independente, temos que a existência do SoS não é necessária para seus constituintes, pois estes conseguem operar de modo independente. Isso caracteriza de Independência Gerencial.

A característica que descreve a Distribuição Geográfica está relacionada ao conceito de que os constituintes do SoS podem ser distribuídos geograficamente. Ou seja, podem estar instalados em diferentes lugares físicos, sendo o SoS uma construção desses constituintes que se comunicam entre si através de diversos métodos. Quando cada constituinte

opera de forma independente dentro do SoS, tendo seu próprio comportamento, surge o Comportamento Emergente. O comportamento do SoS resultante é mais do que uma agregação dos comportamentos individuais dos constituintes mesclados. Ele passa a ter uma nova funcionalidade que não pode ser obtida através dos constituintes isoladamente.

Por fim, o Desenvolvimento Evolutivo caracteriza que os SoS são dinâmicos, alterando sempre sua estrutura, organização e funcionalidade ao longo do tempo. Cada constituinte pode ser substituído por um outro constituinte, ou deixar de fazer parte de um SoS.

Além destas, diversas outras caracterizações aparecem na literatura, estando longe de se obter um consenso sobre um padrão de características de um SoS. No entanto, as caracterizações existentes são amplas, deixando espaço para diversas interpretações. Boardman e Sauser(20) discorrem sobre outras características de um SoS, tais como:

- Autonomia
- Pertencimento
- Conectividade
- Diversidade
- Emergência

As características presentes em (20) são as mais adequadas ao contexto desta pesquisa. Uma definição de Autonomia concentra-se na razão pela qual um sistema existe e é livre para perseguir seu propósito. Podem haver restrições, mas elas não podem sobrecarregar ou violar o desempenho desse sistema. Já o Pertencimento concentra a ideia de que um novo Constituinte precisará fazer parte do SoS, podendo ser necessário mudar, prestar serviço e colaborar com outros Constituintes. Em resumo, significa uma parceria com o SoS, paralelo ao seu propósito original.

Boardman e Sauser(20) ainda explicam que a Conectividade é uma necessidade para o alcance da interoperabilidade tanto entre seus constituintes quanto diante da possibilidade de inclusão de um novo constituinte no SoS. Isso exige uma dinâmica de conectividade, com interfaces e links surgindo e desaparecendo conforme a necessidade. A Diversidade implica que Constituintes são diferentes entre e si. E Emergência, conforme Johnson(38) relata, é “o movimento das regras de baixo nível para a sofisticação de alto nível”. Um exemplo simples mostra que a soma das partes é igual a soma do todo; porém, dependendo da situação, não podemos apenas somar as partes e deduzir o todo. É preciso o entendimento do conjunto. O conceito de emergência torna o todo maior que a soma das partes. Um SoS tem capacidade emergente projetada em virtude de outros fatores:

preservação da autonomia dos constituintes, escolha de pertencimento, conectividade enriquecida e compromisso com a diversidade de manifestações e comportamento do SoS. O desafio para o projetista de SoS é saber, ou aprender como, à medida que o SoS progride por sua série de estados estáveis, criar um clima no qual a emergência possa florescer e uma agilidade para detectar e destruir rapidamente comportamentos não intencionais, muito parecido com o que o corpo humano lida com invasões indesejadas.

Um SoS é composto por um conjunto de constituintes que são sistemas independentes. No entanto, para o sistema independente chegar ao nível de constituinte é necessário percorrer alguns outros níveis. Esses níveis iniciam com um conjunto abrangendo todos os sistemas que de alguma forma são relevantes para o SoS, e posteriormente, um refinamento seleciona uma sequência de subconjuntos mais úteis. Abaixo estão listadas as classificações para os sistemas (2).

- **Sistema Relevante:** é o conjunto de sistemas que possuem recursos que podem ser úteis no SoS.
- **Sistema Preparado:** é um sistema Relevante que atende a todos os requisitos impostos pelo SoS aos seus constituintes. Por exemplo, um sistema foi modificado para incorporar um software necessário para se comunicar com outros componentes.
- **Sistema Constituinte:** é um sistema Preparado que, de fato, se juntou ao SoS. Significa que a partir desse momento é possível haver troca de informações entre os constituintes, permitindo que uns tenham conhecimento sobre a existência dos outros constituintes no SoS.
- **Constelação:** O fato de um sistema se tornar um constituinte significa apenas que ele agora faz parte de um SoS, mas não necessariamente troca informações com outros constituintes. Para que uma Constelação exista, é preciso que existam links entre um constituinte para outros constituintes, permitindo a troca de informações entre eles e formando um subconjunto de constituintes.

Ainda de acordo com *Axelsson*, uma vez que o sistema foi classificado como Constituinte, ele pode fazer parte de uma Constelação, ou ser Ativo (ou Passivo) dentro do SoS. Um constituinte Ativo trabalha em direção aos objetivos do SoS e precisa encontrar compensações adequadas em relação aos seus próprios objetivos. Um constituinte Passivo faz parte do SoS, mas não está atualmente envolvido com os demais constituintes. Ele pode priorizar apenas seus próprios objetivos, não tendo um papel específico no cumprimento dos objetivos de SoS. A Figura 2 ilustra essas classificações.

Baseado na forma como os sistemas se relacionam em um SoS, são identificados alguns tipos que sugerem uma taxonomia de tais sistemas. Maier(19) elencou três diferentes

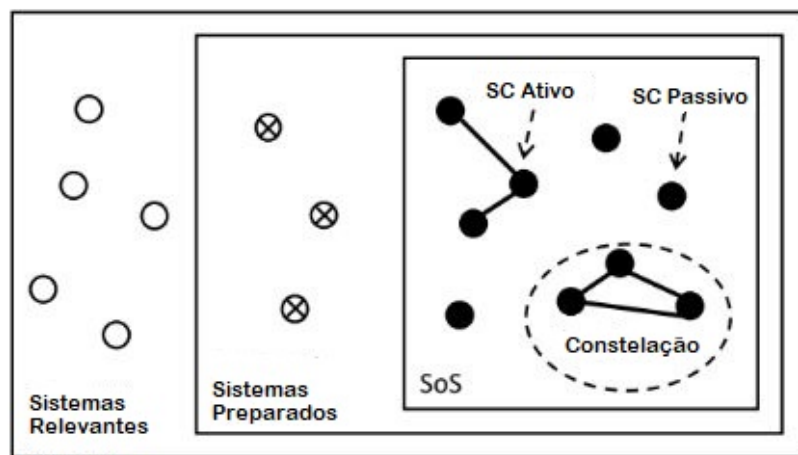


Figura 2 – Classificação de um SoS (2)

tipos: *Directed* (ou Direcionados), *Collaborative* (ou Colaborativos) e *Virtual* (Virtuais); enquanto Dahmann e Baldwin(21) complementaram a classificação com um novo tipo de SoS denominado *Acknowledged* (ou Reconhecidos). A Figura 3 consolida os tipos de SoS encontrados nos trabalhos acadêmicos existentes.

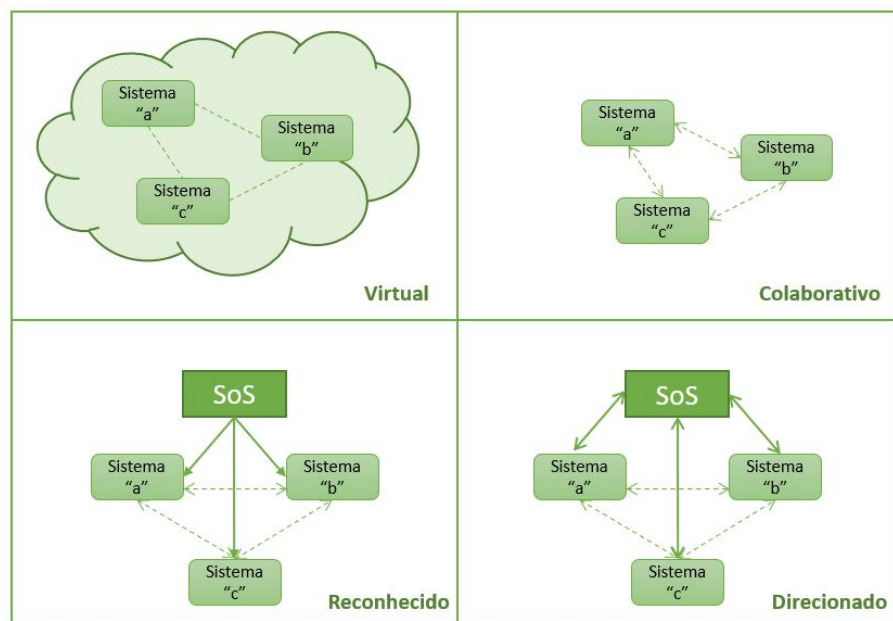


Figura 3 – Tipos de SoS, adaptado de (3).

Em um SoS Direcionado, seus Constituintes operam de modo independente, mas estão coordenados por um gerenciamento central. O gerenciamento central define os objetivos específicos que os sistemas devem atingir e assegura que cada Constituinte contribua para esses objetivos de forma coordenada. Embora os Constituintes mantenham autonomia em suas operações, a coordenação centralizada é essencial para alcançar os resultados desejados. Esse modelo é útil quando é necessário garantir que sistemas diversos

trabalhem em conjunto para cumprir metas específicas, como em operações militares ou projetos de engenharia complexos.

No SoS Colaborativo, os Constituintes trabalham juntos de maneira voluntária para alcançar um objetivo comum, mas não há um gerenciamento central que coordene as atividades. A colaboração é baseada na disposição dos Constituintes em cooperar e compartilhar informações, sem a imposição de uma estrutura centralizada. Esse tipo de SoS é caracterizado por uma rede de colaboração descentralizada, onde cada sistema contribui com seus recursos e capacidades para o sucesso do objetivo global. Exemplos podem incluir consórcios de pesquisa ou iniciativas de inovação aberta onde os participantes se unem espontaneamente para resolver problemas comuns.

O SoS Virtual é aquele em que não há um propósito explícito ou gerenciamento central. Os Constituintes podem não estar cientes de que estão participando de um SoS ou podem operar de forma completamente independente. A interação entre os sistemas ocorre de maneira *ad hoc*, e a colaboração é frequentemente não intencional. Esse tipo de SoS pode surgir naturalmente a partir da conectividade de sistemas e redes, onde a integração e a colaboração são consequências emergentes da comunicação entre os sistemas, sem um planejamento ou coordenação formal. Um exemplo seria um sistema de sensores distribuídos na internet das coisas (IoT), onde diferentes dispositivos colaboram para coletar dados sem uma gestão central.

Em um SoS Reconhecido, existe uma definição clara de objetivos e um gerenciamento central que controla tanto o funcionamento quanto a colaboração entre os Constituintes. Recursos dedicados são alocados para garantir que todos os sistemas trabalhem em harmonia para alcançar os objetivos estabelecidos. O gerenciamento centralizado coordena a interação entre os Constituintes, assegurando que cada parte contribua de acordo com os objetivos do SoS. Esse modelo é típico em sistemas onde a integração e a colaboração são essenciais, como em grandes sistemas de defesa.

A categorização dos SoS segundo suas características e formas de relacionamento fornece uma importante base para compreender como esses sistemas interagem e se organizam. No entanto, além da classificação por tipos, é fundamental considerar as abordagens arquitetônicas utilizadas para estruturar um SoS. Nesse contexto, a norma ISO/IEC/IEEE 42020:2011 estabelece diretrizes para a concepção arquitetural desses sistemas, destacando diferentes formas de organização, como as abordagens federada, unificada e integrada. Essas abordagens influenciam diretamente a interoperabilidade, autonomia e governança dos constituintes, refletindo diferentes estratégias para garantir o funcionamento eficiente de um SoS.

Na abordagem Federada, os sistemas de sistemas são compostos por constituintes autônomos e independentes, cada um com sua própria arquitetura e funcionalidade. Eles colaboram entre si por meio de interfaces bem definidas e padrões de comunicação,

permitindo uma certa autonomia e flexibilidade. Aqui a interoperabilidade permite a comunicação entre os constituintes, para que sejam capazes de trocar informações e serviços. Isso requer a adoção de padrões e protocolos que permitam a interoperabilidade sem comprometer a autonomia de cada sistema. Essa arquitetura é adequada quando os constituintes precisam ser desenvolvidos e mantidos por diferentes organizações ou equipes de desenvolvimento.

Na abordagem unificada, os SoS os constituintes compartilham uma arquitetura e infraestrutura em comum. Esta abordagem promove a consistência, interoperabilidade e reutilização de componentes em todo o SoS, facilitando a coordenação e a colaboração entre os constituintes. Nesse caso a interoperabilidade é praticamente adaptada à arquitetura, uma vez que todos os sistemas são projetados para operar dentro de uma estrutura comum, reduzindo a complexidade da integração. Essa abordagem é adequada para ambientes em que a integração e a cooperação entre os constituintes são fundamentais para o sucesso do SoS, como em projetos complexos de defesa.

A abordagem integrada visa combinar o melhor dos dois mundos, incorporando elementos de autonomia e independência dos constituintes da abordagem federada, com a coerência e consistência da abordagem unificada. Nesta abordagem, os constituintes mantêm uma certa autonomia em seus domínios específicos, mas também estão integrados em uma arquitetura comum que promove a interoperabilidade e a colaboração entre eles. Isso oferece o equilíbrio necessário para adaptar o SoS a mudanças, mantendo a capacidade de os sistemas interagirem de forma eficaz. A interoperabilidade aqui não é apenas uma característica desejável, mas uma necessidade operacional, pois permite que sistemas independentes colaborem dentro de um *framework* comum.

Independentemente da arquitetura escolhida, a interoperabilidade sustenta o funcionamento de todo um SoS. Seja qual for a arquitetura, é necessário ter a capacidade de diferentes sistemas trabalharem juntos. A interoperabilidade assegura que os diversos constituintes do SoS possam colaborar, compartilhar dados e serviços, e operar para atingir objetivos comuns, garantindo que o SoS funcione como uma todo, apesar da diversidade de seus constituintes.

Para um SoS de Comando e Controle, a abordagem integrada é a mais adequada. Essa escolha se justifica pela necessidade de equilibrar a autonomia dos constituintes com a necessidade de uma interoperabilidade robusta, capaz de suportar operações coordenadas de diferentes sistemas. Em sistemas de Comando e Controle é necessário que cada parte funcione de forma independente, mas também colabore de maneira eficiente e coordenada. A abordagem integrada reúne a flexibilidade da arquitetura federada, que permite autonomia, com a uniformidade da arquitetura unificada, que facilita a integração. Com isso, os sistemas conseguem manter suas funções próprias enquanto trabalham juntos dentro de uma estrutura comum. Essa flexibilidade ajuda o SoS a se adaptar e responder rapidamente

a mudanças, promovendo a interoperabilidade em ambientes complexos e dinâmicos.

### 2.1.1 Interoperabilidade em SoS

Cada vez mais surge a necessidade de sistemas heterogêneos, que não foram projetados para trabalhar em conjunto, interoperar. Isso é um problema desafiador, dado o complexo ecossistema de padrões, sistemas legados, ambientes de ferramentas e componentes inteligentes – consequências naturais do desenvolvimento rápido e competitivo e dos relativamente longos ciclos de vida dos sistemas. Um ponto importante a ser observado quando se fala em comunicação entre sistemas é a interoperabilidade. Interações complexas entre esses sistemas demandam um maior tempo de implantação assim como elevam os custos, pois necessitam de adaptações manuais. A maneira tradicional de garantir a interoperabilidade é projetar manualmente um “adaptador” que traduz mensagens de um tipo para outro tipo, ou um “integrador” que integra informações de mensagens de vários tipos. Essa abordagem funciona bem quando o SoS contém poucos componentes e é estático ao longo do tempo, mas não é estimado para atender aos requisitos de um SoS grande e dinâmico (39).

Sistemas de grande escala, no contexto dessa pesquisa definidos como SoS, são dinâmicos porque a composição de seus constituintes são alteradas com certa frequência. Essa mudança pode ocorrer devido à reconfiguração, substituição, desgaste, manutenção, atualização, entre outros. Tal dinâmica introduz inconsistências entre as descrições de nível cibernético e o ambiente físico. O trabalho e o número de especialistas necessários para resolver essas inconsistências e, assim, manter a interoperabilidade, devem aumentar com o tamanho do sistema e a probabilidade de inconsistências. Torna-se inviável uma reconfiguração manual, dada a complexidade de tempo e valor (40).

A interoperabilidade é um conceito multidimensional, que compreende várias perspectivas e abordagens diferentes em vários domínios de aplicação. Existem várias terminologias na literatura, e um exemplo disso é o trabalho de *Ford* (41) onde foram citadas 34 definições distintas de interoperabilidade, sendo que a maioria delas apresenta alguma reformulação da definição de (22). A seguir listamos algumas das definições encontradas:

1. “A capacidade de sistemas, unidades ou forças de fornecer serviços e aceitar serviços de outros sistemas, unidades ou forças e usar os serviços assim trocados para permitir que eles operem juntos de maneira eficaz.” (22)
2. “A capacidade de dois ou mais sistemas ou componentes trocarem informações e usarem as informações que foram trocadas.” (42)

3. “A capacidade de dois ou mais sistemas ou componentes de trocar e usar as informações trocadas em uma rede heterogênea.” (43)
4. “A capacidade de uma Empresa interagir com outras Empresas, não só do ponto de vista da Tecnologia da Informação, mas também do ponto de vista organizacional e semântico. Essa interação deve ser flexível e desenvolvida ao menor custo.” (44)

A definição de Directive(22) ainda é muito bem aceita apesar de seus 40 anos. Isso porque ela é flexível o suficiente para abranger muitos tipos diferentes de interoperabilidade, pois além de seu contexto falar sobre sistemas, também menciona unidades e forças, envolvendo tipos operacionais de interoperabilidade, o que é bastante aderente a esta pesquisa.

A interoperabilidade permite não apenas a comunicação entre diferentes sistemas, criando um ambiente em que as informações circulam de forma contínua e entre qualquer dispositivo ou ambiente computacional. Também proporciona o compartilhamento de serviços e recursos, sendo essencial para as organizações. Interoperar cobre uma generalidade de serviços, e não apenas permite a entrega de pacotes, mensagens, pedidos ou procedimentos. A troca desses serviços cria uma operação efetiva dos sistemas, unidades ou forças (22).

### 2.1.2 Engenharia de SoS

A Engenharia de Sistema de Sistemas (SoSE) é uma disciplina que trata do planejamento, análise, organização e integração das capacidades de um conjunto de sistemas novos e existentes para formar um Sistema de Sistemas (SoS). No contexto da SoSE, a fase de planejamento envolve definir os objetivos e requisitos do SoS, bem como identificar os sistemas constituintes e suas capacidades. A identificação de requisitos é essencial para determinar as necessidades e expectativas dos *stakeholders*. A partir disso, são definidos os objetivos que estabelecem metas claras e mensuráveis para o SoS. Em seguida, são selecionados os sistemas constituintes, escolhendo aqueles que serão integrados e identificando onde novos sistemas podem ser necessários (45).

A análise envolve a avaliação detalhada dos sistemas constituintes e suas interações, abrangendo três principais aspectos: (i) interoperabilidade, para avaliar a capacidade dos sistemas constituintes de trocar informações e operar de forma conjunta; (ii) dependências, para identificar e gerenciar as dependências entre os sistemas constituintes; e (iii) riscos, avaliando os riscos associados à integração e operação do SoS, desenvolvendo estratégias para mitigá-los. Já a organização consolida a coordenação das atividades e recursos dos constituintes para garantir que eles trabalhem de maneira coesa e eficiente. Isto inclui estabelecer estruturas de governança para orientar e supervisionar o desenvolvimento e operação do SoS, alocar recursos e garantir que as atividades dos constituintes estejam alinhadas com os objetivos do SoS. A integração é o processo de unir os constituintes



em um SoS funcional, desenvolvendo uma arquitetura que descreva como os constituintes serão conectados e como podem interagir. Utiliza tecnologias e padrões para garantir que os sistemas possam se comunicar e funcionar juntos, realizando testes para garantir que o SoS atenda aos requisitos e objetivos definidos (45).

A interligação entre “sistema de sistemas” e “comando e controle” representa um elo importante onde a eficácia operacional depende de uma coordenação precisa e eficiente de sistemas constituintes independentes. Enquanto o SoS engloba a conexão entre vários sistemas independentes, o C2 assume o papel de coordenar e direcionar esses sistemas em tempo real, garantido a sincronização de esforços e o alcance de objetivos estratégicos. Compreender essas interações dinâmicas é importante para promover a resiliência do SoSC2.

Essa conexão pode ser entendida como: (i) integração e interoperabilidade, onde diferentes sistemas precisam atuar juntos e de modo coordenado para que as informações sejam trocadas em tempo real; (ii) coleta e disseminação de informações, para coletar informações vindas de sistemas diferentes e processá-las, consolidando em um ambiente SoS para que o C2 possa tomar uma decisão rápida e tenha uma consciência situacional atualizada; e (iii) flexibilidade e adaptabilidade, assim garantindo que os sistemas possam responder eficazmente a mudanças rápidas no ambiente operacional (46).

#### 2.1.2.1 Linguagens de Especificação

Um dos desafios encontrados em SoS refere-se a sua modelagem, em especial para desenhar os processos que dependem da interoperabilidade de seus Constituintes. Uma descrição mais formal é necessária para especificar os elementos que fazem parte da composição do SoS. Santos, Neto e Nakagawa(4) fizeram uma revisão sistemática sobre modelagem e especificação, e apresentam em seu trabalho as linguagens que foram utilizadas ou apresentadas como opção nos estudos. É possível notar na Figura 4 que o BPMN tem uma ampla adoção na área de SoS, seguido pelo SysML.

O estudo de Santos (4) buscou responder quatro questões de pesquisa: (i) “Quais notações têm sido usadas para especificar e gerenciar processos de negócios no contexto de Sistema de Sistemas”; (ii) “Quais dificuldades relacionadas aos processos de negócios têm sido enfrentadas em Sistema de Sistemas?”; (iii) “Como tem sido aplicado o *Business Process Model and Notation* no contexto de Sistema de Sistemas?”; e (iv) “As notações utilizadas para modelar processos de negócios em Sistema de Sistemas são expressivas o suficiente para representar todas as características de Sistema de Sistemas?”. Os resultados apontaram que mais de 50% da literatura selecionada utilizava BPMN na modelagem dos processos de negócios. O maior problema relatado pelos autores está relacionado à falta de expressividade dos elementos presentes nas notações em especial quando se trata da interação entre os sistemas. No decorrer da pesquisa é perceptível que as notações

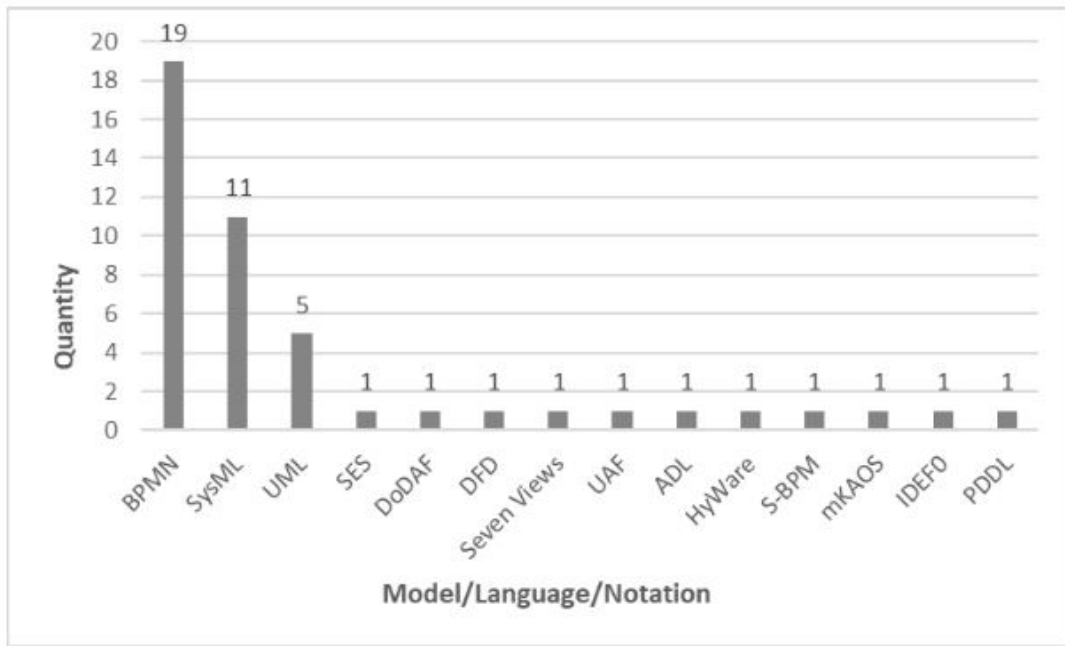


Figura 4 – Modelos e Linguagens presentes nos estudos selecionados por (4).

utilizadas para a modelagem ainda não estão suficiente maduras e precisam melhorar no contexto SoS. O SysML aparece em segundo lugar na escolha da ferramenta para modelagem.

O BPMN surge como uma linguagem de fácil entendimento e aplicação para representar de forma gráfica o SoS e sua composição. Seu objetivo envolve alguns pontos principais como (47):

- Desenhar um novo processo
- Documentar um processo existente
- Utilizar como suporte de treinamento
- Avaliar padrões e conformidades
- Simular diferentes situações
- Identificar oportunidades de melhoria
- Descrever requisitos de automação
- Facilitar comunicação e discussão

Foi encontrado em diversas referências (24, 27, 26, 25, 28, 29, 4) como uma modelagem para estruturar um SoS. Fornece uma simbologia simples porém robusta, que

contempla diversas etapas de um processo buscando modelar conforme o cenário real todos os aspectos de processos de negócio.

O BPMN tem como objetivo principal dar suporte ao gerenciamento de processos de negócio, buscando facilitar o entendimento das partes interessadas e também sendo capaz de fornecer uma notação intuitiva para representar a semântica complexa do processo. Sua capacidade de representar os processos de negócio está relacionada a sua modelagem voltada para a especificação, em alto nível, da análise do domínio na forma de um processo de negócio.

Já o SysML é uma linguagem que foi desenvolvida para modelagem de propósito geral para aplicações em engenharia de sistemas. É uma linguagem utilizada por alguns trabalhos (24, 30, 31) na modelagem estática de um SoS, assim como na dinâmica de seus Constituintes. A especificação de SysML reutiliza um subconjunto de UML, estendendo-o quando necessário. O SysML descreve as funções e comportamentos de um sistema através de alguns diagramas como:

- **Diagramas de Atividades:** Descrevem entradas, sequências, condições e saídas para coordenar vários comportamentos do sistema. Apresentam muitas semelhanças com os antigos fluxogramas, estando a nível de um algoritmo.
- **Diagramas de Classes:** Permitem a visualização das classes que compõem o sistema com seus respectivos atributos e métodos, demonstrando como as classes se relacionam, complementam e transmitem informações entre si.
- **Diagramas de Sequência:** Descrevem o fluxo de controle entre os atores e um sistema ou seus componentes.
- **Diagramas de Máquinas de Estado:** São utilizados para modelar o comportamento discreto por meio de sistemas de transição de estado finito.
- **Diagramas Paramétricos:** Permitem que os usuários representem restrições matemáticas entre as propriedades do sistema.

Um diagrama de sequência para modelar fluxos de atividades proporciona uma visualização clara e detalhada de como as interações ocorrem ao longo do tempo entre diferentes sistemas. Os diagramas ajudam a detalhar cada interação, garantindo que todos os passos sejam seguidos conforme o planejado.

## 2.2 Comando e Controle (C2)

Alberts e Hayes(48) descrevem, segundo uma definição oficial dos Estados Unidos da América (EUA) publicada na *Joint Chiefs of Staff Publication* para C2, que Comando

inclui “a responsabilidade de usar efetivamente os recursos disponíveis, planejar o emprego, organizar, dirigir, coordenar e controlar as forças militares para o cumprimento das missões atribuídas. Também inclui a responsabilidade pela saúde, bem-estar, moral e disciplina do pessoal designado.” Essa definição inclui o controle como parte do comando.

McCann e Pigeau(49) definem Comando e Controle como “o estabelecimento de uma intenção comum para alcançar uma ação coordenada”. Alguns problemas centrais do C2 podem ser elencados em um contexto militar:

- Como lidar com as incertezas inerentes de ambiente e operação?
- Como obter um efeito coletivo de um grande conjunto de recursos?
- Como produzir um impacto em um ritmo mais rápido que o inimigo?

Uma re-conceitualização de C2 foi proposta por Pigeau e McCann(50) em um trabalho posterior, onde definiram comando e controle separadamente. Nesse trabalho, o controle aparece como o instrumento de comando, mantendo uma dependência entre os termos. Eles iniciam com uma definição de controle que vai além de uma simples visão para incluir pessoal, instalações e procedimentos, que por sua vez implicam estruturas e processos. Eles observam que “o controle tem um preço” porque restringe a flexibilidade. Os autores elencam seguintes definições formais de C2:

- *Controle: aquelas estruturas e processos concebidos pelo comando para habilitá-lo e gerenciar o risco.*
- *Comando: a expressão criativa da vontade humana necessária para cumprir a missão.*

A definição de Comando e Controle de Alberts e Hayes(51) envolve uma concentração de esforços de indivíduos e/ou organizações, assim como recursos e informações para a realização de alguma tarefa, objetivo ou meta. Em um cenário de forças armadas, por exemplo, embora C2 possa ser necessário, não é suficiente para garantir o sucesso de uma missão militar. Depende de muitos outros fatores, dentre os quais podemos citar a disponibilidade dos recursos apropriados e também suas capacidades.

Algumas outras definições importantes são encontradas na literatura, como a encontrada em DoD (52): “Comando e Controle envolve o exercício de autoridade e direção por um comandante devidamente designado sobre forças designadas e anexadas no cumprimento da missão...”. (5) define que: “C2 são as funções dos comandantes, estados-maiores e outros órgãos de comando e controle em manter a prontidão de combate de suas forças, preparar operações e dirigir as tropas no desempenho de suas tarefas. O conceito abrange a contínua aquisição, fusão, revisão, representação, análise e avaliação

*de informações sobre a situação; emitir o plano do comandante; atribuição de tarefas; planejamento operacional; organizar e manter a cooperação por todas as forças e todas as formas de apoio...”*

Em um cenário de C2, os SoS são em sua maioria limitados ou direcionados, pois são caracterizados por dados e controle centralizados. Evidencia os esforços de várias entidades, que podem ser organizações ou indivíduos, e também recursos, que incluem informações para a realização de alguma meta, objetivo ou tarefa específica. É importante que as entidades envolvidas atuem para um objetivo comum (51).

O Comando e o Controle envolvem duas características muito interligadas entre si: o exercício do Comando, que abrange a tomada de decisão, e a prática do Controle, que possui a finalidade de dar eficácia ao Comando. A prática do Comando e Controle envolve sete funções principais (51):

- Definição de objetivos
- Determinação de papéis, responsabilidades e relações
- Estabelecimento de regras e prazos
- Monitoramento da situação e do progresso
- Motivação e Confiança
- Adestramento (Treinamento)
- Provisionamento (Logística)

Alguns fatores definem a ideia central do C2, e são considerados como as dimensões de uma abordagem de Comando e Controle. Esses fatores variam dentro das estruturas e processos de uma determinada organização, que pode ser uma força militar, uma nação, uma coalizão ou uma força. Tais dimensões são elencadas como: (i) atribuição de direitos de decisão; (ii) padrões de interação entre os atores; e (iii) distribuição de informações (51).

### 2.2.1 Classificação de C2

O modelo de maturidade NATO NEC C2 (N2C2M2) (5) apresenta os níveis de maturidade de uma organização de acordo com a abordagem de Comando e Controle adotada, que pode ser classificada como: (i) conflitante (*conflicted*), (ii) desconflitante (*deconflicted*), (iii) coordenada (*coordinated*), (iv) colaborativa (*collaborative*) e (v) periférica (*edge*). Cada abordagem será melhor descrita a seguir.

A abordagem Conflitante possui limitação nas comunicações, dado que não há interação nem objetivo coletivo. Nessa abordagem, o único C2 existente é o de cada entidade envolvida, isoladamente, não havendo troca de informação entre cada um deles. As interações somente ocorrem no âmbito do grupo de indivíduos, que compõem o *cluster* que constitui o sistema C2 de uma Entidade. Desta forma, qualquer possibilidade de interação entre *clusters*, provavelmente seria conflitante, uma vez que questões de interoperabilidade e objetivo coletivo são ignoradas neste modelo.

Já na abordagem Desconflitante começa a surgir um compartilhamento de informações visando evitar a ocorrência de conflitos. É uma abordagem onde consegue-se evitar discordâncias nas comunicações, sendo possível uma tomada de decisão coletiva, porém bem limitada. Neste caso, já existem alguns pontos de interação entre os *clusters* que constituem os sistemas C2 de cada Entidade. Considerando que algumas entidades ainda não interagem entre si, este tipo de estrutura ainda apresenta limitações e provavelmente irá atender somente a objetivos coletivos específicos. Esse é um cenário bem semelhante ao que temos hoje no exército. Alguns sistemas com seus módulos funcionam e interoperam sem falhas, mas na necessidade de se comunicar com um outro sistema, precisam de um ponto chave para que essa interação aconteça.

A abordagem Coordenada é pautada em um ambiente integrado e robusto, buscando objetivos comuns e compartilhamento de informação. Na abordagem Coordenada existem *clusters* que assumem papéis de controle de tarefas (*Task Cluster*), onde coordenam essas tarefas de um modo centralizado. Esse cenário ideal de Comando e Controle permite que sistemas com diferentes funcionalidades e pertencentes a diferentes armas possam trocar informações e gerenciar missões de forma eficiente e colaborativa. A centralização do controle de tarefas assegura uma resposta rápida e precisa às necessidades operacionais, promovendo uma maior eficácia e coesão nas operações militares.

Apesar de parecer um cenário perfeito, a abordagem Colaborativa traz um grande compartilhamento de informação, objetivos comuns e forte interação, tornando-a muito complexa para a realidade dos sistemas de comando e controle militares. Tudo isso demanda um ambiente integrado e robusto, onde os planejamentos são constantemente atualizados. A Figura 5 mostra que, além das tarefas de coordenação de alguns *clusters*, a colaboração entre os sistemas aumenta a complexidade, uma vez que há um maior número de interações entre *clusters* e *indivíduos* que compõem o sistema como um todo.

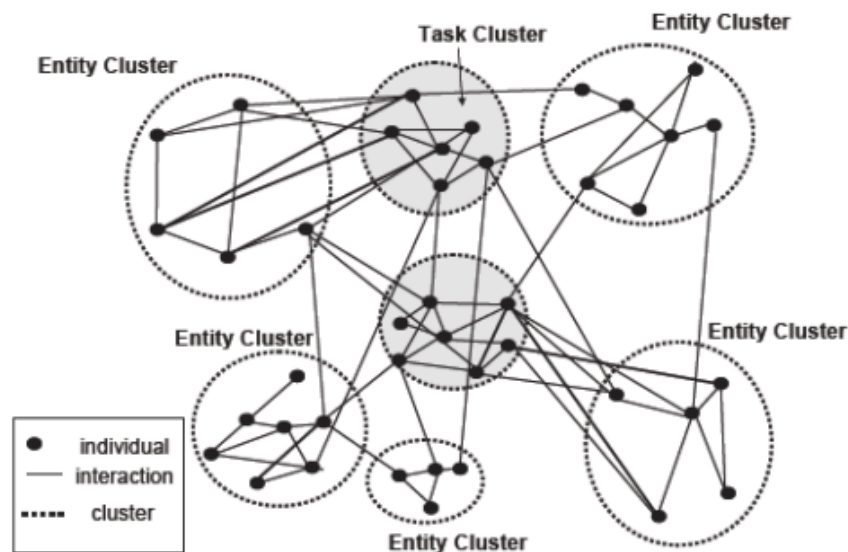


Figura 5 – Abordagem de C2 colaborativa (5)

Na abordagem Periférica, também conhecida por *Edge*, o compartilhamento de informações é o maior possível. Nesse caso, é requerida uma rede com largura de banda de transmissão extensa, com grande confiabilidade e robustez para que as comunicações sejam seguras e bem integradas. Esta abordagem requer uma infraestrutura de comunicação avançada, capaz de suportar o grande volume de dados e a alta frequência de interações entre os sistemas. No entanto, em cenários de operação militar, a implementação dessas redes pode ser limitada devido à necessidade de assegurar a segurança na transmissão das informações. Como pode ser observado na Figura 6, o número de interações e de *clusters* de tarefa é bem maior do que as demais abordagens, justificando com isso equipamentos de comunicações com capacidades compatíveis com as demandas apresentadas.

O SoS busca integrar diversos sistemas independentes, visando alcançar objetivos estratégicos. Já a interoperabilidade desempenha um papel fundamental na capacidade do SoS em operar de forma integrada e eficiente. Uma análise aprofundada permitirá uma compreensão mais abrangente dos requisitos e desafios enfrentados na implementação prática dessas soluções.

### 2.2.2 Sistemas de Comando e Controle

Sistemas de Comando e Controle buscam atender as demandas do Exército Brasileiro, e são fundamentados na necessidade de acompanhamento das operações em tempo real por parte das autoridades e dos comandantes militares em diversos níveis. Essa demanda exige equipamentos e técnicas para se ter um C2 eficiente, dado que é um ambiente marcado pela volatilidade, incerteza e complexidade acerca das comunicações. Carac-

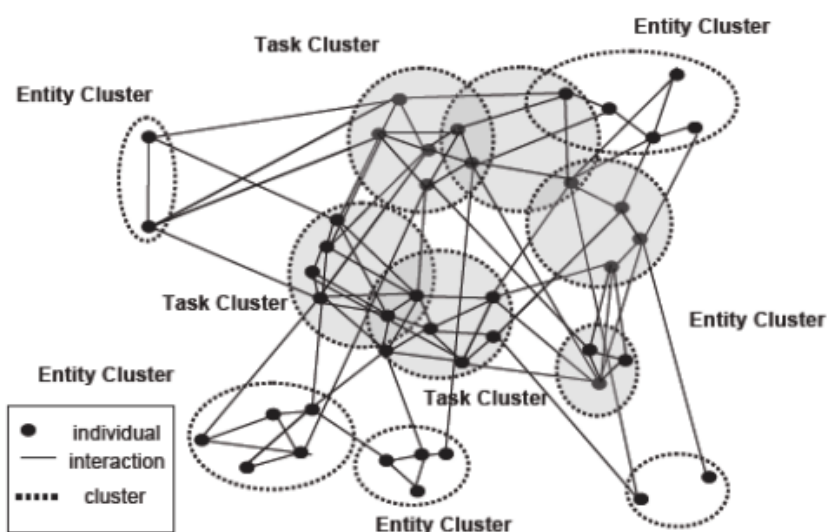


Figura 6 – Abordagem de C2 periférica (5)

terísticas oriundas do advento da robótica, informática, novos materiais, biotecnologia, inteligência artificial são incorporadas, buscando-se consolidar comunicações mais rápidas e com maior capacidade de transmissão de dados, imagens e vídeos entre equipamentos para toda parte do mundo (53).

#### 2.2.2.1 Família de Aplicativos de Comando e Controle da Força Terrestre do Exército Brasileiro (FAC2FTer)

Através da busca de uma comunicação eficiente entre esses sistemas, do alcance da interoperabilidade e da redução do tempo de decisão da Força Terrestre, em 2018 o Exército Brasileiro aprovou a criação do Projeto de Desenvolvimento da FAC2FTer (Família de Aplicativos de Comando e Controle da Força Terrestre). Entre os principais sistemas desenvolvidos no âmbito deste projeto está o C2 em Combate, especialmente voltado para a atuação em tempos de guerra, para assegurar que as unidades militares possam operar de forma coordenada e eficaz em cenários de conflito. (53).

A Portaria número 203/Cmt Ex, de 17 de março de 2015 (54), estabelece a criação da FAC2FTer para atender as necessidades operacionais do Sistema de Comando e Controle da Força Terrestre (SC2FTer). Essa demanda trouxe uma proposta de organização e escopo de sistemas de C2 com o objetivo de constituir um conjunto de aplicativos relacionados e interoperáveis para apoiar a execução das atividades de C2 de forma apropriada a cada escalão e situação de emprego, e para possibilitar o intercâmbio de ordens e informações do teatro de operações, apoiando a tropa no planejamento e na execução das operações terrestres, de maneira simples, uniforme e integrada.



### 2.2.2.2 Sistema Digitalizado de Artilharia de Campanha (SISDAC) - Gênesis

O SISDAC, também conhecido como Gênesis, é um Sistema Computadorizado de Direção e Coordenação de Tiro, sendo uma inovação tecnológica projetada para substituir os métodos tradicionais de controle de tiro. Tem como objetivo de atender às necessidades de Apoio de Fogo das Armas de Infantaria, Cavalaria e Artilharia. Este sistema visa melhorar a precisão, eficiência e rapidez nas operações de tiro, integrando funcionalidades avançadas de cálculo balístico, gestão de munições e coordenação de fogo entre diferentes unidades. Possui os seguintes módulos:

- Módulo de Observação
- Módulo de Oficial de Ligação
- Módulo de GAC
- Módulo de Linha de Fogo

### 2.2.2.3 Integração entre FAC2FTer e Gênesis

A interação entre a Família de Aplicativos de Comando e Controle da Força Terrestre do Exército Brasileiro (FAC2FTer) e o Sistema Digitalizado de Artilharia de Campanha (SISDAC, também conhecido como Gênesis) é fundamental para o sucesso das operações da Brigada de Infantaria Blindada. Esses sistemas desempenham importantes papéis na coordenação e no apoio das operações militares, especialmente quando se trata do emprego da Artilharia de Campanha.

O Gênesis é projetado para integrar informações de diversos meios de busca de alvos, radares e sensores, permitindo uma visão abrangente e detalhada do campo de batalha. Ele suporta o planejamento e a coordenação dos fogos de artilharia, garantindo que os alvos sejam designados corretamente e que os disparos sejam precisos e eficazes.

Já a FAC2FTer vem sendo desenvolvida para apoiar atividades e processos de comando e controle em todos os escalões de uma Força Terrestre Componente (FTC), e se desdobra em três aplicativos principais (55): *Alpha*, *Bravo* e *Charlie*, levando em consideração as diferentes situações operacionais em que esses escalões podem se encontrar.

- **Alpha**– apoia o Processo de Planejamento e Condução das Operações Terrestres (PPCOT), realizado pelos Estados-Maiores (da FTC até o nível Unidade). Representa a convergência das funcionalidades providas pelos sistemas *Pacificador* e *C2 em Combate*, e deverá ser disponibilizado tanto para elementos desdobrados quanto para elementos aquartelados.

- **Bravo** – focado no combate continuado, tem a finalidade de apoiar elementos embarcados em viaturas operacionais — Subunidades e suas frações, além de Posto de Comando Tático (PCT) de Unidades. Representa uma evolução do sistema *Gerenciador do Campo de Batalha (GCB)*.
- **Charlie**– De forma semelhante ao *Bravo*, possui foco na construção da consciência situacional e na sincronização das ações. Destina-se a apoiar os comandantes de Subunidades e frações, quando desembarcados. Pode ser caracterizado por um evolução da versão móvel do sistema *Pacificador*.

### 2.2.3 Sistema de Sistemas de Comando e Controle (SoSC2)

Sistema de Sistemas (SoS) é uma combinação de sistemas independentes que operam em conjunto na busca por objetivos mútuos. A literatura apresenta uma diversidade de conceitos, com focos em diferentes características, não existindo uma definição única amplamente aceita para o termo. No entanto, há um consenso de que este é um tipo de sistema construído a partir de outros sistemas, formando um grande sistema complexo (56). A interoperabilidade permite que diferentes sistemas consigam trocar informações e serviços, criando um ambiente em que as informações circulam de forma contínua e entre qualquer dispositivo. Interoperar vem sendo um desafio a ser superado diante da tecnologia oferecida, onde diversos tipos de produtos de softwares, *smartphones* e *tablets* trocam informações em tempo real. E não se limita apenas a troca de informação, pois interoperar vai além. É uma troca de serviços, entre pessoas, organizações e/ou sistemas. Em um cenário de Comando e Controle (C2) torna-se necessária essa percepção nos diversos níveis, não se restringindo apenas ao Comando e seu Estado-Maior.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

A presente pesquisa foi fundamentada em um levantamento de artigos publicados através de uma busca orientada sobre engenharia de sistema de sistemas. Para conduzir a procura por trabalhos relacionados foram utilizadas *strings* de busca contendo palavras-chave sobre o assunto, visando mapear artigos de referência e contribuição ao tema abordado. Uma apuração nos resultados foi realizada de modo a priorizar documentos que enfatizassem o tema em questão. Como complemento, foram identificados pesquisadores renomados na área, onde foi possível pesquisar por trabalhos relacionados a eles, ajudando a encontrar estudos relevantes e recentes. Outro ponto importante foi acompanhar as publicações em revistas e conferências acadêmicas na área em estudo. Combinando esses critérios de busca, encontramos diversos trabalhos que nortearam o desenvolvimento deste trabalho.

A base de dados *Scopus* foi utilizada por conter publicações de diversas áreas de conhecimento. É considerada a maior base de dados de artigos científicos do mundo, e indexa documentos da *Elsevier*, *IEEE*, *Sage*, *Taylor & Francis* e *Springer*. A *string* de busca mapeada foi a seguinte: TITLE-ABS-KEY(“SYSTEM OF SYSTEMS ENGINEERING” OR “SYSTEMS OF SYSTEMS ENGINEERING”) AND (LIMIT-TO(LANGUAGE, “English”)) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, “cp”) OR LIMIT-TO(DOCTYPE, “ar”)) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA, “COMP”)). A busca retornou 258 artigos, para os quais alguns critérios de inclusão e exclusão foram aplicados. Os critérios de inclusão são apresentados a seguir:

- **CI-1:** Trabalhos que abordam conceitos de engenharia de sistema de sistemas.
- **CI-2:** Trabalhos que abordam de forma coerente, concisa e formal os conceitos e aplicações da engenharia de SoS.
- **CI-3:** Trabalhos que apresentam métodos e/ou modelos para a concepção de um SoS.
- **CI-4:** Trabalhos cujo título apresentou coerência com a pesquisa em andamento.

Além dos critérios de inclusão, foram definidos alguns critérios de exclusão buscando filtrar melhor os resultados da busca, mirando apenas em artigos que apresentaram uma abordagem completa e com metodologias que contribuíssem para esta pesquisa.

- **CE-1:** O artigo é uma versão mais antiga de um outro já considerado.

- **CE-2:** Publicações em que o conteúdo dispõe apenas de conceitos.
- **CE-3:** Não foi possível ter acesso ao trabalho completo.
- **CE-4:** Artigos não foram publicados em revistas relevantes.
- **CE-5:** Artigos que não satisfaçam aos critérios de inclusão.

Inicialmente foram selecionados artigos publicados nos últimos 5 anos, contribuindo para que os resultados reflitam nos avanços mais recentes da área. Com isso restaram 80 artigos para leitura dos resumos, considerando os critérios de inclusão e exclusão. No entanto, alguns trabalhos anteriores a este período foram incluídos para leitura do resumo a partir da leitura do seu título, que se mostrou coerente com a pesquisa. Nessa seleção foram incluídos mais 12 trabalhos.

Em um primeiro refinamento, diversos documentos foram eliminados. Tal exclusão foi motivada pela não aderência do artigo ao tema da proposta, ou então por ser um trabalho muito semelhante a outros já selecionados. O passo seguinte envolveu a leitura da introdução e conclusão dos artigos restantes, onde novamente foram separados aqueles mais relacionados a pesquisa. Destes, 23 passaram por um estudo completo, entendendo com detalhes a abordagem proposta, sua metodologia e resultados obtidos. Após essa análise, 9 artigos foram elegidos para compôr esta seção.

### 3.1 Método para Modelagem/Concepção de SoSs

Um método para identificação de potenciais links de interoperabilidade é proposto por Fernandes et al.(6). O método de pesquisa foi inspirado em estudos de avaliação, seguindo um estilo sistemático contendo etapas como concepção e proposta de método. O trabalho visa auxiliar no estabelecimento de links de interoperabilidade entre SIs para formar um SoIS estruturado. A primeira fase consiste na definição do objetivo principal do SoIS, estabelecendo o propósito geral que o mesmo deve alcançar. Em seguida, são definidos os sub-objetivos do SoIS, detalhando metas específicas que sustentam o objetivo principal, orientando a integração e funcionalidade de cada sistema individual. Na terceira fase, são identificados e caracterizados cada sistema de informação (SI) candidato à interoperabilidade, selecionando aqueles que atendem aos critérios de compatibilidade e relevância para o SoIS. A quarta fase envolve a definição dos fluxos de interação entre os SIs, determinando como os dados e processos serão compartilhados e sincronizados entre eles. Em seguida, na quinta fase, é realizado o mapeamento dos formatos de entrada e saída de cada SI, o que permite a identificação de potenciais pontos de interoperabilidade e facilita a padronização das trocas de informação. Por fim, a última fase foca na definição da arquitetura do SoIS. Essa etapa organiza a estrutura do SoIS, detalhando como os

diferentes SIs se inter-relacionam para formar um sistema coeso e funcional. Todo o processo é apresentado na Figura 7.

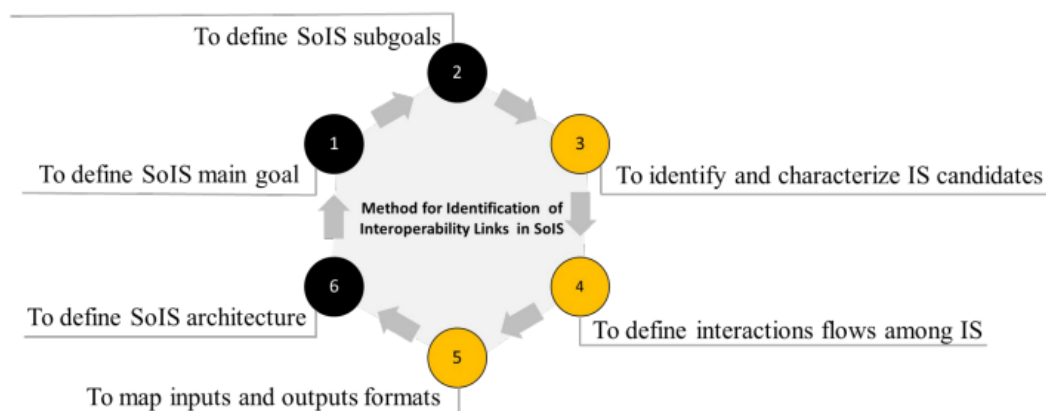


Figura 7 – Método para identificação de potenciais links de interoperabilidade em SoIS. (6)

Vale destacar que as fases da figura anterior não são independentes, pois cada uma pode melhorar a próxima e fornecer sua saída como entrada para a fase seguinte. Os resultados apontaram que o método ajuda a definir possibilidades de formação de *links* de interoperabilidade, exigindo dos *stakeholders* habilidades interpessoais para aumentar a assertividade na busca de potenciais candidatos a SI para compor um SoIS.

O modelo apresentado na Figura 7 fornece uma estrutura para identificar potenciais links de interoperabilidade em um SoIS, mas ainda opera em um nível de abstração elevado. Embora estabeleça a relação entre sistemas constituintes e processos de negócio, ele não detalha as atividades específicas desses processos nem explicita suas entradas e saídas, o que pode dificultar a identificação da interoperabilidade em um nível mais granular. Para superar essa limitação, é essencial aprofundar a modelagem dos processos de negócio, identificando quais informações são trocadas, como ocorrem essas interações e onde há necessidade de interoperabilidade. Uma análise detalhada dos fluxos de informação possibilita um mapeamento mais preciso dos pontos de interação entre os sistemas, permitindo uma abordagem mais estruturada para a integração.

Com uma visão direcionada ao entendimento da interoperabilidade, o artigo de Fernandes, Neto e Santos(7) apresentou as possíveis ligações de Sistema de Sistemas de Informação (SoIS - *System of Information System*). Para isso, são investigados fatores que impactam a criação de links de interoperabilidade em um cenário de SoIS. O artigo busca responder a questão de pesquisa: “Quais são os principais elementos e relações que caracterizam a interoperabilidade no SoIS?”. Essa pergunta surgiu da necessidade de investigar quais relações podem ser estabelecidas em um conjunto de Sistemas de Informação (SI) e como tais relações influenciam a interoperabilidade dentro do cenário.



sistemas da Marinha. A metodologia SoSE&I é construída em um modelo de processo “Vee” de Engenharia de Sistemas apresentado na Figura 9, e consiste de princípios que consolidam a arquitetura SoS, o projeto e desenvolvimento de sistemas, assim como a garantia da missão.

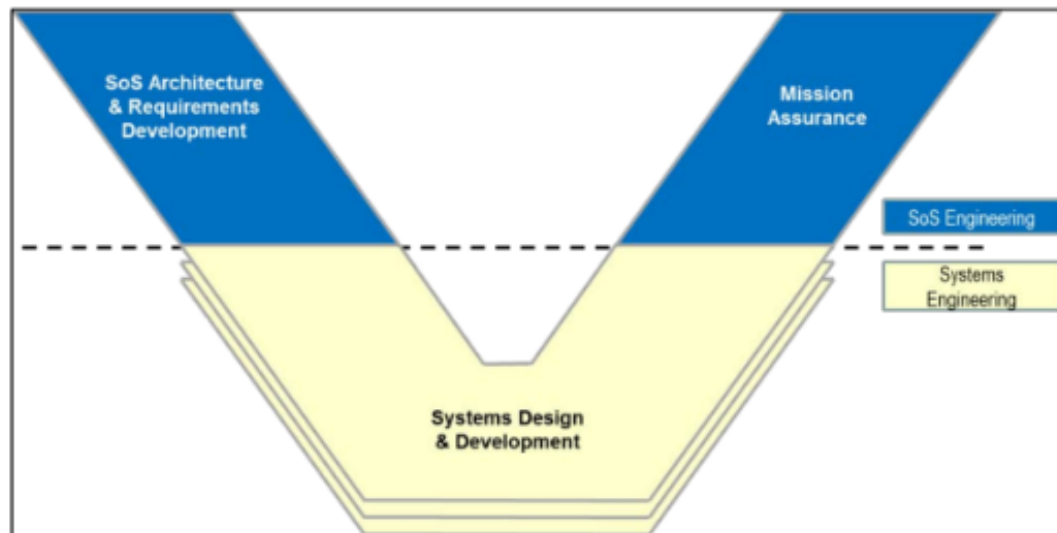


Figura 9 – Modelo de processo “Vee” de Engenharia de Sistemas. (8)

A etapa (i) descreve a Arquitetura SoS e o Desenvolvimento de Requisitos, onde as necessidades do usuário são definidas e depois transformadas em requisitos técnicos. Na etapa (ii), é possível observar a parte inferior do “V” em camadas. Isso porque cada folha representa um sistema constituinte. Vários “Vees” são utilizados para ilustrar a ideia de que muitos sistemas são desenvolvidos e gerenciados simultaneamente, com cada sistema em diferentes níveis de maturidade dentro de seu próprio ciclo de vida. As atividades de Garantia da Missão do SoS, em (iii) são complementares às atividades realizadas na Arquitetura SoS (i). Referem-se a um conjunto de processos que asseguram que o sistema atenda aos objetivos e requisitos definidos para a missão. Os autores propõem o “Vee”, mas não detalham um método específico para a modelagem dos processos e interações dentro do SoS.

Ainda abordando os desafios da interoperabilidade e modelagem de um SoS, o estudo de Baek et al.(9) apresenta um método de modelagem para análise e projeto de Sistemas de Sistemas (SoS) baseado em modelos (MBSOSE). O objetivo é oferecer uma abordagem geral para modelagem de SoS, aplicável a diversos domínios, além de tratar problemas de engenharia durante as fases de análise e design da SoSE. Tal método foi implementado na forma de uma ferramenta chamada SIMVA-SoS *Modeler* (uma ferramenta de modelagem para verificação e análise baseada em simulação de SoS), tendo definidas 6 categorias e 19 tipos de modelos. A Figura 10 demonstra a metodologia.

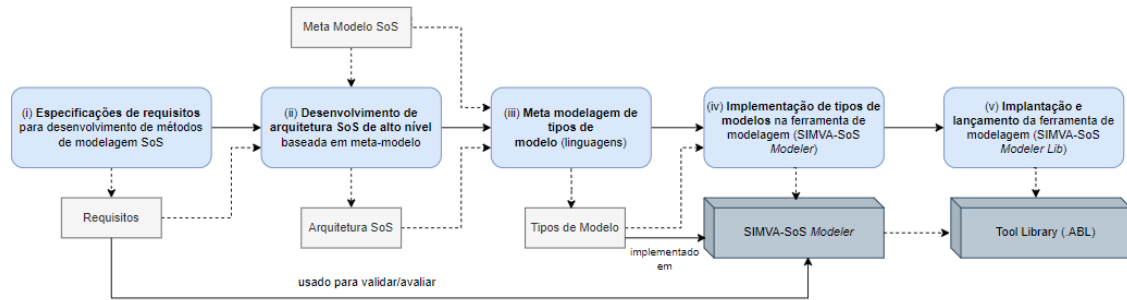


Figura 10 – Processo geral para desenvolver um método de modelagem de propósito geral para engenharia SoS, adaptado de (9)

A metodologia apresentada por Baek et al.(9) começa com a especificação detalhada dos requisitos que o método de modelagem deve atender. Estes requisitos servem como base para o desenvolvimento e validação do método, garantindo que este atenda às necessidades do SoS. Com base nos requisitos, é definida uma arquitetura de alto nível para o SoS, identificando os tipos de modelos necessários para descrever diferentes aspectos do sistema. Na etapa de desenvolvimento do método de modelagem são desenvolvidos os modelos detalhados, chamados de meta-modelos, seguindo a categorização definida na etapa anterior. Este é o momento de definir como os diversos componentes e interações do SoS serão representados pelos modelos. Os meta-modelos são implementados no SIMVA-SoS Modeler, que inclui várias linguagens de modelagem compostas por diagramas e procedimentos, permitindo que os usuários criem modelos seguindo o método proposto, facilitando a análise e o projeto de SoS. No entanto, o método proposto no artigo utiliza uma ferramenta específica para a modelagem, não especificando um método que consiga lidar com a complexidade da interação entre diferentes sistemas em um SoS.

Dridi, Benzadri e Belala(10) desenvolveram um metamodelo para modelagem de Sistemas de Sistemas chamado MeMSoS. O meta-modelo destaca a importância dos conceitos de Objetivos (*Goals*), Papéis (*Roles*), Capacidades (*Capabilityts*) e Constituintes para o design de SoSs. O artigo adota uma abordagem de Engenharia Dirigida por Modelos (MDE) e busca aumentar o nível de abstração na modelagem de SoSs, facilitando a automação do seu desenvolvimento. As principais contribuições deste artigo são: (i) um metamodelo para SoS chamado MeMSoS, (ii) sua ferramenta de suporte e (iii) um estudo de caso ilustrativo de um Sistema de Resposta a Emergências de Aeronaves (AERSoS). O metamodelo define SoS como uma combinação de subsistemas que são compostos por objetivos, capacidades, funções e seus links, como mostra a Figura 11.

O MeMSoS oferece propriedades de interoperabilidade e heterogeneidade que permitem o compartilhamento irrestrito de funções e objetivos entre diferentes subsistemas no nível de SoS, bem como de capacidades entre funções no nível de Constituintes. Isso



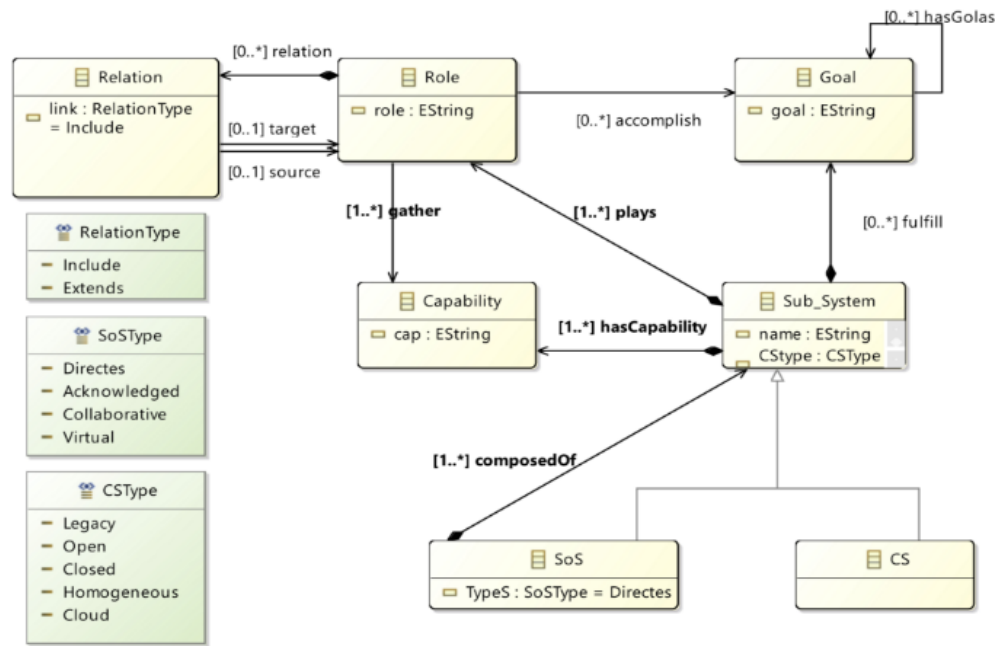


Figura 11 – Metamodelo MemSoS. (10)

pode reduzir os custos de criação de novas funções, metas e capacidades, ao permitir que subsistemas existentes sejam reutilizados de diversas maneiras para diferentes propósitos. O metamodelo foca na descrição das capacidades, objetivos e papéis dos sistemas constituintes, mas não detalha a modelagem dos processos de negócio e fluxos de informação entre os sistemas nem detalha um método para lidar com a complexidade da interação dos Constituintes.

O artigo proposto por Smaali e Boucebsi(11) descreve uma metamodelagem para SoS baseados em IoT. O objetivo principal é fornecer um modelo que cubra várias características desses sistemas, incluindo a descrição da organização do SoS, a especificação de suas missões, uma visão detalhada da estrutura dos sistemas constituintes e seu comportamento interno, e como eles cooperam para atingir um objetivo específico. Os autores escrevem que um sistema SoS baseado em IoT é definido como um conjunto de sistemas e relações, onde cada subsistema é um sistema útil por si só, tendo seus próprios objetivos e recursos, e colabora dentro do SoS para cumprir suas missões. A proposta de metamodelagem oferece uma estrutura modular e extensível, permitindo que novos dispositivos e tecnologias IoT sejam integrados ao SoS de forma eficiente. Isso é particularmente útil em cenários onde há rápida evolução tecnológica, pois o metamodelo facilita a adição e substituição de componentes. O trabalho também explora mecanismos para suportar a interoperabilidade entre diferentes subsistemas, que é essencial em um SoS IoT. Essa interoperabilidade é possível devido à padronização das interações e à representação das funcionalidades dos componentes, o que facilita a comunicação e a troca

de dados entre sistemas com características distintas. O metamodelo proposto, apresentado na Figura 12 facilita a escalabilidade ao definir claramente os papéis e relações entre os componentes do SoS, permitindo que novos nós ou dispositivos sejam incorporados sem comprometer a funcionalidade do sistema. No entanto, o escopo da modelagem é específico para sistemas baseados em IoT. O foco está na definição de um metamodelo e em como ele pode ser usado para descrever a arquitetura de um SoS baseado em IoT, mas não detalha um processo completo de desenvolvimento do SoS.

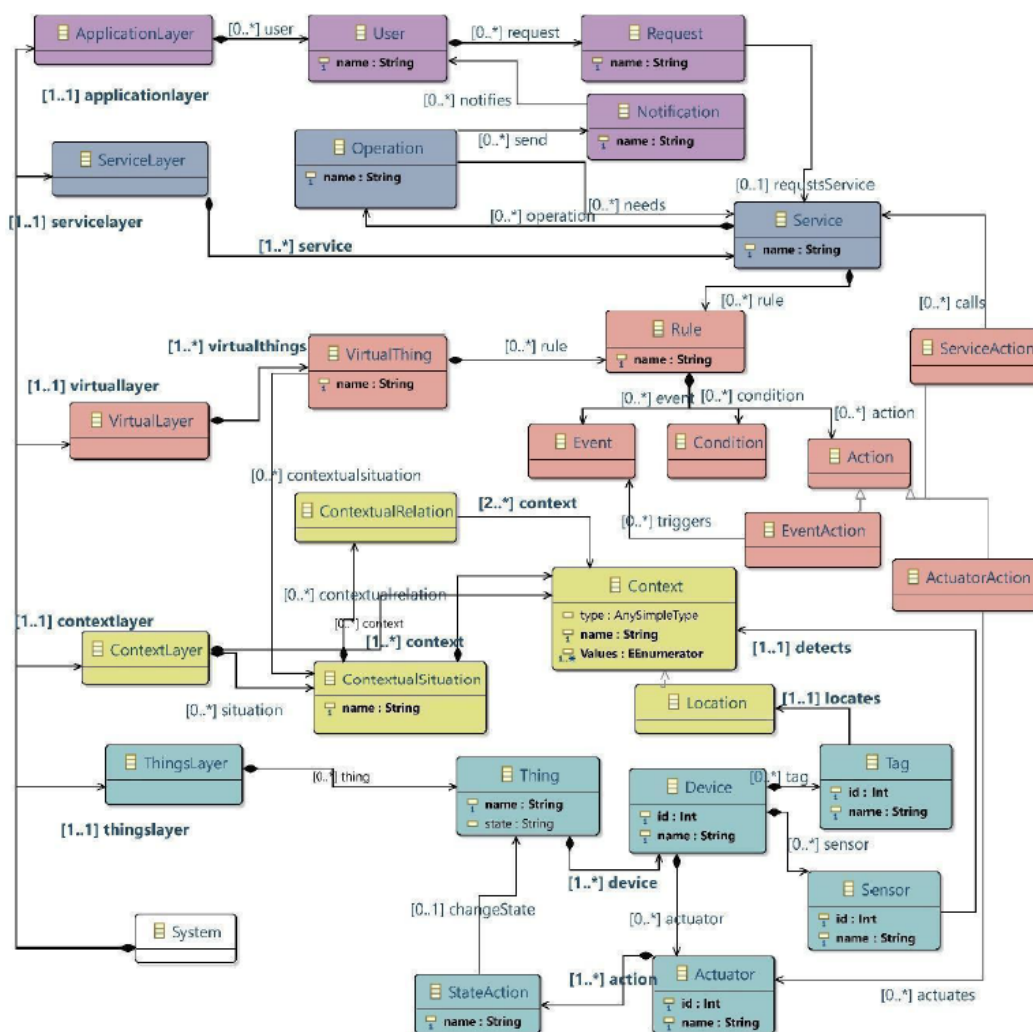


Figura 12 – Metamodelo proposto. (11)

A Figura 13 ilustra, por meio de um estudo de caso de uma casa inteligente (*Smart Home - SH*), como os subsistemas interagem para realizar missões específicas, como a detecção de incêndio.

No estudo de caso, o sistema de vigilância monitora as dependências da casa para detectar qualquer suspeita de incêndio e, em tal situação, o sistema executa a ação de acionar o extintor de incêndio, que por sua vez aciona o serviço de janelas para que sejam

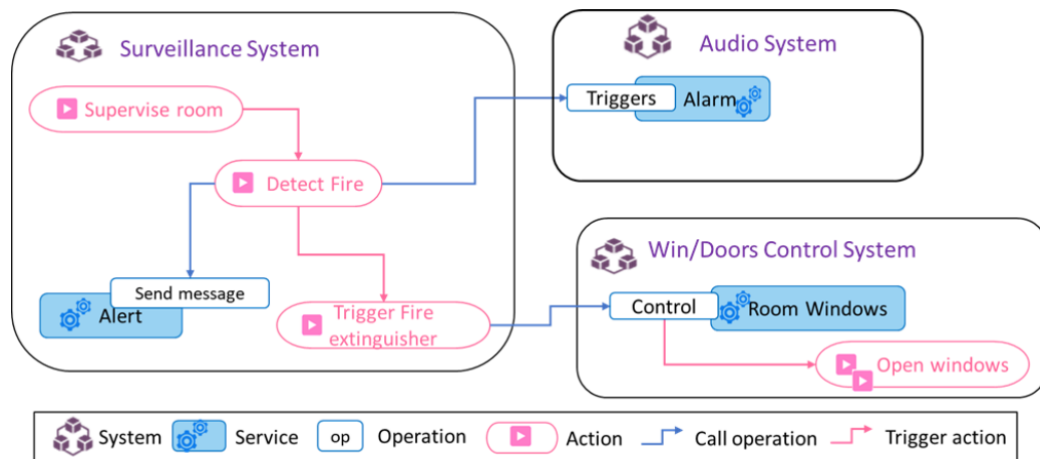


Figura 13 – Interação dos subsistemas para realizar missões específicas. (11)

abertas. Em paralelo, o serviço de alarme de áudio do sistema de áudio é acionado e o serviço de alerta do sistema de vigilância envia mensagens de alerta para os bombeiros e a polícia.

## 3.2 Modelagem de um SoS específico

Xue et al.(12) apresentaram um trabalho baseado no AERSoS, um SoS composto por cinco sistemas constituintes com desafios complexos de integração e interoperabilidade. Esse SoS possui um importante papel no processo de gestão de emergências para combate a incêndios florestais na China, abrangendo a análise do modo de missão, o estudo das estratégias de lançamento de água e a avaliação da eficácia. A descrição do SoS é feita através de modelos que permitem a visão de vários aspectos, como o ponto de vista operacional (OV) e ponto de vista de capacidade (CV) baseados no DoDAF.

Os modelos descritos pelo ponto de vista operacional em (12) incluem quatro sub-modelos: OV-1, OV-2, OV-5a e OV-5b. O modelo OV-1 é o modelo conceitual operacional de alto nível, que mostra o cenário AERSoS, seus principais conceitos operacionais e as interações entre os elementos do modelo. Enquanto isso, o OV-2 inclui a definição de conceitos operacionais, planejamento operacional e alocação de atividades aos recursos que é um padrão lógico de fluxos de recursos entre sistemas da AERSoS para combate a incêndios florestais.

Nesta pesquisa foram resumidas as atividades para todos os operadores nos nós com transmissão mútua de informações. O modelo OV-5a detalha as hierarquias e dependências no sistema de estudo da estratégia de lançamento de água, no sistema de avaliação de eficácia e no nó de verificação de simulação. O modelo de lançamento de água realiza o planejamento e a simulação do ponto de lançamento e da rota de chegada. O modelo

OV-5b descreve os relacionamentos e dependências entre as atividades do modelo OV-5a e os recursos trocados entre as atividades do modelo OV-2, como mostra a Figura 14. Xue et al.(12) utilizam o DoDAF, um framework popular em sistemas de defesa, para descrever o AERSoS apresentando diferentes pontos de vista (OV e CV). No entanto, o trabalho não propõe um método que possa ser usado para conceber qualquer SoS. Além de não detalhar um método, não especifica como integrar os sistemas e nem mesmo aborda questões como entradas e saídas dos sistemas.

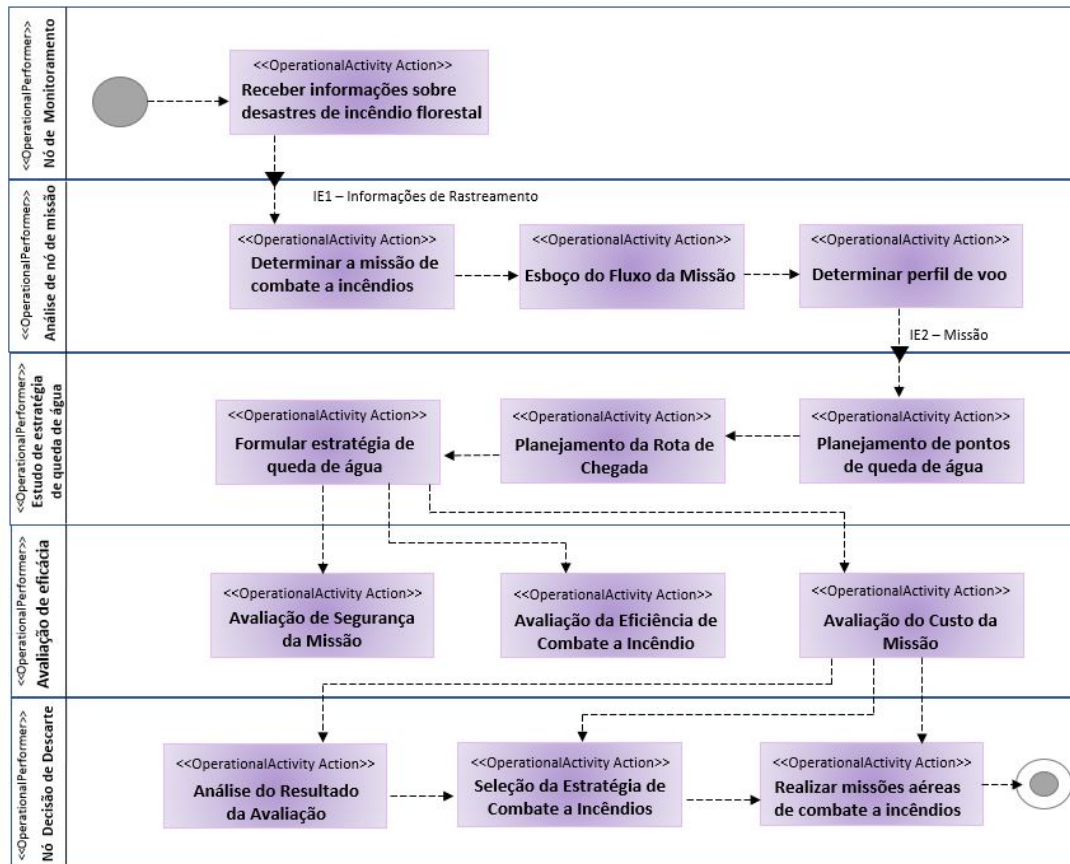


Figura 14 – Modelo OV-5b DoDAF - Modelo de atividade operacional, adaptado de (12)

Também na perspectiva de modelar um SoS específico, Paes et al.(24) relatam em seu artigo a aplicação de Engenharia de Sistemas de Sistemas (SoSE) no setor de defesa brasileiro através do projeto SisGAAz (Sistema de Gestão da Amazônia Azul). Esse projeto foi concebido para integrar e coordenar os três principais sistemas de comando e operação da Marinha do Brasil: (i) sistema naval de comando e controle (SisNC2); (ii) sistema de inteligência operacional (SIOp); e (iii) sistema de informações de tráfego marítimo (SISTRAM). A necessidade de interoperabilidade entre esses sistemas e outros softwares foi a principal motivação para o desenvolvimento do SisGAAz. A necessidade de interoperabilidade entre esses sistemas e outros softwares estratégicos foi a motivação para o desenvolvimento do SisGAAz, visando à criação de uma plataforma integrada para

operações navais.

A modelagem inicial do SisGAAz incluiu processos BPMN de iniciação, planejamento, execução, monitoramento e controle, operação e encerramento. A segunda etapa consistiu na definição do conceito de operações por meio de *workshops* com a Marinha do Brasil e com *stakeholders* externos, fundamental para identificar ameaças, atividades críticas e áreas prioritárias, e assim orientar o desenvolvimento de cenários operacionais detalhados. Na terceira fase, houve uma análise e especificação de requisitos que se traduziu em uma modelagem detalhada dos processos em BPMN e diagramas de fluxo de dados (DFD). Isso resultou em dois documentos principais: (i) o Documento de Requisitos do Sistema (SRD) e (ii) o Documento de Especificação do Sistema/Subsistema (SSS), que decompondo o SoS em grupos funcionais específicos e detalhando os requisitos de cada grupo. A etapa seguinte concentrou-se na definição da arquitetura do SisGAAz, com o uso de diagramas UML e SysML para capturar as interações e funcionalidades do sistema (24).

A contribuição do artigo para a modelagem de Sistemas de Sistemas (SoS) é significativa, pois destaca a importância da interoperabilidade no contexto militar e a complexidade de integrar sistemas heterogêneos. A utilização de ferramentas como SysML, BPMN e UML ajudou a visualizar a dinâmica dos componentes do SisGAAz, no entanto o trabalho não propõe um método com esta finalidade, enfrentado dificuldades com relação a dispersão de informações e a falta de uma visão estruturada para todo o SoS.

O trabalho de Cook e Pratt(57) apresenta uma metodologia para projetar novas abordagens de Engenharia de Sistemas de Sistemas (SoSE) focadas nas necessidades específicas das Forças de Defesa da Austrália. O artigo discute como caracterizar um problema de SoSE e direcionar o usuário a abordagens apropriadas, juntamente com processos, métodos, ferramentas e instalações compatíveis. Surge a proposta de um *framework* de engenharia adaptado ao contexto militar australiano, levando em consideração as complexidades e desafios enfrentados em ambientes de defesa e direcionando os usuários para abordagens apropriadas junto a processos, métodos e ferramentas compatíveis para conduzir as atividades militares do SoSE. A proposta inclui cinco fases detalhadas, abrangendo desde a preparação e construção de tipologia até a validação de desafios específicos e análise de abordagens contemporâneas de integração. O método está fortemente centrado em uma compreensão e adaptação de metodologias para as especificidades australianas e, por isso, enfatiza uma extensa revisão da literatura e uma análise do contexto local, seguida pela avaliação das metodologias globais de SoS aplicadas a esse contexto. Envolve ainda a aplicação de metodologias como os sistemas suaves (SSM) para análise de problemas, além de *workshops* e entrevistas para identificar influências e oportunidades de transformação. A partir da análise das metodologias globais de SoSE, o estudo busca avaliar a adequação de abordagens internacionais ao contexto australiano, inferindo sua utilidade para a capacidade de defesa. O artigo concentra-se na criação de um *framework* para classificar

Ref.	SoS				
	Concepção	Modelagem	Mapear E/S	Interoperabilidade	Metodologia
(6)		X	X	X	X
(7)				X	
(12)	X			X	X
(24)	X				
(9)	X	X			X
(57)		X			
(10)		X			X
(11)		X			
(8)		X	X	X	X

Tabela 1 – Trabalhos Relacionados

os problemas de SoSE, de acordo com as características de cada cenário, com o objetivo de direcionar o usuário para abordagens apropriadas, não chegando a propôr um método detalhado para modelagem ou concepção de um SoS. Apesar de apresentar princípios gerais para o design de abordagens de SoSE, não detalha como esses princípios devem ser aplicados na prática, nem oferece um conjunto de etapas e atividades para se chegar a um SoS.

A Tabela 2 consolida as referências de artigos, referentes à revisão da literatura apresentada neste trabalho.

### 3.3 Lacunas

O método proposto por Fernandes et al.(6) foca especificamente em Sistemas de Sistemas de Informação (SoIS), que são um tipo específico de SoS com ênfase em sistemas de informação, e não a qualquer tipo de SoS. Se concentra na fase inicial de identificação de links de interoperabilidade, não abrangendo as etapas de desenvolvimento, implementação e validação de um SoS robusto. O artigo não detalha as atividades específicas dos processos de negócio, nem explicita suas entradas e saídas. Essa falta de detalhamento pode dificultar a identificação da interoperabilidade em um nível mais granular, que é essencial para a modelagem de um SoS. Embora proponha um método, ele não oferece uma metodologia detalhada que guie o desenvolvimento do SoS em todas as suas fases.

Em seu artigo, Fernandes, Neto e Santos(7) oferecem uma visão abrangente sobre a interoperabilidade em Sistemas de Sistemas de Informação (SoIS), identificando dez fatores influentes. No entanto, não propõem uma metodologia detalhada para a concepção, desenvolvimento e implementação de um SoS. O artigo traz uma proposta de um modelo

	Limitações dos Trabalhos Relacionados
(6)	(i) Mapeamento de Entradas e Saídas superficial; (ii) Foi instanciado em apenas um caso real; (iii) Não utiliza uma metologia com diagramas/fluxos para apresentar o processo.
(7)	(i) Aborda a caracterização do SoS sem entrar em detalhes; (ii) Elabora apenas um modelo conceitual para SoS; (iii) Não apresenta uma proposta de solução.
(12)	(i) Não se preocupa com as entradas e saídas dos Constituintes; (ii) Utilizam o DoDAF pra modelar o SoS, e não uma metodologia própria; (iii) O trabalho não detalha um método para a interoperabilidade.
(24)	(i) Modelo V precisou ser adaptado, reforçando a necessidade de método próprio; (ii) Não há um método para apoiar o desenvolvimento do SoS; (iii) Necessidade de rever requisitos operacionais por região.
(9)	(i) Dependência de <i>scripts</i> manuais para organizar o modelo; (ii) O método enfrenta limitação de escalabilidade; (iii) Não detalha entradas e saídas.
(57)	(i) Trabalho em fase preliminar; (ii) Não aborda as particularidades de tipos específicos de SoS; (iii) Não detalha requisitos, nem entradas e saídas.
(10)	(i) Ausência de um fluxograma que ajude a entender todo o processo; (ii) Não há metodologia própria; (iii) SoS são Constituintes conectados, sem preocupar com interoperabilidade.
(11)	(i) Apresenta interoperabilidade limitada; (ii) O trabalho carece de uma validação prática do modelo; (iii) Não detalha entradas e saídas.
(8)	(i) Não apresenta um fluxo com as interações entre os sistemas; (ii) Limitação do método Vee a dinâmica do SoS.

Tabela 2 – Limitações dos Trabalhos Relacionados

conceitual, porém esse modelo é abstrato e não detalha os processos operacionais, os fluxos de informação e as interações específicas entre os sistemas constituintes. Os autores discutem a importância da interoperabilidade, mas não detalham como alcançar diferentes níveis (técnico, semântico, organizacional) em um SoS. Essas lacunas trazem a necessidade de um método mais completo, prático e específico para a modelagem e concepção de um SoS.

O artigo proposto por Vaneman e Budka(8) define o modelo de processo “Vee” do SoSE&I e discute como ele é usado para projetar o SoS ao longo de seu ciclo de vida. Trata-se de uma abordagem estruturada para a integração de sistemas no contexto militar, especialmente na Marinha dos EUA. Apesar de sua contribuição, o modelo apresenta algumas limitações que impactam sua aplicabilidade em um contexto mais genérico de SoS. Não é detalhado um método específico para a modelagem dos processos e interações, e também não são detalhadas as atividades específicas de cada fase, como levantamento de requisitos, projeto detalhado, implementação e teste. O artigo reconhece a importância da interoperabilidade, mas não detalha como ela é alcançada ou como os sistemas constituintes interagem entre si de forma específica. Embora seja mencionado que o SoS é formado por sistemas independentes, eles não detalham como a autonomia dos constituintes é mantida e gerenciada.

A metodologia de Baek et al.(9), por exemplo, propõe uma abordagem mais sistêmica, com foco no desenvolvimento iterativo e em um processo contínuo de coleta e análise de dados. Esse enfoque é uma melhoria significativa em relação ao modelo “Vee”, pois oferece um *framework* que pode ser adaptado de acordo com as necessidades específicas de cada fase do ciclo de vida do SoS, ao mesmo tempo em que garante a adaptação contínua a novas informações e requisitos. No entanto, não detalha a modelagem dos processos de negócio e fluxos de informação entre os sistemas constituintes. Também não detalha as atividades específicas de cada fase do ciclo de vida de um SoS e nem especifica um método para lidar com a complexidade da interação entre sistemas heterogêneos e autônomos em um SoS.

O metamodelo MeMSoS, desenvolvido por Dridi, Benzadri e Belala(10), apresenta uma abordagem robusta para modelagem de SoSs ao oferecer um *framework* que facilita a interoperabilidade e a reutilização de capacidades, funções e objetivos entre subsistemas. Embora o MeMSoS seja vantajoso por promover a interoperabilidade e a reutilização de componentes, ele apresenta algumas limitações relevantes quando comparado às necessidades específicas para a concepção de um SoS abrangente. Uma de suas limitações é a falta de um processo detalhado de desenvolvimento que inclua as etapas de análise de requisitos, design e implementação de um SoS. O MeMSoS concentra-se na descrição e organização dos elementos constitutivos do SoS, mas não oferece diretrizes metodológicas claras para conduzir a concepção de um SoS desde o levantamento dos requisitos até a implementação



final. Além disso, o MeMSoS foca principalmente na reutilização de subsistemas e em uma visão abstrata da interoperabilidade.

A abordagem de metamodelagem para SoS baseados em IoT proposta por Smaali e Boucebsi(11) apresenta algumas vantagens, especialmente em termos de flexibilidade, escalabilidade e interoperabilidade, que são essenciais para a integração de múltiplos sistemas heterogêneos. No entanto, a complexidade da configuração, a dependência de padrões e as limitações para gerenciar segurança e tempo real são desafios que devem ser considerados na escolha dessa metodologia para modelagem de um SoS. Apesar de fornecer uma estrutura modular e orientada a serviços, essa abordagem não apresenta um processo completo que cubra todas as etapas do ciclo de vida do sistema e os requisitos específicos de um SoS.

O estudo de Xue et al.(12) traz uma importante aplicação do AERSoS na gestão de emergências em incêndios florestais, utilizando modelos baseados no DoDAF para representar os pontos de vista operacional (OV) e de capacidade (CV) do sistema. No entanto, essa abordagem apresenta algumas limitações que dificultam sua aplicação em cenários mais abrangentes. O artigo não propõe um método para a concepção ou desenvolvimento do SoS, ele utiliza o DoDAF para representar o sistema já existente e documentar suas interações, hierarquias e dependências entre sistemas constituintes no cenário de combate a incêndios. Embora o uso de modelos OV permita visualizar aspectos operacionais e fluxos de recursos, esses modelos são focados na descrição do sistema e não na integração efetiva dos constituintes. Outra limitação é a ausência de um processo detalhado de entrada e saída de informações e requisitos, que são essenciais para a integração de sistemas constituintes em um SoS. Ele não detalha as especificidades da interoperabilidade entre os diferentes sistemas, nem as atividades específicas desses processos.

Embora o estudo de Paes et al.(24) apresente importantes desafios, há uma limitação significativa na falta um método consolidado para apoiar o desenvolvimento e evolução do SoS. O foco estava na interoperabilidade de sistemas militares existentes, com uma abordagem inicial de integração baseada em modelagem de processos e especificação de requisitos. Apesar de usar ferramentas como BPMN e UML, o trabalho enfrentou desafios com a falta de uma visão do SoS como um todo, limitando sua eficácia para capturar a complexidade de um SoS completo. Essa proposta detalha as interações entre os sistemas utilizando linguagens de especificação, para capturar a complexidade e a dinâmica do SoS. O planejamento das operações e a validação dos sistemas no SisGAAz foram realizados de forma parcial, sem uma metodologia sistemática que cobrisse todas as etapas do desenvolvimento.

O plano de pesquisa proposto por Cook e Pratt(57) apresenta uma abordagem interessante e estruturada para investigar desafios e metodologias no contexto de defesa, particularmente com relação ao desenvolvimento de capacidades de SoS para a defesa

australiana. Embora apresente uma estrutura abrangente, possui algumas limitações. O trabalho não apresenta um processo sistemático de desenvolvimento de SoS que abranja desde sua especificação até a sua implementação. Além disso, o método se concentra na análise de abordagens globais e na identificação de desafios através de entrevistas e *workshops*. Embora essa fase permita uma compreensão aprofundada dos desafios de interoperabilidade e integração, não oferece um modelo claro e replicável para a concepção e desenvolvimento prático de um SoS.

Este capítulo trouxe uma análise das abordagens e metodologias existentes no desenvolvimento e integração de SoS, incluindo iniciativas de interoperabilidade e resiliência em contextos militares e de defesa. São apresentados métodos como o “Vee” para Engenharia e Integração de SoS (8), MBSOSE para apoiar a engenharia de SoS em diferentes domínios (9), o modelo conceitual de interoperabilidade para Sistemas de Informação (SoIS) (7), criação de links de interoperabilidade para compor um Sistema de Sistemas de Informação (SoIS) (6) e o metamodelo MeMSoS (10), que abordam, respectivamente, a organização do processo de desenvolvimento, modelagem baseada em simulação, a identificação de fatores críticos para integração, abordagem prática para identificação e padronização de pontos de interoperabilidade e a reutilização de subsistemas para reduzir custos. Adicionalmente, o capítulo explora abordagens voltadas à defesa nacional, que detalha um plano de adaptação de metodologias globais para as particularidades australianas (57), o SisGAz, que integra sistemas de comando e controle da Marinha do Brasil com foco em interoperabilidade (24) e os modelos operacionais de AERSoS aplicados à gestão de emergências, enfatizando a visualização de interações e hierarquias de sistemas em diferentes pontos de vista (12). Em um contexto de interoperabilidade orientada a IoT, é apresentada uma metamodelagem para SoS, focando na flexibilidade e escalabilidade para incorporar novos dispositivos (11). Cada abordagem revisada é analisada em relação às limitações e desafios que apresenta, especialmente no que se refere à falta de uma metodologia que consiga abranger todo o ciclo de vida da concepção do SoS (modelagem completa), desde a especificação até a implementação e testes, e aos requisitos essenciais para os sistemas.

Assim, a revisão conduzida fornece uma base sólida para a justificativa da metodologia proposta neste trabalho, que busca suprir essas lacunas desenvolvendo um método completo e estruturado que abranja todas as etapas do processo de concepção, considerando as particularidades de um SoS, como a necessidade de interoperabilidade. Na sequência será apresentada a nossa proposta de método para esta modelagem, que busca cobrir as características apresentadas na Tabela 3, que evidencia as lacunas existentes nos trabalhos relacionados apresentados neste capítulo.

Ref.	Cobertura dos trabalhos relacionados								
	(6)	(7)	(12)	(24)	(9)	(57)	(10)	(11)	(8)
Mapeamento entradas e saídas	X								
Fluxos com interações			X	X				X	
Modelagem completa do SoS									
Estudo de caso detalhado			X	X				X	

Tabela 3 – Cobertura dos Trabalhos Relacionados

## 4 PROJETO DE PESQUISA

Ao longo deste capítulo serão apresentados:

- **Problema de Pesquisa:** Os SoS são cada vez mais relevantes por integrarem sistemas independentes para atingir objetivos complexos. No entanto, sua modelagem e concepção ainda enfrentam desafios devido à heterogeneidade dos componentes, dificultando a interoperabilidade, a coordenação e a comunicação. Embora a pesquisa na área tenha avançado, ainda há lacunas, como a ausência de métodos práticos e detalhados para integração eficiente, especialmente em cenários dinâmicos. Além disso, questões como resiliência e continuidade operacional são pouco abordadas. Diante disso, propõe-se o desenvolvimento de um método estruturado que combine linguagens de modelagem para descrever a interação entre sistemas constituintes, visando garantir a interoperabilidade de modo a superar as limitações dos métodos atuais.
- **Objetivos:** Propor um método que oriente as fases e tarefas necessárias para a concepção e implementação de um SoS. Este método deve ser capaz de integrar sistemas já existentes, abordando os desafios de interoperabilidade e cooperação entre eles. Deverá adaptar as fases genéricas do ciclo de vida de desenvolvimento de software (análise, design, implementação e teste) para obter a modelagem completa do SoS.
- **Metodologia de Pesquisa:** A metodologia de pesquisa é estruturada e sistemática, combinando a revisão da literatura com o desenvolvimento de um novo método e sua validação através de um estudo de caso.
- **Plano de Trabalho:** Compreende as etapas e cronograma previstos para a execução do estudo. O plano encontra-se detalhado na Seção 6.2.
- **Contribuição Esperada:** A contribuição esperada desta pesquisa é focada em um entregável que visa avançar o conhecimento e a prática na área de SoS. Em primeiro lugar, este estudo resultará em um método que permite a concepção de um SoS a partir de sistemas existentes, abordando as questões de integração e interoperabilidade entre constituintes independentes. O método é pautado em princípios da engenharia de sistemas e adaptado para cenários complexos, onde os constituintes não foram originalmente projetados para trabalhar juntos. Além disso, serão produzidos artefatos e especificações detalhadas que guiarão o processo de integração. Esses artefatos incluem diagramas de arquitetura e fluxos que ilustram como os componentes de um SoS podem ser coordenados para alcançar a interoperabilidade.

## 4.1 Problema de Pesquisa

SoS têm se mostrado cada vez mais relevantes em diversos setores devido à sua capacidade de integrar sistemas independentes para alcançar objetivos complexos. No entanto, a modelagem e concepção de SoS eficientes ainda representam um desafio, devido à complexidade inerente a esses sistemas, formados por componentes heterogêneos, com diferentes arquiteturas, protocolos e funcionalidades. Essa heterogeneidade dificulta a coordenação, a comunicação e a troca de informações entre os sistemas, comprometendo o desempenho geral do SoS.

Apesar do crescente número de pesquisas sobre SoS, a área de modelagem e concepção ainda apresenta lacunas significativas. Muitos trabalhos abordam a importância da interoperabilidade e integração, mas poucos oferecem métodos práticos e detalhados para alcançar esses objetivos, principalmente em cenários dinâmicos e complexos. Os métodos existentes frequentemente apresentam limitações, como a falta de um processo de desenvolvimento completo, a dificuldade em lidar com a dinâmica dos SoS, a ausência de um mapeamento detalhado das entradas e saídas dos sistemas constituintes ou a falta de uma visão estruturada do SoS como um todo. Além disso, a maioria dos trabalhos não aborda de forma adequada a continuidade operacional dos SoS. Em particular, a interoperabilidade, apesar de ser um problema bem definido na literatura, continua sendo um desafio na prática.

Diante deste contexto, surge a necessidade de um método de modelagem e concepção de SoS que seja abrangente, detalhado, estruturado e que considere as particularidades dos SoS, como a sua complexidade, a necessidade de interoperabilidade, a heterogeneidade dos sistemas e o comportamento emergente. Assim, a presente proposta busca responder à seguinte questão: Como desenvolver um método que permita a modelagem e concepção de um SoS, através da combinação de linguagens de modelagem, para descrever a interação e cooperação entre os sistemas constituintes, buscando a interoperabilidade do SoS? Para isso, propõe-se o desenvolvimento de um método que supere as limitações dos métodos existentes, abordando as lacunas identificadas na literatura, e que vise a integração de sistemas heterogêneos, resultando na interoperabilidade do SoS.

A pesquisa se concentra em investigar os seguintes aspectos:

- **Cooperação entre organizações e *stakeholders*:** Um SoS envolve múltiplas entidades com interesses diversos, o que torna a colaboração entre essas partes um desafio significativo. Como as partes envolvidas podem ter diferentes objetivos, estruturas organizacionais e requisitos, o desenvolvimento do SoS requer uma análise profunda das formas de garantir a cooperação entre todos os envolvidos.
- **Design de Funcionalidades Emergentes:** SoSs apresentam funcionalidades que

não são previstas em seus componentes individuais, ou seja, funcionalidades emergentes. Essas funcionalidades podem surgir do comportamento coletivo dos componentes e exigem uma abordagem nova de design que considere essas interações dinâmicas e imprevistas.

- **Escolha e Coordenação de Constituintes:** A seleção dos sistemas constituintes e sua coordenação é um desafio, uma vez que os constituintes podem ser sistemas legados ou heterogêneos. Além disso, como esses componentes precisam interagir, a pesquisa deve abordar a maneira de definir padrões de integração, gerenciar dependências e garantir a compatibilidade entre os constituintes.
- **Confiabilidade e Desempenho:** Sabendo que um SoS pode ser formado por constituintes com diferentes níveis de confiabilidade e desempenho, uma questão seria como equilibrar esses aspectos sem comprometer o funcionamento geral do SoS.
- **Imaturidade da Área de SoS:** O trabalho reconhece que muitos desses desafios são reflexos da imaturidade da área de SoS, o que implica que ainda há muitos aspectos não resolvidos ou mal compreendidos no desenvolvimento de tais sistemas. Nessa pesquisa investigamos como superar essas limitações, propondo um novo método que ajuda na concepção de um SoS.

## 4.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa consiste na validação através de um estudo de caso de um método que oriente as fases e tarefas necessárias para o desenvolvimento de um SoS. O método proposto adapta as fases genéricas do ciclo de vida de desenvolvimento de software (análise, design, implementação e teste) para estruturar e organizar um processo completo para a concepção e implementação de SoS.

1. Estudo de caso para validar o método proposto

## 4.3 Metodologia de Pesquisa

Nesta seção é apresentada a abordagem metodológica adotada para conduzir a pesquisa. O objetivo é detalhar as etapas e estratégias utilizadas, assegurando a coleta e análise de dados de forma coerente com os objetivos propostos. A metodologia foi estruturada para proporcionar uma compreensão abrangente do problema, permitindo assim que os resultados obtidos sejam relevantes para o estudo. A Figura 15 apresenta a metodologia de pesquisa utilizada neste trabalho.

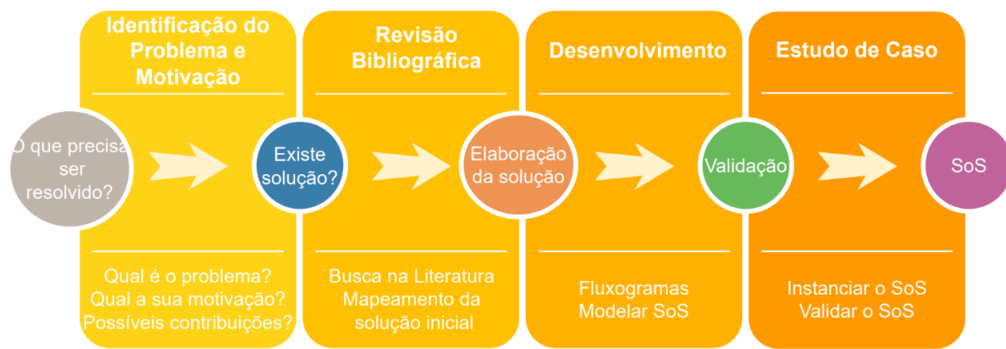


Figura 15 – Metodologia de Pesquisa

- **Identificação e Motivação do Problema:** No contexto desta pesquisa, a necessidade de aprimorar a interoperabilidade em SoS surge como um desafio. A complexidade desses sistemas, composta por múltiplos constituintes operando de forma independente, demanda uma integração eficiente. A falta de uma metodologia estruturada dificulta a cooperação entre os constituintes e compromete a capacidade operacional do SoS como um todo. Sem uma abordagem clara para representar e organizar a interação entre constituintes, há riscos de inconsistências na comunicação, dificuldades na coordenação de operações e falhas no compartilhamento de informações.
- **Revisão Bibliográfica:** Foi realizado um levantamento bibliográfico na base de dados *Scopus*, uma das mais abrangentes para publicações científicas. Foram definidos critérios de busca baseados em palavras-chave relacionadas a Sistemas de Sistemas (SoS), e aplicados filtros para selecionar apenas artigos revisados por pares, publicados em conferências e periódicos de alto impacto nos últimos anos, e priorizando estudos que apresentassem abordagens metodológicas ou aplicadas sobre modelagem e concepção de um SoS.
- **Desenvolvimento:** Foi realizado através de uma metodologia estruturada, que envolveu várias etapas, desde a Definição do Problema de Pesquisa até o Projeto SoS, tipicamente federado, onde foram especificadas as interações entre os Constituintes.
- **Estudo de Caso:** Para validar o método, foi realizado um estudo de caso. Esse estudo envolveu a modelagem do processo com BPMN e um diagrama de sequência para mapear o fluxo da operação. O método foi instanciado no estudo de caso, adaptando as etapas e atividades para as particularidades do cenário escolhido.

## 4.4 Visão Geral da Proposta

O problema de pesquisa está centrado na necessidade de integrar diferentes sistemas, garantindo que eles possam operar de maneira coordenada, compartilhando informações em tempo real e adaptando-se a diferentes situações. O método proposto, apresentado na Figura 16 busca permitir a comunicação e a troca de informações em tempo real entre diferentes constituintes, buscando permitir uma melhoria na comunicação em processos de tomada de decisão.

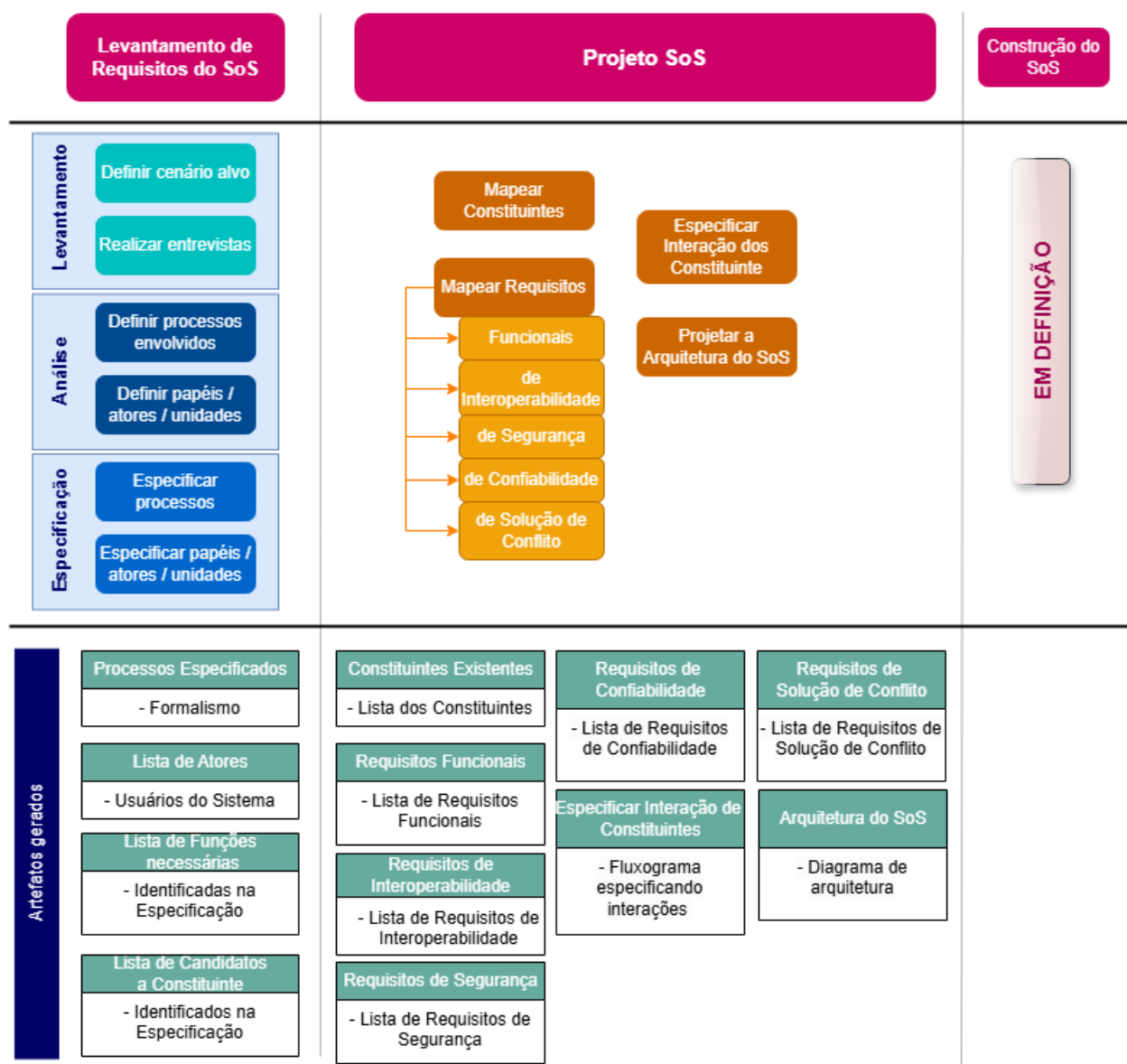


Figura 16 – Método para modelagem e concepção de um SoS

O método contempla três fases necessárias, detalhadas na sequência.



#### 4.4.1 Levantamento de Requisitos do SoS

O levantamento de requisitos em Sistemas de Sistemas (SoS) envolve uma sequência de atividades que garantem a coleta, análise, definição e validação de requisitos de maneira eficiente, considerando a complexidade e a natureza interdependente dos sistemas envolvidos.

- **Definir cenário alvo:** Estabelecer um cenário alvo envolve algumas tarefas que buscam garantir que a comunicação, a coordenação e a gestão dos recursos atendam as expectativas de maneira adequada. É necessário definir claramente os objetivos, determinando as partes envolvidas assim como quais recursos serão necessários para a missão.
  - Estabelecer a finalidade do SoS no contexto do cenário (definir o objetivo do cenário alvo)
  - Delimitar o escopo do cenário (sua abrangência e limitações)
- **Realizar entrevistas:** No processo de concepção de um SoS, os entrevistados devem incluir uma variedade de perfis. Em particular, é fundamental envolver a equipe de desenvolvimento dos sistemas candidatos a integrar o SoS, assim como os diferentes tipos de usuários que utilizam esses sistemas. Muitas informações importantes são obtidas através da experiência desses profissionais, e dificilmente são encontradas nas leituras dos documentos. Duas tarefas precisam ser mapeadas nesta atividade:
  - Definir os especialistas (escolher os mais relevantes, em diferentes perspectivas, indo da parte técnica até a organizacional)
  - Elaborar roteiro de entrevista (pode ser através de um questionário). O roteiro é necessário para que a entrevista seja objetiva. Preferencialmente, o entrevistador precisa ter um conhecimento considerável sobre o material que descreve o cenário e sobre os manuais dos sistemas em uso, para poder ser objetivo com os entrevistados.
- **Definir processos envolvidos:** É uma tarefa em que identificam-se os processos que devem ser detalhados, buscando ficar dentro do escopo definido anteriormente.
  - Analisar processos atuais nos sistemas individuais (como cada sistema opera atualmente)
  - Elencar o material específico sobre cada processo
  - Realizar entrevistas e coletar experiências com a equipe que executa ou participa do processo

- **Definir papéis/atores/unidades:** Para cada processo identificado é necessário definir o papel de cada ator, estabelecendo sua função e responsabilidade.
  - Listar os principais atores e unidades envolvidas (identificando todos os sistemas, organizações e indivíduos que interagem direta ou indiretamente com o SoS)
  - Definir os papéis (mapear as funções principais que cada papel/ator ou unidade desempenha no contexto do SoS)
- **Especificar processos:** busca detalhar as atividades e a interdependência entre elas.
  - Mapear as interações (detalhar como os atores/papéis se conectam e colaboram entre si dentro do SoS, gerando um fluxo de troca de informações)
- **Especificar papéis/atores/unidades:** atividade que compreende uma definição de hierarquias e responsabilidades necessárias ao funcionamento do SoS.
  - Descrever responsabilidades de cada papel (detalhar as atribuições específicas de cada ator ou unidade)
  - Definir hierarquias ou níveis de autoridade (estabelecer uma estrutura hierárquica ou funcional para indicar como os papéis se relacionam em termos de supervisão e execução)

Os artefatos gerados nesta fase incluem:

- Processos especificados expressos em algum formalismo;
- Lista de atores (usuários do sistema);
- Lista de funções necessárias;
- Lista de candidatos a constituintes.

#### 4.4.2 Projeto SoS

Fase fundamental para garantir que o sistema seja projetado de modo a atender aos requisitos do SoS. Consiste em um processo complexo, que envolve a criação de uma arquitetura capaz de integrar diferentes sistemas independentes, atendendo a requisitos técnicos e operacionais, além de garantir a interoperabilidade e a capacidade de evoluir conforme as necessidades.

- **Mapear Constituintes:** Tem como objetivo determinar quais sistemas individuais (ou subsistemas) farão parte do SoS, classificando os possíveis constituintes de acordo

com suas funcionalidades e como eles se inter-relacionam para atingir os objetivos do SoS.

- Identificar constituintes (todos os sistemas ou subsistemas disponíveis que podem ser considerados constituintes do SoS)
  - Mapear as funcionalidades principais de cada sistema (descrever brevemente as capacidades e limitações de cada um)
  - Definir o papel de cada constituinte no contexto do SoS e como ele contribui para os objetivos gerais.
  - Estabelecer fluxos de comunicação e troca de informações (criar diagramas ou fluxogramas que representem as interações entre os sistemas)
  - Representar graficamente o SoS (desenvolver um diagrama de alto nível que mostre todos os constituintes e as interações entre eles)
- **Mapear Requisitos Funcionais:** São especificações que descrevem as funcionalidades ou capacidades essenciais que o SoS deve realizar para cumprir sua missão ou atender aos objetivos esperados. Definem o que o SoS precisa fazer para que os sistemas constituintes, quando integrados, possam colaborar e realizar as operações desejadas de maneira coordenada. Esses requisitos vão além das funcionalidades individuais de cada sistema constituinte, focando nas ações que o SoS como um todo deve realizar.
    - Listar funcionalidades gerais do SoS (criar uma lista das capacidades esperadas para o SoS como um todo, incluindo ações que exigem a colaboração entre os constituintes)
    - Detalhar os requisitos funcionais, respondendo a questões como: (i) O que o SoS deve fazer? (ii) Como as funcionalidades serão realizadas em colaboração entre os constituintes? (iii) Quais entradas e saídas são necessárias para cada funcionalidade?
- **Mapear Requisitos de Interoperabilidade:** Buscar a interoperabilidade significa permitir que os sistemas constituintes do SoS possam interagir de maneira eficiente e sem falhas, independentemente de suas diferenças tecnológicas.
    - Revisar as interações esperadas no SoS (mapear os pontos de integração onde a interoperabilidade será essencial)
    - Analisar as características dos sistemas constituintes (listar protocolos, arquiteturas e formatos de dados usados por cada constituinte, assim como identificar possíveis incompatibilidades técnicas entre eles)
    - Especificar os padrões de interoperabilidade (ex. protocolos de comunicação, formatos de dados comuns).

- Definir mecanismos de compatibilidade técnica (propor métodos para converter dados entre sistemas com tecnologias ou protocolos diferentes)
- Criar uma matriz de interoperabilidade (organizar os requisitos em uma tabela que relacione: (i) constituintes envolvidos; (ii) padrões e protocolos utilizados; (iii) pontos críticos de interoperabilidade)
- Desenvolver diagramas de interação (representando visualmente como os constituintes se conectam e trocam informações)
- **Mapear Requisitos de Segurança:** Definir como os dados serão protegidos, visando garantir sua integridade.
  - Analisar os objetivos e cenários do SoS relacionados à segurança (identificar os tipos de informações sensíveis trocadas no SoS)
  - Definir requisitos de confidencialidade (estabelecer permissão de acesso e mecanismos de autenticação/autorização, assegurando que apenas os usuários autorizados possam acessar determinadas informações ou executar algumas ações)
- **Mapear Requisitos de Confiabilidade:** Planejar como o SoS responderá a falhas, assegurando que seja robusto e confiável, e também atendendo aos requisitos de disponibilidade e resiliência.
  - Estabelecer requisitos de disponibilidade (constituintes devem ter acesso contínuo e confiável às informações, mesmo em cenários adversos)
  - Definir requisitos de resiliência (propor medidas de contenção para evitar propagação de falhas que comprometam o SoS como um todo)
- **Mapear Requisitos de Solução de Conflito:** Resolver conflitos que possam surgir entre os sistemas constituintes, seja no nível de dados, processos ou interação. Envolve especificar como conflitos serão resolvidos, seja em relação ao compartilhamento de recursos ou prioridades de execução.
  - Identificar os tipos de conflitos no SoS (que podem ser: (i) Conflitos de dados: inconsistências, redundâncias ou falta de padronização; (ii) Conflitos de recursos: disputas por acesso a recursos compartilhados, por exemplo, rede, energia, armazenamento; (iii) Conflitos de processos: sobreposição de funcionalidades)
  - Estabelecer regras para resolução de conflitos de dados (definindo critérios de prioridade para dados conflitantes, como por exemplo, fonte mais confiável, *timestamp* mais recente).
  - Estabelecer políticas para alocação de recursos (propor métodos de escalonamento ou redistribuição de recursos quando necessário)

- Definir mecanismos para resolução de conflitos de processos (determinando um fluxo de decisão para situações em que processos sobrepostos precisam ser priorizados)
- Definir tratamento de exceção, para garantir a continuidade e a confiabilidade das operações (exceções podem ocorrer em várias formas, como falhas de comunicação, erros de dados, falhas de componentes, ou violações de segurança. O tratamento de exceção em SoS refere-se ao conjunto de procedimentos e mecanismos implementados para detectar, isolar, resolver e, se necessário, mitigar os impactos de falhas e erros. Estes procedimentos são necessários para que o SoS possa continuar a operar mesmo na presença de problemas, minimizando a interrupção dos serviços)
- **Especificar Interação dos Constituintes:** Detalhar como os sistemas constituintes irão interagir uns com os outros para alcançar os objetivos do SoS.
  - Identificar os pontos de interação entre os constituintes (mapear quais sistemas precisam se comunicar diretamente, especificando dados a serem enviados e recebidos)
  - Desenvolver diagramas de fluxo de comunicação (representar visualmente os fluxos de dados entre os constituintes, quem envia o quê e para quem)
  - Especificar protocolos de comunicação adequados (definir quais protocolos serão usados nas interações)
  - Definir formatos padrão para mensagens (garantir que os formatos atendam às necessidades dos constituintes e do SoS como um todo)
  - Definir requisitos de desempenho para interações (especificar limites de tempo para envio e resposta de mensagens, assim como determinar requisitos de largura de banda e capacidade de processamento)
  - Criar uma matriz de interação (onde são listados os constituintes e detalhados:
    - (i) Quem interage com quem;
    - (ii) Tipos de mensagens trocadas;
    - (iii) Protocolos e formatos usados)
- **Projetar a Arquitetura do SoS:** Projetar uma arquitetura que assegure o atendimento de todos os requisitos de segurança, interoperabilidade, confiabilidade e interação necessários para o funcionamento do SoS.
  - Criar um diagrama inicial da arquitetura (representando os sistemas constituintes, suas conexões e interações principais)

Os artefatos gerados são:

- Lista de Constituintes;
- Lista de Requisitos Funcionais;
- Lista de Requisitos de Interoperabilidade;
- Lista de Requisitos de Segurança;
- Fluxograma especificando interações entre constituintes;
- Diagrama inicial da arquitetura.

Cada constituinte em um SoS pode ser projetado para atender a requisitos específicos e operacionais distintos, de acordo com seu contexto ou domínio. A autonomia permite que esses sistemas sejam mantidos e evoluídos de forma independente, sem que mudanças em um constituinte necessariamente afete os outros. Ter autonomia contribui para a resiliência de todo o SoS, pois se um constituinte falhar ou estiver indisponível, os outros podem continuar a operar sem grandes interrupções, garantindo a continuidade das operações. A autonomia também permite que cada constituinte evolua e se atualize sem depender de outros, o que facilita, por exemplo, a incorporação de novos recursos sem causar impacto direto nos demais dentro do SoS.

A autonomia dos constituintes permite sua flexibilidade, resiliência e escalabilidade, mesmo em cenários complexos e dinâmicos. Ela permite que cada sistema funcione de maneira independente, mantendo suas características e capacidades, enquanto ainda contribui para os objetivos globais do SoS. Nesse contexto, a abordagem federada se destaca como uma metodologia eficaz, permitindo que cada constituinte mantenha sua autonomia e flexibilidade, operando de forma independente, mas colaborando dentro do SoS.

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 Estudo de Caso: Pedido de Tiro

A modelagem de um Sistema de Sistemas (SoS) no contexto militar envolve a integração de diversos sistemas independentes (constituintes) para alcançar capacidades que superam a soma de suas partes individuais. No contexto da Brigada de Infantaria Blindada, os Grupos de Artilharia de Campanha (GAC) atuam na prestação de apoio de fogo às unidades apoiadas. Elaboram seus planos de fogos com base nas necessidades e pedidos das unidades. Esses pedidos podem ser oriundos do comando da brigada, dos meios de busca de alvos da brigada ou de outras fontes.

A pesquisa deve mapear os links de interoperabilidade e buscar soluções para que a comunicação e a cooperação entre a FAC2FTer e o Gênesis aconteça em tempo real. Com isso será possível garantir uma coordenação mais eficiente e precisa dos fogos de artilharia em apoio às operações da Brigada de Infantaria Blindada. Esse estudo de caso foi modelado utilizando inicialmente um BPMN para desenhar o processo com suas interações, e um diagrama de sequência para mapear o fluxo da operação.

#### 5.1.1 Planejamento da Operação e o Pedido de Tiro

O pedido de tiro em operações de apoio de fogo é um processo dinâmico, que pode ser iniciado tanto por planejamento prévio quanto por um Observador Avançado em tempo real na missão. Durante a fase de planejamento, o Comandando e seu Estado-Maior identificam alvos que precisam ser abatidos para alcançar os objetivos estratégicos. Com base nesses alvos, são elaborados pedidos de tiro com maior detalhamento, como coordenadas precisas do alvo, descrição do tipo e tamanho do alvo.

Nosso estudo de caso inicia com o processo de planejamento de pedido de tiro partindo do Posto de Comando da Brigada (PC da Brigada), através do CCAF (Centro de Coordenação de Apoio de Fogo). O CCAF é responsável por coordenar o apoio de fogo sobre alvos terrestres junto ao PC da Brigada. Está localizado dentro do próprio PC da Brigada, e com isso mantém estreita ligação com o Estado-Maior de Operações (E3). Sua estrutura é composta pelos seguintes elementos: o Adjunto do Comandante de Artilharia de Campanha (O Lig Art), pessoal encarregado de conduzir as operações, equipe de análise de alvos e equipe de informações sobre alvos.

Suas principais atribuições incluem:

- Estar sempre atualizado quanto a situação e capacidade de apoio de fogo

- Coordenar o apoio de fogo contra alvos terrestres através das seguintes atividades:
  - preparar Planos Provisórios de Apoio de Artilharia (PPAA);
  - elaborar o Plano de Apoio de Fogo (PAF) da Brigada, integrando todos os planos específicos de fogo (artilharia, aéreo, naval, etc.);
  - propor medidas de coordenação necessárias para o apoio de fogo;
  - analisar os pedidos de apoio de fogo encaminhados pelos escalões subordinados à Central de Tiro (C Tir) do GAC;
  - solicitar apoio de fogo à manobra da Brigada quando necessário;
  - assessorar o comandante na formulação de suas diretrizes de fogo.

A Figura 17 apresenta o pedido de tiro a partir do planejamento no PC da Brigada. O CCAF recebe o PAF (Planejamento de Apoio de Fogo) elaborado pelo Coordenador do Apoio de Fogo (CAF) da Divisão do Exército (DE), onde consta a coordenação e a integração dos fogos com a manobra. Então extrai todas as informações necessárias para realizar esse apoio. A partir dessa análise, elabora o PPAA (Plano Provisório de Apoio de Artilharia). Dependendo do tempo disponível para o planejamento de fogos, o PPAA será produto de vários planos provisórios, oriundos dos CAF nos diversos escalões. O PPAA é apresentado à C Tir sob a forma de calco, no qual consta uma lista de alvos para aprovação.

A C Tir, que funciona no PC do GAC, recebe então o PPAA e elabora o PFA (Plano de Fogo da Artilharia), antes do início da operação. Esse plano é projetado para ser simples e flexível, focando principalmente nos alvos críticos que influenciam diretamente a manobra das forças envolvidas. Durante a elaboração do PFA, é importante manter uma coordenação com outras partes, como por exemplo a artilharia dos escalões superiores, vizinhos e subordinados. O PFA é expedido como apêndice ao PAF, e normalmente constituído de uma parte escrita, uma lista de alvos, um calco de alvos e uma ou mais tabelas de apoio de fogo de artilharia.

O PFA é enviado ao CCAF e segue para aprovação. Caso aprovado, é distribuído em cópias aos O Lig Art nos CCAF das Unidades (no exemplo, o Batalhão) que, de posse do plano, comparam o PFA com o PPAA (caso tenha sido elaborado anteriormente por seu O Lig), verificando se houve cancelamento, inclusão ou renumeração de alvos. Caso não obtenha aprovação, retorna a C Tir para realizar novos ajustes.

Na Figura 17, a tarefa Elaborar PFA é marcada como um subprocesso. Essa marcação significa que outros processos fazem parte dessa atividade. A Figura 18 na sequência apresenta o processo de elaboração do PFA.

Conforme ilustrado na Figura 18, o processo de elaboração do PFA é composto por várias etapas. Inicialmente, há o posicionamento das unidades de tiro, a elaboração da lista



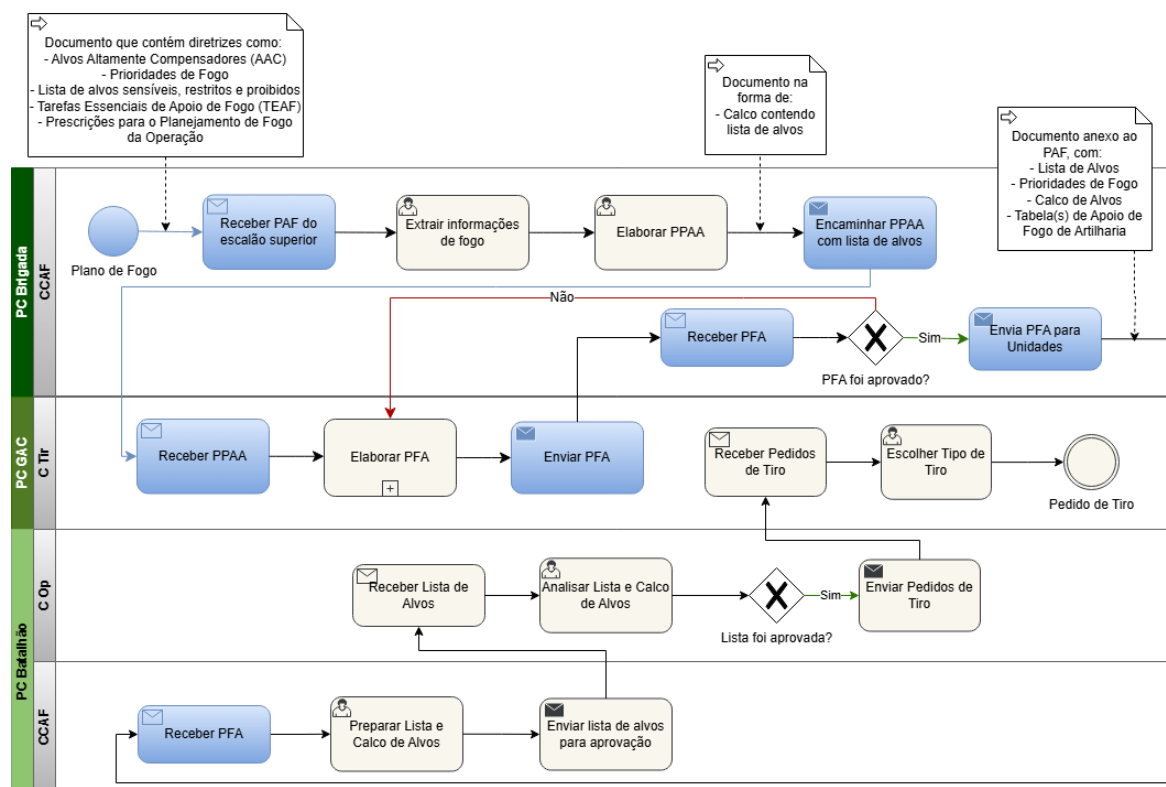


Figura 17 – Planejamento do Pedido de Tiro no PC da Brigada

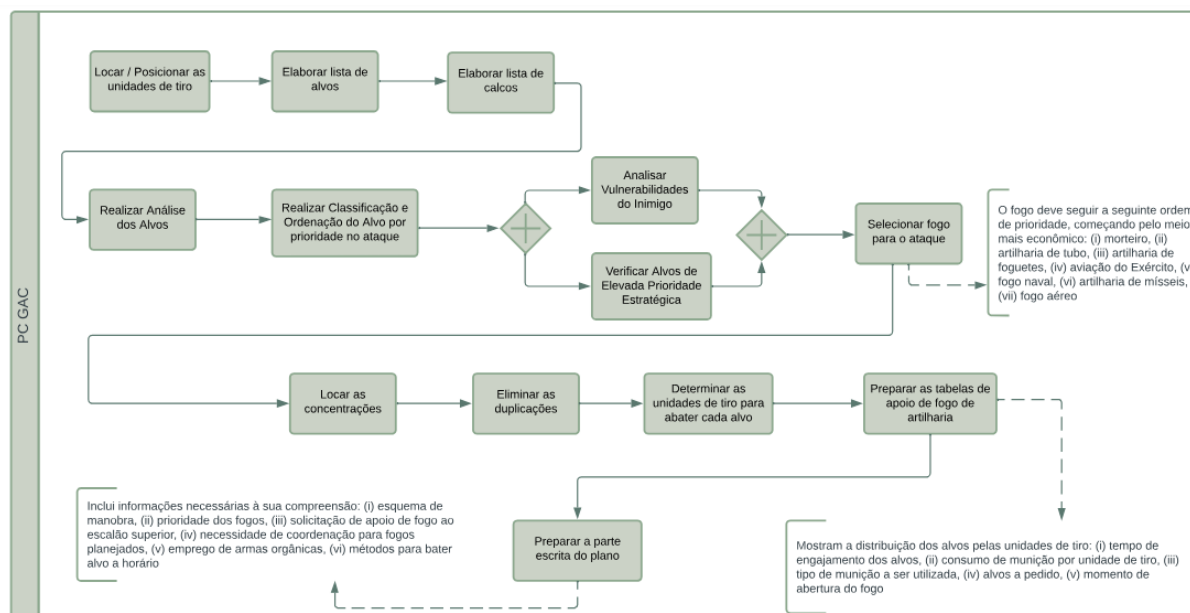


Figura 18 – Composição do PFA

de alvos e a preparação dos calcos, seguida pela análise detalhada desses alvos previamente identificados. Após essa análise, os alvos são classificados e ordenados de acordo com sua prioridade para o ataque. Em seguida, são examinadas as vulnerabilidades do inimigo,

verificando especialmente os alvos de alta prioridade estratégica. O fogo para o ataque é então selecionado seguindo uma ordem de prioridade estabelecida, começando pelo meio mais econômico: (i) morteiro, (ii) artilharia de tubo, (iii) artilharia de foguetes, (iv) aviação do exército, (v) fogo naval, (vi) artilharia de mísseis, (vii) fogo aéreo. Após a seleção inicial, são posicionadas as concentrações de fogo, eliminando duplicações desnecessárias.

Posteriormente, são determinadas as unidades de tiro responsáveis por engajar cada alvo, preparando-se assim as tabelas de apoio de fogo de artilharia. Estas tabelas detalham a distribuição dos alvos entre as unidades de tiro, incluindo informações como: (i) tempo estimado de engajamento dos alvos, (ii) consumo previsto de munição por unidade de tiro, (iii) tipo específico de munição a ser utilizada, (iv) alvos solicitados, e (v) momento planejado para iniciar o fogo. Finalmente, a parte escrita do plano é elaborada com informações essenciais para sua compreensão completa, abordando aspectos como: (i) esquema de manobra das tropas, (ii) priorização dos fogos de artilharia, (iii) solicitação de apoio de fogo ao escalão superior, (iv) necessidade de coordenação para fogos planejados, (v) utilização de armas orgânicas disponíveis, e (vi) métodos recomendados para neutralizar cada alvo no tempo previsto.

Em resumo, o PFA que é distribuído após aprovação é um documento constituído por uma parte escrita, uma lista de alvos, um calco de alvos e uma ou mais tabelas de apoio de fogo. A parte escrita é básica, e contém informações sobre o esquema de manobra, a prioridade de fogos, solicitações de apoio de fogo ao escalão superior e métodos para abater alvos (incluindo tipo de munição).

A lista de alvos compreende um compilado das concentrações planejadas para apoiar uma operação, fornecendo detalhes a respeito de cada alvo. Já o calco de alvos é uma representação gráfica da lista de alvos, servindo para complementá-la. E as tabelas de apoio de fogo de artilharia mostram a distribuição dos alvos pelas unidades de tiro.

Após receber o PFA, o CCAF do Batalhão prepara lista de calcos e de alvos e envia para aprovação no Centro de Operações (C Op) do Batalhão. A lista será analisada, e caso aprovada, poderá então ser enviado os Pedidos de Tiro para a C Tir. Esta recebe os pedidos, escolhe o tipo de tiro adequado e então, emite o Pedido de Tiro. Este pedido é marcado como evento (com um círculo no diagrama), pois marca uma etapa se inicia em outro fluxograma.

### 5.1.2 O Pedido de Tiro

O processo de Pedido de Tiro, ao sair do C Tir, é disparado com uma emissão de Ordem de Tiro para a Bateria de Obuseiro. A ordem de tiro contém todas as informações necessárias para a execução do fogo. A Coordenação da Bia Obuses recebe essa ordem de tiro e verifica, para possíveis ajustes. Então, envia os ajustes para a C Tir, que analisa e

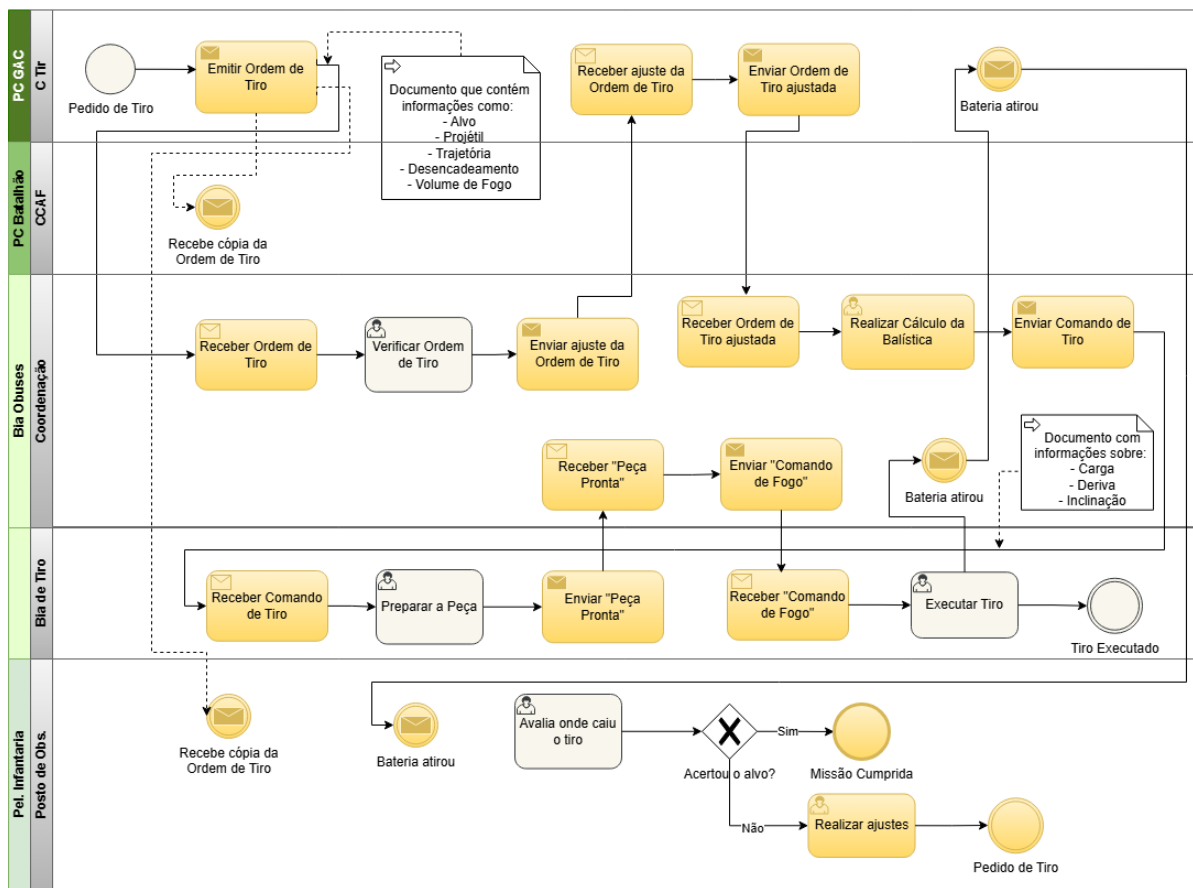


Figura 19 – Pedido de Tiro

devolve essa ordem de tiro já ajustada. Após o recebimento, o CLF realiza o cálculo da Balística e na sequência envia o Comando de Tiro para a Bateria de Tiro. De posse do Comando, a Bia de Tiro prepara a peça e sinaliza para a Coordenação que a peça está pronta. Ao receber, a coordenação envia o comando de fogo para a Bia de Tiro, que executa. Uma comunicação é enviada à coordenação, à C Tir e ao Posto de Observação, que vai avaliar se o alvo foi atingido. Caso positivo, dispara a mensagem "Missão Cumprida" e o processo se encerra. Caso contrário, o posto de observação realiza os ajustes necessários e é feito um novo pedido de tiro, desta vez partindo do posto na pessoa do Observador Avançado (OA). A Figura 19 ilustra esse processo.

### 5.1.3 O Pedido de Tiro partindo do Observador Avançado

O OA tem a função de identificar e comunicar a localização precisa de alvos inimigos. Para isso, fica posicionado em locais estratégicos próximos à linha de frente em uma missão. O processo de pedido de tiro começa com a detecção e confirmação de um alvo pelo OA. Utilizando binóculos, equipamentos de visão noturna ou outros dispositivos de observação, o OA identifica as coordenadas do alvo e avalia sua natureza e importância tática. Em seguida, transmite essas informações ao Oficial de Ligação (O Lig), que está alocado no

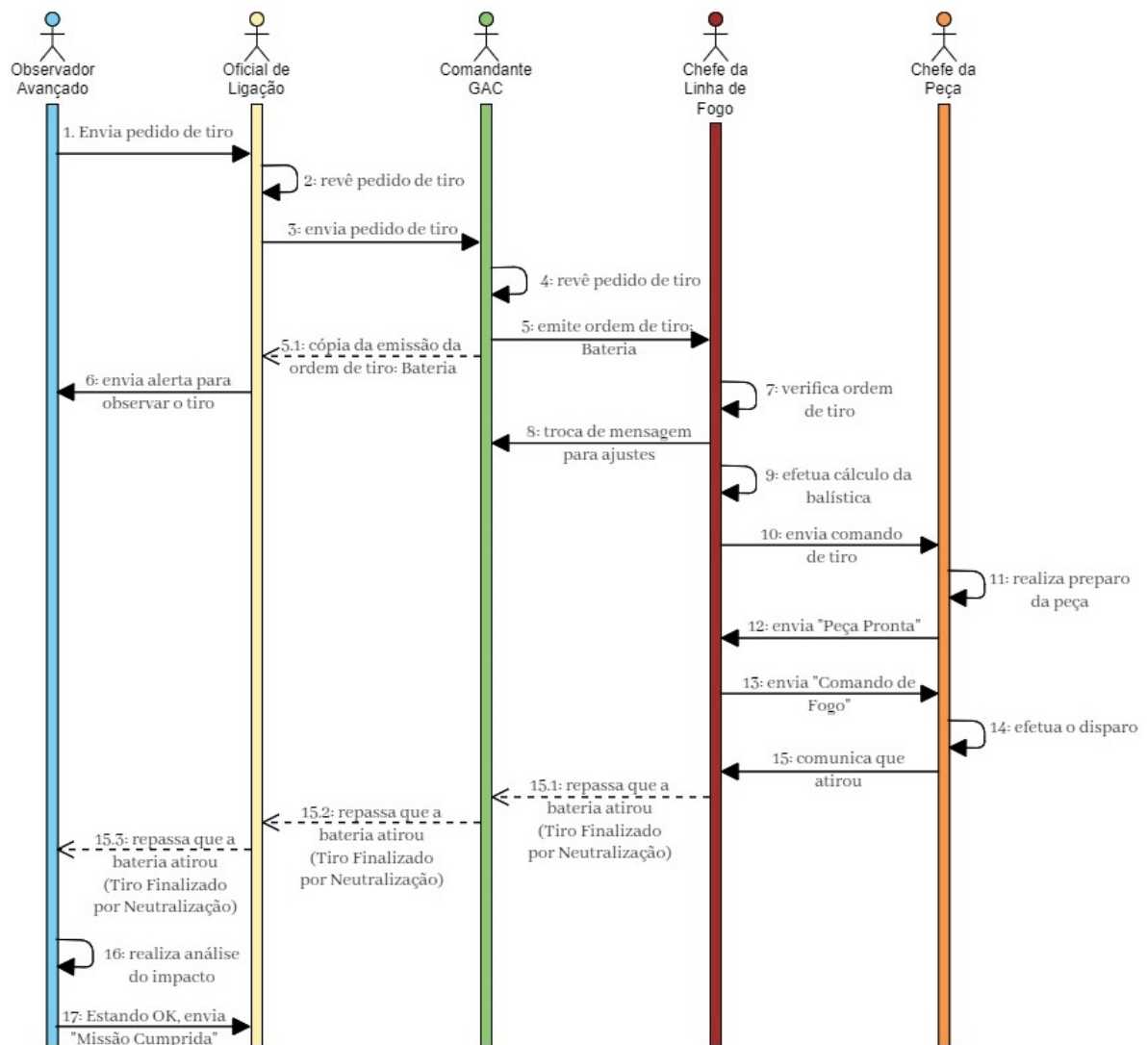


Figura 20 – Diagrama de sequência do pedido de tiro partindo de um OA

Centro de Coordenação de Apoio de Fogo (CCAF) para que seja iniciado o pedido de tiro.

O pedido inclui informações como a localização exata do alvo (coordenadas geográficas), descrição do alvo e tipo de munição solicitada. Com base nessas informações, o O Lig transmite o pedido para o Comandante do GAC, que também faz a análise, para então verificar a disponibilidade de recursos e assim determinar a unidade de tiro mais adequada para realizar o disparo. Especificamente nesse estudo de caso estamos trabalhando com a seleção de uma bateria de Obuseiro.

A Figura 20 mostra todo o processo. Após o Comandante do GAC analisar o pedido, ele emite uma ordem de tiro com a bateria de obuseiro para o CLF. Essa ordem contém todos os detalhes necessários para o ataque, incluindo coordenadas precisas do alvo, tipo de munição a ser usada, e a prioridade do tiro. Simultaneamente, uma cópia dessa emissão é enviada ao O Lig para ciência. O OA é avisado para estar em alerta, pois

um tiro será realizado. Com isso, o OA se prepara para observar e reportar os resultados dos disparos, além de fornecer correções em tempo real. O CLF revisa a ordem de tiro recebida para assegurar que todos os detalhes estão corretos e compreendidos. Durante essa verificação, o CLF pode trocar mensagens com o Comandante do GAC para esclarecer dúvidas ou ajustar parâmetros, se necessário. Por exemplo, se o CLF identificar que a localização do alvo precisa de refinamento, ele pode solicitar ao Comandante do GAC uma confirmação ou ajuste nas coordenadas.

O CLF faz os cálculos balísticos e envia o comando de tiro para o Chefe da Peça (CP), que então prepara a peça com os detalhes sobre carga, deriva e inclinação. O CP confirma que a peça está pronta e envia a mensagem “Peça Pronta” para o CLF. O CLF dá o comando de “Fogo” para o CP, que então realiza o disparo. O CP indica que o tiro foi efetuado ao CLF, que então, informa ao GAC que a “Bateria Atirou”. A mensagem “Tiro Finalizado na Neutralização” é enviada ao OA que solicitou o tiro, informando-o do disparo. O OA analisa o impacto do tiro no alvo e avalia a porcentagem de cumprimento do objetivo. Se a missão estiver cumprida, o OA marca na interface “Missão Cumprida”, e essa informação é enviada ao O Lig.

A definição detalhada do estudo de caso permitiu compreender o contexto, os objetivos específicos, os desafios e as restrições envolvidas no projeto. Isso proporcionou uma base sólida para o desenvolvimento de um plano de ação que seja adequado às necessidades e particularidades do cenário em questão. Ao instanciar esse estudo de caso em um meta processo, utilizou-se um conjunto estruturado de metodologias, diretrizes e práticas estabelecidas previamente. Isso facilita a organização e a execução das atividades. Além disso, o meta processo oferece uma estrutura flexível para adaptar e personalizar as atividades conforme as especificidades do estudo de caso, assegurando que cada etapa seja alinhada com os objetivos estratégicos e operacionais.

## 5.2 Resultados Parciais

No desenvolvimento desta proposta de tese, a fase de obtenção de resultados parciais consiste na validação e ajuste da abordagem metodológica proposta. Aqui temos a instanciação do método, cujo objetivo é modelar um SoSC2. A instanciação do método envolve adaptar e aplicar o método a um estudo de caso prático, permitindo avaliar sua eficácia e identificar possíveis melhorias na metodologia.

## 5.3 Instanciação do Meta Processo

Aplicar a instanciação de um meta processo em um estudo de caso consiste em adaptar o processo genérico para se adequar às particularidades e necessidades específicas

desse estudo. Isso envolve compreender completamente o cenário específico, incluindo os objetivos, restrições, *stakeholders* e o ambiente operacional. Também é necessário adaptar as etapas, atividades e fluxos de trabalho do meta processo geral para se alinhar com as necessidades e características únicas do estudo de caso específico. Isso pode envolver a adição, remoção ou modificação de atividades, dependendo do contexto. E ainda colocar em prática o meta processo adaptado, seguindo as etapas e atividades definidas para alcançar os objetivos estabelecidos no estudo de caso.

### 5.3.1 Levantamento de Requisitos do SoS

O levantamento de requisitos do SoS no estudo de caso detalhado anteriormente envolve a identificação detalhada das necessidades operacionais e especificações técnicas que permitirão a coordenação eficaz de operações de apoio de fogo em ambientes militares.

#### 5.3.1.1 Definir cenário alvo

Um cenário de C2 envolve um ambiente:

- Onde todas as informações relevantes possam ser trocadas rapidamente entre as partes envolvidas;
- Onde as ações possam ser coordenadas de forma eficiente para alcançar os objetivos estabelecidos;
- Onde os recursos necessários para a missão sejam gerenciados de maneira otimizada para garantir o sucesso da operação.

Para definir o cenário de estudo, especialmente em um contexto militar como o de Apoio de Fogo a uma Brigada de Infantaria Blindada, é necessário realizar uma análise aprofundada de doutrinas e documentos oficiais. Esse processo envolve etapas que começam com a leitura de doutrinas, manuais e portarias, pois esses documentos fornecem as bases teóricas e normativas que guiam as operações militares. Permitem o entendimento das orientações, procedimentos e regulamentações estabelecidas pela organização militar, sendo essencial para alinhar as práticas adotadas com os princípios amplamente aceitos, assim como as instruções detalhadas para execução de tarefas específicas. Doutrinas apresentam os princípios e estratégias fundamentais; manuais oferecem instruções práticas e detalhadas; e as portarias definem regras e procedimentos emitidos por autoridades superiores. Esse conhecimento é indispensável para garantir que o planejamento e a execução de ações no contexto de apoio de fogo estejam em conformidade com os procedimentos militares.

Neste estudo de caso, foram lidos e estudados os seguintes documentos:

- Manual de Campanha EB70 - MC10.334 Brigadas de Infantaria, 1ª edição, 2023
- Organização e Emprego das Armas e Serviços, Volume 1, 2014
- Organização e Emprego das Armas e Serviços, Volume 2, 2ª edição, 2014
- Manual de Campanha EB70 - MC10.346 Planejamento e Coordenação de Fogos, 3ª edição, 2017
- Manual de Campanha EB20-MC-10.205 Comando e Controle, 1ª edição, 2015
- Manual de Ensino O Trabalho de Estado-Maior EB60-ME-12.401), 1ª edição, 2016
- Manual do Sistema Gênesis
- FMCE Introdução ao Gênesis
- Portaria nº126 EME, de 31 de Julho de 2018
- Manual CPDT v10
- Manual TOL v10
- Manual TVP
- Manual Cotat V7

Em paralelo às leituras, foram sendo realizadas entrevistas e reuniões com especialistas, que serão detalhadas a seguir.

#### 5.3.1.2 Realizar entrevistas

Entrevistar e consultar especialistas é uma atividade importante para a estruturação de um estudo de caso por diversos motivos. Primeiro, vale destacar que especialistas possuem conhecimento aprofundado e experiência prática na área em estudo, que resultou por fornecer *insights* valiosos que não estavam disponíveis na literatura ou em qualquer outra documentação. Essa expertise ajudou a identificar os aspectos críticos para a compreensão completa do caso. Também foi possível obter detalhes sobre os desafios enfrentados, as soluções já implementadas e as melhores práticas desenvolvidas ao longo do tempo.

As reuniões recorrentes com os especialistas facilitou a validação dos dados e das informações coletadas, assegurando a precisão do estudo de caso. Conforme os fluxos foram sendo desenvolvidos, os especialistas contribuíram confirmando ou corrigindo as informações, acrescentando uma camada de verificação que aumenta a confiabilidade dos resultados obtidos. Alguns especialistas foram fundamentais para a elaboração deste estudo de caso:

- Tenente Coronel Ricardo Queiroz Fernandes, Centro de Desenvolvimento de Sistemas do Exército Brasileiro (CDS)
- Major Thiago Castro, Centro de Desenvolvimento de Sistemas do Exército Brasileiro (CDS)
- Cap. Paulo Eduardo Althoff, Centro de Desenvolvimento de Sistemas do Exército Brasileiro (CDS)
- Cel. Noelio Heluy Ferreira, Centro de Desenvolvimento de Sistemas do Exército Brasileiro (CDS)
- Major Leandro Ferreira, Instituto Militar de Engenharia (IME)
- Capitão Gabriel Constante, Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN)
- Major Rafael Ferraz, Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN)

Os contatos iniciais para a elaboração do estudo de caso iniciaram com o Ten. Cel. Ricardo Fernandes, que disponibilizou uma janela semanal para encontros que serviram para o direcionamento do estudo. Na sequência, o Maj. Castro trouxe algumas apresentações para mostrar o problema de interoperabilidade existente hoje entre os sistemas. As reuniões ocorriam semanalmente junto ao Cap. Althoff, e contribuíram para o entendimento e estruturação do problema.

Posteriormente, o Maj. Leandro contribuiu para este estudo de caso sobre o processo de pedido de tiro no sistema Gênesis, especificamente na interação entre seus módulos. Os encontros não foram recorrentes, mas fundamentais para esclarecer a interação entre as partes no processo. O militar detalhou não apenas as comunicações verbais e escritas envolvidas, mas também os protocolos, equipamentos utilizados, e as ações específicas de cada papel, garantindo uma compreensão completa e precisa do processo. Para tentar suprir algumas outras dúvidas, em especial sobre a interoperabilidade com outros sistemas, foi realizada uma apresentação do trabalho em andamento para militares da AMAN e do CDS, onde participaram patentes importantes como Cel. Heluy, Cap. Constante e Maj. Ferraz. Estes avaliaram o estudo e contribuíram com suas críticas para melhoria e refinamento. Até o fechamento desta proposta, o Cap. Althoff se manteve próximo, ajudando no entendimento e validação do problema.

### 5.3.1.3 Definir processos envolvidos

Os processos envolvidos podem ser definidos como:

- Levantamento de requisitos: definir quais requisitos serão necessários para a etapa de Projeto SoS.



- Definir objetivo geral do SoS: Estabelecer claramente as metas estratégicas e operacionais do SoS, definindo seu propósito, missão e escopo de atuação.
- Identificar sistemas relevantes: avaliar os sistemas relevantes para determinar quais atenderão aos critérios de compatibilidade, funcionalidade e interoperabilidade exigidos.

#### 5.3.1.4 Definir papéis/atores/unidades

Identificar os papéis ajuda a definir claramente quem é responsável por cada atividade dentro de um sistema. Isso previne ambiguidades e garante que todos os envolvidos saibam suas responsabilidades. O envolvimento de diferentes papéis, atores e unidades são importantes para proporcionar uma visão objetiva de quem faz o quê e quando.

#### 5.3.1.5 Especificar processos

Nessa etapa são detalhados, passo a passo, os processos definidos na etapa 5.3.1.3.

- Levantamento de requisitos: Os requisitos necessários para este estudo são:
  - Funcionais;
  - de Interoperabilidade;
  - de Segurança;
  - de Confiabilidade;
  - de Solução de Conflito
- Definir objetivo geral do SoS: Apoiar e coordenar a comunicação entre os processos de Comando e Controle, integrando diferentes sistemas para otimizar os Pedidos de Tiro em uma operação de apoio de fogo. Com isso visa aumentar a precisão, eficiência e segurança das operações, garantindo uma resposta rápida e coordenada diante das necessidades táticas em uma missão.
- Identificar sistemas relevantes: Com base na leitura dos documentos, foram identificados sistemas relevantes para a definição do cenário de C2. Esses sistemas, descritos nos manuais e portarias, incluem as tecnologias, protocolos e procedimentos necessários para garantir a comunicação, coordenação e gestão eficaz dos recursos. A análise detalhada desses documentos permitiu uma compreensão abrangente das capacidades e limitações dos sistemas existentes, bem como a identificação de possíveis melhorias e integrações para atender aos objetivos da missão. Os sistemas identificados como relevantes ao estudo foram:
  - C2 em Combate

- Gênesis Módulo Observador
- Gênesis Módulo Linha de Fogo
- Gênesis Módulo GAC
- Gênesis Módulo Oficial de Ligação
- Gerenciador de Campo de Batalha (GCB)
- Pacificador

O C2 em Combate é um sistema de Comando e Controle que oferece dados em tempo real sobre operações militares, com o objetivo de auxiliar as autoridades na tomada de decisões. Ele inclui uma Carta de Visualização Gráfica de Manobra que utiliza dados transmitidos por rádio para coordenação e controle. Além disso, o sistema permite a emissão de relatórios, ordens de operações, planos e mensagens, incluindo aquelas com anexos. Suas funcionalidades adicionais englobam: (i) controle de unidades, armazenando informações como país, organização, estado operacional, localização, pessoal e material; (ii) controle de instalações, com registro de nome, organização, apoio, estado operacional, status, localização e pessoal; (iii) controle de pessoas, coletando dados pessoais como nome completo, nome de guerra, data de nascimento, tipo sanguíneo, religião, gênero, características físicas detalhadas como cor de cabelo, olhos, pele, barba e bigode, altura, condição física e documentos; (iv) registro de eventos, incluindo informações como nome, categoria, fonte, conteúdo, início, término, progresso, status e localização (latitude e longitude); (v) informe de conhecimentos de inteligência, cobrindo detalhes como nome, classificação sigilosa, origem, fonte, conteúdo e data/hora. É um sistema de C2 com importantes características e forte candidato a constituinte do SoS.

O Gênesis foi projetado para atender às necessidades de Apoio de Fogo das Armas de Infantaria, Cavalaria e Artilharia, sendo assim outro forte sistema relevante candidato a constituinte. O sistema visa aprimorar a precisão, eficiência e velocidade das operações de tiro, integrando funcionalidades avançadas de cálculo balístico, gestão de munições e coordenação de fogo entre diferentes unidades militares. Os principais módulos do sistema incluem o Módulo de Observação, o Módulo de Oficial de Ligação, o Módulo de GAC, e o Módulo de Linha de Fogo. Esses módulos garantem uma integração eficiente das operações de tiro, proporcionando maior eficácia e segurança nas missões militares.

O Gerenciador de Campo de Batalha (GCB) é um sistema de C2 projetado para operar em ambiente embarcado, especificamente na Viatura Blindada de Transporte de Pessoal Guarani. Suas funcionalidades são mais simples em comparação com o C2 em Combate, mas com um foco maior na usabilidade durante deslocamentos militares. O sistema foi ajustado principalmente na interface gráfica para atender às necessidades de um militar em movimento. Entre suas características podemos citar: proporcionar consciência situacional do ambiente externo e das informações internas do veículo, facilitar a troca de

mensagens, permitir a confecção de calcos, fornecer geolocalização das tropas, ser intuitivo e fácil de operar em condições dinâmicas de combate. Com base em suas características, podemos elencar como relevante ao SoS.

O Pacificador surgiu com o objetivo de atender às novas demandas das forças armadas terrestres, ampliando a capacidade de consciência situacional e de apoio à decisão, e a partir disso, relevante para o SoS em estudo. Ele se destaca principalmente pela simplicidade de sua interface gráfica e pela flexibilidade de uso, atendendo aos princípios estabelecidos no Manual de Comando e Controle (EB20-MC-10.205). Através dessas características, o Pacificador facilita a integração e operação eficiente dos sistemas.

#### 5.3.1.6 Especificar papéis/atores/unidades

Nessa etapa são detalhados, passo a passo, os processos definidos na etapa 5.3.1.4. Identificar os papéis ajuda a definir claramente quem é responsável por cada atividade dentro de um sistema. Isso previne ambiguidades e garante que todos os envolvidos saibam suas responsabilidades. No estudo de caso temos quatro papéis envolvidos:

- **Observador Avançado (OA):** Fica posicionado em um local avançado no campo de batalha para coordenar o apoio de fogo da artilharia, onde pode observar as movimentações inimigas. Com isso, é responsável por:
  - detectar e identificar alvos que requerem fogo de artilharia;
  - recolher informações detalhadas sobre os alvos, incluindo localização, tipo, tamanho e movimento, por exemplo, para determinar o tipo e a quantidade de fogo necessário;
  - transmitir um pedido de tiro à unidade de artilharia, fornecendo dados precisos sobre a localização do alvo e as coordenadas exatas. Este pedido inclui detalhes como o tipo de munição necessária e o efeito desejado no alvo;
  - observar o impacto e fornecer correções à unidade de artilharia após um disparo, ajustando o fogo até que o alvo seja abatido com precisão. Isso pode incluir ajustes na elevação, direção e tipo de munição utilizada.
- **Oficial de Ligação (OLig):** responsável por coordenar informações e necessidades entre diferentes unidades, por exemplo, atuar como intermediário entre o Observador Avançado e as unidades de artilharia, garantindo que as informações sobre o alvo e as instruções de fogo sejam transmitidas com precisão e rapidez;
- **Chefe da Linha de Fogo (CLF):** responsável por:
  - supervisionar e coordenar as operações da linha de fogo, assegurando que as equipes de artilharia estejam prontas e posicionadas corretamente para executar o pedido de tiro;

- receber os pedidos de tiro do Oficial de Ligação e transmitir essas ordens para as peças de artilharia;
  - garantir que as peças de artilharia estejam devidamente preparadas, carregadas e apontadas corretamente para o alvo conforme especificado no pedido de tiro;
  - manter uma comunicação constante com o Oficial de Ligação e o comandante, para fornecer atualizações sobre o status dos disparos e quaisquer problemas que possam surgir.
- **Comandante do GAC:** responsável por:
    - avaliar as informações recebidas do Observador Avançado e Oficial de Ligação para priorizar e designar alvos. Ele decide quais alvos devem ser atacados e determina a alocação de recursos de artilharia para esses alvos;
    - tomar decisões rápidas, respondendo a mudanças no campo de batalha e adaptando os planos de fogo conforme necessário.

As unidades envolvidas são: (i) Artilharia de Campanha: arma essencial no apoio às operações de combate, proporcionando fogo de suporte a longa distância para neutralizar, suprimir ou destruir alvos inimigos; e (ii) Brigada de Infantaria Blindada: unidade de combate móvel e versátil, equipada com veículos blindados que fornecem proteção e poder de fogo superior.

Após a definição dos papéis, também é importante identificar as atividades para garantir que cada papel compreenda suas responsabilidades e execute suas tarefas de maneira coordenada. A clareza nas atividades de cada papel ajuda a minimizar erros.

- **Observador Avançado (OA)**
  - Identificação dos Alvos: O OA detecta e reconhece os alvos, determinando sua localização precisa através de equipamentos de geolocalização;
  - Coleta de Informações: Reúne dados detalhados sobre os alvos, incluindo tamanho, tipo e movimento, além de observar e registrar a situação tática, incluindo a posição das forças inimigas e amigas;
  - Comunicação com o OLig: Transmite coordenadas e descrições dos alvos ao OLig, fornecendo atualizações em tempo real sobre mudanças no campo.
  - Ajustes de Tiro: Recebe *feedback* sobre os disparos iniciais, sugerindo correções para aumentar a precisão. Além disso, coordena com o OLig para ajustar o ponto de impacto dos disparos conforme necessário.
- **Oficial de Ligação (OLig)**

- Recepção de Informações do OA: O OLig recebe coordenadas e dados dos alvos fornecidos pelo OA e verifica essas informações;
- Interpretação e Transmissão dos Dados: Analisa e interpreta os dados recebidos do OA para entender a situação tática, transmitindo essas informações detalhadas ao Cmte do GAC;
- Coordenação com o Cmte do GAC: Transmite ordens e instruções do Cmte do GAC ao OA e ao CLF, garantindo que as ordens sejam claras e compreendidas por todos;
- *Feedback* e Ajustes: Recebe *feedback* do Cmte do GAC e do CLF sobre a eficácia dos disparos, transmitindo correções e ajustes de tiro sugeridos pelo OA.

- **Chefe da Linha de Fogo (CLF)**

- Recepção de Ordens do Cmte do GAC: O CLF recebe instruções detalhadas sobre os disparos, incluindo coordenadas e tipo de munição. Deve compreender as ordens para garantir a precisão na execução dos tiros;
- Execução de Disparos: Organiza e coordena a equipe para preparar e disparar a artilharia conforme as ordens, e garantindo que os disparos sejam feitos com precisão, seguindo as coordenadas fornecidas;
- Monitoramento e Ajuste de Disparos: Observa os resultados dos disparos e faz ajustes conforme necessário. Comunica qualquer problema ou necessidade de correção ao Cmte do GAC;
- Relatório de Execução: Fornece *feedback* detalhado sobre a execução dos disparos ao Cmte do GAC, registrando dados sobre a eficácia dos tiros e quaisquer desvios observados.

- **Comandante do GAC (Cmte do GAC)**

- Análise de Informações: O Cmte do GAC recebe e analisa dados detalhados dos alvos e da situação tática fornecidos pelo OLig, determinando a melhor estratégia de tiro com base nas informações recebidas;
- Tomada de Decisões: Decide sobre a execução dos disparos, incluindo escolha de munição e pontos de impacto. Também emite ordens claras e detalhadas ao CLF e ao OLig;
- Coordenação de Recursos: Assegura que todos os recursos de artilharia estejam prontos e disponíveis para a missão, coordenando também com outras unidades, conforme necessário;
- Monitoramento da Operação: Recebe *feedback* contínuo do OLig e do CLF, fazendo ajustes estratégicos conforme necessário.

No contexto de um pedido de tiro no apoio de fogo da artilharia, é necessário identificar as dependências de comunicação e coordenação entre os diferentes papéis envolvidos. Na sequência são detalhadas as dependências entre os envolvidos no estudo de caso de pedido de tiro.

- **Observador Avançado (OA)**

- Dependência com o Oficial de Ligação (OLig): O OA está posicionado na linha de frente com a responsabilidade de identificar alvos, fornecendo as coordenadas da localização e a característica dos alvos. Movimentos do inimigo ou mudanças no cenário também devem ser transmitidas imediatamente ao OLig, e decorrente desta dependência, o OA precisa se comunicar de maneira eficaz e contínua com o OLig.

- **Oficial de Ligação (OLig)**

- Dependência com o Observador Avançado: O OLig recebe informações do OA e tem a responsabilidade de interpretar e retransmitir essas informações ao Comandante do GAC;
- Dependência com o Comandante do GAC: Após receber e verificar as informações do OA, o OLig deve repassar as informações ao Comandante do GAC, que é o responsável pela decisão final sobre o disparo.

- **Comandante do GAC (Cmte do GAC)**

- Dependência com o Oficial de Ligação: O Cmte do GAC depende do OLig para obter informações precisas e atualizadas sobre os alvos. Ele analisa as informações fornecidas pelo OLig para tomar decisões estratégicas sobre o apoio de fogo.

- **Chefe da Linha de Fogo (CLF)**

- Dependência com o Comandante do GAC: O CLF recebe ordens do Cmte do GAC sobre os detalhes do disparo, incluindo coordenadas, tipo de munição e momento do disparo. Deve executar os disparos conforme as ordens recebidas, e fornecer um *feedback* sobre a execução dos disparos e quaisquer problemas ou ajustes necessários.

### 5.3.2 Projeto SoS

Aqui são detalhadas as etapas referentes ao Projeto SoS.

### 5.3.2.1 Mapear Constituintes

O mapeamento dos constituintes para concepção de um SoS é um processo que vislumbra a compreensão da estrutura, das interações e das funcionalidades dos diversos sistemas que irão compor o SoS. Envolve etapas como identificar capacidades, formatos de entradas e saídas, assim como os objetivos de cada sistema constituinte.

A primeira etapa envolve identificar todos os sistemas que farão parte do SoS. É realizada uma análise detalhada dos requisitos do SoS e das capacidades necessárias para atender a esses requisitos. Os candidatos identificados foram:

- C2 em Combate
- Gênesis Módulo Observador
- Gênesis Módulo Linha de Fogo
- Gênesis Módulo GAC
- Gênesis Módulo Oficial de Ligação

Após a identificação dos constituintes, faz-se necessário detalhar suas capacidades. Estas referem-se às funcionalidades específicas que cada sistema oferece, sua performance e sua contribuição para os objetivos gerais do SoS. Cada sistema no SoS possui funcionalidades que determinam suas capacidades, sendo a capacidade de integração muito importante para o funcionamento coeso do SoS. Isso inclui a habilidade dos sistemas de se comunicar uns com os outros, trocar dados em formatos compatíveis e operar dentro de protocolos comuns. Sistemas com alta capacidade de integração podem se adaptar a diferentes arquiteturas e interagir com múltiplos sistemas sem a necessidade de grandes modificações. Abaixo são listadas as capacidades dos sistemas candidatos a constituintes.

- C2 em Combate
  - fornece dados em tempo real de operações militares;
  - apresenta carta de visualização gráfica de manobra;
  - realiza relatórios;
  - permite envio e recebimento de mensagens contendo anexos;
  - utiliza a infraestrutura EBNet;
  - possui interface gráfica.
- Gênesis Módulo Observador
  - aumentar a consciência situacional;

- permitir ao operador inserir e editar campo de mensagens necessárias a execução do tiro;
  - armazenar um registro dos eventos de recebimento, envio ou falha de envio de mensagens;
  - oferecer suporte geoespacial do cenário tático;
  - cadastrar, receber e transmitir dados topográficos;
  - cadastrar, receber e transmitir medidas de coordenação e controle;
  - compor e transmitir mensagens iniciais;
  - receber mensagens-resposta do observador;
  - registrar e transmitir correções de tiro;
  - transmitir controle de eficácia;
  - receber informações sobre o início e término da execução do tiro;
  - visualizar cartas digitais;
  - exibir sobre a carta digital ícones dos alvos de missões e outros dados geográficos;
  - capturar sua posição por GPS.
- Gênesis Módulo Linha de Fogo
    - aumentar a consciência situacional;
    - cadastrar, receber e transmitir dados topográficos;
    - receber ordem de tiro;
    - transmitir informações durante o tiro;
    - transmitir dados de posição, velocidade inicial e temperatura do propelente;
    - receber elementos para a execução do tiro;
    - visualizar cartas digitais;
    - mostrar alvo nas cartas digitais;
    - capturar sua posição por GPS;
    - possuir um equipamento em cada peça capaz de apresentar elementos de tiro;
    - trocar mensagens relativas ao andamento da missão;
    - contabilizar a munição consumida.
  - Gênesis Módulo GAC
    - aumentar a consciência situacional;
    - cadastrar, receber e transmitir dados topográficos;



- cadastrar, receber e transmitir medidas de coordenação e controle;
  - oferecer suporte geoespacial do cenário tático;
  - receber mensagens iniciais;
  - transmitir mensagem-resposta ao observador;
  - receber correções de tiro;
  - receber controle de eficácia;
  - transmitir ordem de tiro, após análise do alvo;
  - receber informações durante o tiro;
  - repassar um alvo para o escalão imediatamente superior;
  - transmitir e receber pedidos e respostas de coordenação para o desencadeamento de missões de tiro;
  - visualizar cartas digitais;
  - mostrar alvo nas cartas digitais em forma de ícones;
  - interface com o sistema do escalão superior;
  - apresentar sugestões para análise do alvo;
  - contabilizar a munição consumida;
  - inserir e difundir dados oriundos do Subsistema de busca de alvos;
  - inserir e difundir dados oriundos do Subsistema de Meteorologia.
- Gênesis Módulo Oficial de Ligação
    - aumentar a consciência situacional;
    - receber dados de posição, velocidade inicial e temperatura do propelente;
    - calcular e transmitir elementos para a execução do tiro;
    - receber correções de tiro;
    - enviar elementos de tiro da missão em execução;
    - poder usar dados do subsistema de meteorologia e aplicar no cálculo de elementos de tiro;
    - oferecer suporte geoespacial do cenário tático.

Foram levantadas as especificações dos Constituintes:

- C2 em Combate
  - Notebook semi-robustecido

- Rádio VHF 30-88 MHz veicular
- Gênesis Módulo Observador
  - Tablet robustecido de 7 - 8 polegadas
  - Rádio VHF 30-88 MHz manpack
- Gênesis Módulo Linha de Fogo
  - Tablet robustecido de 7 - 8 polegadas (CPDT)
  - Tablets robustecidos de 3,5 - 5 polegadas (TVP)
  - Rádio VHF 30-88 MHz veicular com link wi-fi
- Gênesis Módulo GAC
  - Notebook semi-robustecido
  - Rádio VHF 30-88 MHz veicular
- Gênesis Módulo Oficial de Ligação
  - Notebook semi-robustecido
  - Rádio VHF 30-88 MHz veicular

#### 5.3.2.2 Mapear requisitos

- Funcionais: A escolha e padronização dos formatos de dados garantem que as informações sejam trocadas de maneira precisa, compreensível e útil entre diferentes sistemas. Neste estudo de caso os formatos identificados foram: (i) mensagens de texto com mínimo de 160 caracteres; e (ii) imagens de ao menos 3MP (megapixels).
- de Interoperabilidade: A interoperabilidade garante que os sistemas dentro de um SoS possam comunicar-se de forma eficaz, trocar dados em formatos compatíveis e operar dentro de protocolos comuns. A seguir, detalharemos os tipos de mensagens e dados que serão trocados entre os sistemas constituintes.
  - dados topográficos: coordenadas expressas na forma UTM (completa) ou geográfica, com resolução de 1m (1 metro);
  - mensagens: de texto (por digitação, seleção ou toque);
  - medidas de coordenação e controle;
  - cartas digitais;
  - posição por GPS.

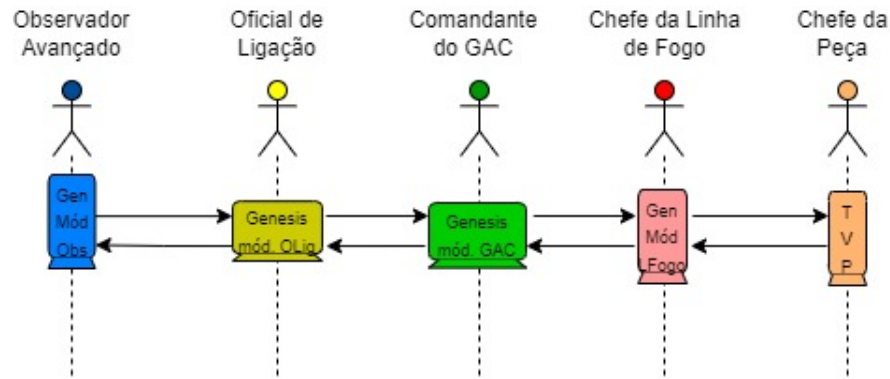


Figura 21 – Fluxo de interoperabilidade no SoS

- de Segurança: Definir permissões de acesso asseguram que apenas usuários autorizados possam acessar informações e realizar ações dentro do sistema. As permissões de acesso são estabelecidas com base em funções específicas e níveis de autoridade. Esta etapa ainda está em andamento no nosso estudo de caso.
- de Confiabilidade: A definição de disponibilidade, tolerância a falhas e recuperação é uma etapa ainda em andamento no nosso estudo de caso.
- de Solução de Conflito: O tratamento de exceção é fundamental para garantir que o sistema possa lidar com eventos inesperados ou erros de maneira eficaz, minimizando impactos nas operações e garantindo a continuidade das atividades críticas. Esta etapa também encontra-se em andamento no estudo de caso.

### 5.3.2.3 Especificar Interação dos Constituintes

Esse processo consiste em mapear o fluxo de interoperabilidade de um SoS, envolvendo várias etapas que buscam assegurar uma comunicação eficaz e eficiente entre os constituintes. É necessário criar um diagrama que represente as interações, mostrando como os dados fluem de um sistema para outro. Isso inclui identificar os pontos de integração e os meios de transmissão utilizados. A Figura 21 mostra o fluxo de interoperabilidade entre os sistemas no estudo de caso referente ao pedido de tiro.

No processo de pedido de tiro, a informação precisa ser transmitida de forma sequencial para que a comunicação possa seguir uma estrutura específica do OA até o Cmte do GAC para aprovação. E a partir daí, seguir até chegar ao Chefe da Peça para execução do disparo.

### 5.3.2.4 Projetar a Arquitetura do SoS

Envolve definir como os sistemas constituintes serão organizados, integrados e coordenados para atingir os objetivos do SoS. A arquitetura de um SoS estabelece as regras e diretrizes de interação, comunicação e interoperabilidade, será documentada em

artefatos como diagramas de fluxo, diagramas de interação e especificações de interface. É uma etapa ainda em construção e por isso não foi instanciada neste momento.

## 5.4 Considerações

Os resultados parciais obtidos até agora demonstram a aplicabilidade do método no estudo de caso especificado. A instanciação do método permitiu a identificação de desafios e limitações, proporcionando uma base sólida para ajustes metodológicos futuros. Esses resultados parciais são fundamentais para o avanço da pesquisa, orientando as próximas etapas do projeto e assegurando que a abordagem final seja bem fundamentada e rigorosamente testada.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os Sistemas de Sistemas (SoS) representam um conjunto de sistemas operados e gerenciados de forma independente, que colaboram para atingir objetivos não alcançados pelos sistemas individuais. Cada sistema individual que compõe um SoS é denominado Constituinte. Um problema comum na literatura consiste em como integrar efetivamente os Constituintes independentes de maneira operacional e gerencial. Em particular, é um desafio criar e manter a interoperabilidade à medida que o SoS evolui ao longo do tempo. A descrição do problema e da abordagem metodológica em SoS ajuda a entender a complexidade do problema. A utilização de uma pesquisa de levantamento do estado atual do SoS, seguida pela modelagem do processo ajuda a entender os fluxos de dados e os processos existentes entre os diferentes sistemas envolvidos.

A integração operacional e gerencial dos sistemas constituintes em um SoS representa um dos principais desafios, pois requer uma arquitetura flexível que permita a interoperabilidade e a adaptação contínua às evoluções. Esta metodologia não apenas facilita a visualização das interações e dependências entre os sistemas, mas também permite identificar pontos críticos e oportunidades para melhoria na concepção de um SoS.

A análise e modelagem de SoS demonstra a importância de uma abordagem estruturada para o desenvolvimento de sistemas complexos. A continuação deste estudo irá aprofundar na compreensão das dinâmicas entre os sistemas constituintes na fase de testes do SoS, e também desenvolver estratégias para aprimorar a interoperabilidade do SoS, contribuindo para o avanço do conhecimento na área.

### 6.1 Contribuições Esperadas

A principal contribuição deste trabalho está na entrega de uma modelagem para a concepção de um SoS, permitindo a integração e a interoperabilidade de diversos sistemas constituintes. Ao mapear as interações e dependências entre os sistemas constituintes, a modelagem proporcionará uma coordenação mais eficaz entre diferentes sistemas, resultando em maior eficiência nas operações e na tomada de decisões em tempo real.

A modelagem do SoS está sendo projetada para permitir a adaptação a diferentes cenários operacionais, além de ser escalável para incorporar novos sistemas ou tecnologias conforme necessário, contribuindo para a evolução contínua da arquitetura. A pesquisa utiliza um estudo de caso detalhado para validar a eficácia do método proposto, garantindo sua aplicabilidade prática. Essa proposta também contribuirá para o avanço na concepção e no desenvolvimento de um SoS, explorando novas abordagens em integração de siste-

mas e colaboração. O objetivo é que sirva como instrumento de referência para futuras implementações, fornecendo uma base sólida para a adaptação de novas funcionalidades e capacidades conforme as necessidades operacionais evoluam.

## 6.2 Plano de Ação

O plano de ação para o desenvolvimento desta proposta de tese inclui algumas etapas descritas na sequência. No entanto, é importante observar que casualmente algumas etapas necessitam ser revistas, e por isso contam com espaço de tempo suficiente para esses ajustes.

- **Etapa 1:** Definição do Problema
- **Etapa 2:** Revisão da Literatura sobre Sistema de Sistemas e Interoperabilidade
- **Etapa 3:** Levantamento das Necessidades do SoS
- **Etapa 4:** Revisão da Literatura sobre Linguagens de Especificação
- **Etapa 5:** Estudo de Caso sobre SoS
- **Etapa 6:** Escrita da Proposta de Tese
- **Etapa 7:** Revisão da Literatura sobre Métricas de Avaliação
- **Etapa 8:** Qualificação da Proposta de Tese
- **Etapa 9:** Novo estudo de caso envolvendo BPMN e Diagrama de sequência
- **Etapa 10:** Licença Maternidade
- **Etapa 11:** Especificação da metodologia
- **Etapa 12:** Alterações no Estudo de Caso
- **Etapa 13:** Defesa da Proposta de Tese
- **Etapa 14:** Refinar estudo de caso
- **Etapa 15:** Escrita de Artigo Científico
- **Etapa 16:** Escrita da Tese
- **Etapa 17:** Defesa

	2021		2022			2023			2024
	8	12	1	6	12	1	6	12	1
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

Tabela 4 – Cronograma Parte I

	2024			2025			2026		
	3	6	12	1	6	12	1	6	8
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									

Tabela 5 – Cronograma Parte II

## REFERÊNCIAS

- 1 FIRESMITH, D. *Profiling systems using the defining characteristics of systems of systems (SoS)*. [S.l.], 2010.
- 2 AXELSSON, J. A refined terminology on system-of-systems substructure and constituent system states. In: IEEE. *2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE)*. [S.l.], 2019. p. 31–36.
- 3 LANE, J. A.; EPSTEIN, D. What is a system of systems and why should i care? *University of Southern California*, Citeseer, 2013.
- 4 SANTOS, J. M.; NETO, V. V. G.; NAKAGAWA, E. Y. Business process modeling in systems of systems. In: SBC. *Anais do II Workshop em Modelagem e Simulação de Sistemas Intensivos em Software*. [S.l.], 2020. p. 26–35.
- 5 ALBERTS, D.; HUBER, R.; MOFFAT, J. Nato nec c2 maturity model. 2010.
- 6 FERNANDES, J.; CORDEIRO, F.; FERREIRA, F.; NETO, V. V. G.; SANTOS, R. P. dos. A method for identification of potential interoperability links between information systems towards system-of-information systems. *iSys-Brazilian Journal of Information Systems*, v. 15, n. 1, p. 2–1, 2022.
- 7 FERNANDES, J.; NETO, V. V. G.; SANTOS, R. P. d. An approach based on conceptual modeling to understand factors that influence interoperability in systems-of-information systems. In: *XX Brazilian Symposium on Software Quality*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–10.
- 8 VANEMAN, W.; BUDKA, R. Defining a system of systems engineering and integration approach to address the navy’s information technology technical authority. *INCOSE International Symposium*, v. 23, p. 1202–1214, 06 2013.
- 9 BAEK, Y.-M.; MIHRET, Z.; SHIN, Y.-J.; BAE, D.-H. A modeling method for model-based analysis and design of a system-of-systems. In: *2020 27th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 336–345.
- 10 DRIDI, C. E.; BENZADRI, Z.; BELALA, F. System of systems engineering: Meta-modelling perspective. In: *2020 IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 000135–000144.
- 11 SMAALI, S.; BOUCEBSI, R. Towards a metamodeling approach for iot based system of systems. 2022.
- 12 XUE, Y.; LIU, H.; TIAN, Y.; WANG, X. Study on the aviation emergency rescue system for forest firefighting based on sose. In: IEEE. *2022 17th Annual System of Systems Engineering Conference (SOSE)*. [S.l.], 2022. p. 81–86.
- 13 DELAURENTIS, D. A. A taxonomy-based perspective for systems of systems design methods. In: IEEE. *2005 IEEE international conference on systems, man and cybernetics*. [S.l.], 2005. v. 1, p. 86–91.



- 14 HUYNH, T. V.; OSMUNDSON, J. S. A systems engineering methodology for analyzing systems of systems using the systems modeling language (sysml). *Department of Systems Engineering, Naval Postgraduate School, Monterey, Citeseer*, 2006.
- 15 CABALLINI, C.; SACONE, S.; SIRI, S. The port as a system of systems: A system dynamics simulation approach. In: IEEE. *2012 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*. [S.l.], 2012. p. 191–196.
- 16 JAMSHIDI, M. *Systems of systems engineering: principles and applications*. [S.l.]: CRC press, 2017.
- 17 HELA, K.; LAKHAL, O.; CONRARD, B.; MERZOUKI, R. Formal approach to sos management design. In: IEEE. *2021 16th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)*. [S.l.], 2021. p. 138–143.
- 18 KRYGIEL, A. J. *Behind the Wizard's curtain. An integration environment for a system of systems*. [S.l.], 1999.
- 19 MAIER, M. W. Architecting principles for systems-of-systems. *Systems Engineering: The Journal of the International Council on Systems Engineering*, Wiley Online Library, v. 1, n. 4, p. 267–284, 1998.
- 20 BOARDMAN, J.; SAUSER, B. System of systems-the meaning of of. In: IEEE. *2006 IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering*. [S.l.], 2006. p. 6–pp.
- 21 DAHMANN, J. S.; BALDWIN, K. J. Understanding the current state of us defense systems of systems and the implications for systems engineering. In: IEEE. *2008 2nd Annual IEEE Systems Conference*. [S.l.], 2008. p. 1–7.
- 22 DIRECTIVE, D. Standardization and interoperability of weapons systems and equipment within the north atlantic treaty organization. *DoD, Washington DC, USA*, 1980.
- 23 GUESSI, M.; OQUENDO, F.; NAKAGAWA, E. Y. Checking the architectural feasibility of systems-of-systems using formal descriptions. In: IEEE. *2016 11th System of Systems Engineering Conference (SoSE)*. [S.l.], 2016. p. 1–6.
- 24 PAES, C. E. d. B.; NETO, V. V. G.; MOREIRA, T.; NAKAGAWA, E. Y. Conceptualization of a system-of-systems in the defense domain: An experience report in the brazilian scenario. *IEEE Systems Journal*, IEEE, v. 13, n. 3, p. 2098–2107, 2018.
- 25 POSSIK, J.; D'AMBROGIO, A.; ZACHAREWICZ, G.; AMRANI, A.; VALLESPER, B. A bpmn/hla-based methodology for collaborative distributed des. In: IEEE. *2019 IEEE 28th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE)*. [S.l.], 2019. p. 118–123.
- 26 PAN, X.; YIN, B.; HU, J. Modeling and simulation for sos based on the dodaf framework. In: IEEE. *The Proceedings of 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*. [S.l.], 2011. p. 1283–1287.
- 27 FALCONE, A.; GARRO, A.; D'AMBROGIO, A.; GIGLIO, A. Using bpmn and hla for sos engineering: lessons learned and future directions. In: IEEE. *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*. [S.l.], 2018. p. 1–8.

- 28 CORRADINI, F.; POLINI, A.; RE, B.; TIEZZI, F. An operational semantics of bpmn collaboration. In: SPRINGER. *Formal Aspects of Component Software: 12th International Conference, FACS 2015, Niterói, Brazil, October 14-16, 2015, Revised Selected Papers 12*. [S.l.], 2016. p. 161–180.
- 29 NETO, V. V. G.; CAVALCANTE, E.; HACHEM, J. E.; SANTOS, D. S. On the interplay of business process modeling and missions in systems-of-information systems. In: IEEE. *2017 IEEE/ACM Joint 5th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems and 11th Workshop on Distributed Software Development, Software Ecosystems and Systems-of-Systems (JSOS)*. [S.l.], 2017. p. 72–73.
- 30 INGRAM, C.; FITZGERALD, J.; HOLT, J.; PLAT, N. Integrating an upgraded constituent system in a system of systems: a sysml case study. In: WILEY ONLINE LIBRARY. *INCOSE International Symposium*. [S.l.], 2015. v. 25, n. 1, p. 1193–1208.
- 31 BRYANS, J.; PAYNE, R.; HOLT, J.; PERRY, S. Semi-formal and formal interface specification for system of systems architecture. In: IEEE. *2013 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. [S.l.], 2013. p. 612–619.
- 32 TEIXEIRA, P. G.; LOPES, V. H. L.; SANTOS, R. P. D.; KASSAB, M.; NETO, V. V. G. The status quo of systems-of-information systems. In: IEEE. *2019 IEEE/ACM 7th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems (SESoS) and 13th Workshop on Distributed Software Development, Software Ecosystems and Systems-of-Systems (WDES)*. [S.l.], 2019. p. 34–41.
- 33 BRASIL, E. M. E. Catálogo de capacidades do exército: Portaria n. 309-eme, de 23 de dezembro de 2014 (aprovaÇão). publicado no boletim do exército n. 1/2015, de 2 de janeiro de 2015. *EB20-C-07.001*, Brasília/DF, 2015.
- 34 BRASIL, M. d. D. Política nacional de defesa. *A Defesa Nacional*, Brasília/DF, 2012.
- 35 AXELSSON, J. A systematic mapping of the research literature on system-of-systems engineering. In: *2015 10th System of Systems Engineering Conference (SoSE)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 18–23.
- 36 PEI, R. S. System of systems integration (sosi)-a "smart" way of acquiring army c4i2ws systems. In: SOCIETY FOR COMPUTER SIMULATION INTERNATIONAL; 1998. *Summer Computer Simulation Conference*. [S.l.], 2000. p. 574–579.
- 37 SAGE, A. P.; CUPPAN, C. D. On the systems engineering and management of systems of systems and federations of systems. *Information knowledge systems management*, IOS Press, v. 2, n. 4, p. 325–345, 2001.
- 38 JOHNSON, S. *Emergence: The connected lives of ants, brains, cities, and software*. [S.l.]: Simon and Schuster, 2002.
- 39 NILSSON, J.; SANDIN, F. Semantic interoperability in industry 4.0: Survey of recent developments and outlook. In: IEEE. *2018 IEEE 16th international conference on industrial informatics (INDIN)*. [S.l.], 2018. p. 127–132.
- 40 KOLBE, N.; ROBERT, J.; KUBLER, S.; TRAON, Y. L. Proficient: Productivity tool for semantic interoperability in an open iot ecosystem. In: *Proceedings of the 14th EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 116–125.

- 41 FORD, T.; COLOMBI, J.; GRAHAM, S.; JACQUES, D. *Survey on interoperability measurement*. [S.l.], 2007.
- 42 IEEE. *IEEE standard computer dictionary: Compilation of IEEE standard computer glossaries*. [S.l.]: IEEE Press, 1990.
- 43 GERACI, A. *IEEE standard computer dictionary: Compilation of IEEE standard computer glossaries*. [S.l.]: IEEE Press, 1991.
- 44 LI, M.-S.; CABRAL, R.; DOUMEINGTS, G.; POPPLEWELL, K. Enterprise interoperability research roadmap. *an Enterprise Interoperability community document. Work coordinated by the Enterprise Interoperability Cluster of the Information Society and Media Directorate-General, European Commission. Published by European Commission in*, 2006.
- 45 DEFENCE, D. United States Department of. Systems engineering guide for systems of systems. *DoD, Washington DC, USA*, 2008.
- 46 IEEE. *Software, systems and enterprise — Architecture description*. [S.l.]: International Standard, 2022.
- 47 V3.0, B. C. *Guia para Gerenciamento de Processos de Negócio - corpo comum de conhecimento*: Association of business process management professionals. [S.l.]: ABPMP São Paulo, 2009.
- 48 ALBERTS, D. S.; HAYES, R. E. *Power to the edge: Command... control... in the information age*. [S.l.], 2003.
- 49 MCCANN, C.; PIGEAU, R. Clarifying the concepts of control and of command. In: *Proceedings of the 1999 Command and Control Research and Technology Symposium*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 29.
- 50 PIGEAU, R.; MCCANN, C. *Re-conceptualizing command and control*. [S.l.], 2002.
- 51 ALBERTS, D.; HAYES, R. *Understanding command and control*. [S.l.: s.n.], 2006.
- 52 DEFENCE, D. I. . United States Department of. Procedures for compatibility, interoperability, and integration of command, control, communications, and intelligence (c3i) systems. *DoD, Washington DC, USA*, 1992.
- 53 NÓBREGA, T. C. G. P. d. *Sistemas Militares de Comando e Controle do Exército Brasileiro nas Operações*. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, 2019.
- 54 BRASIL, M. d. D. Cria a família de aplicativos de comando e controle da força terrestre e dá outras providências. *Portaria Nr 203/2015, Boletim do Exército No.12, de 20 de março de 2015*, Brasília/DF, 2015.
- 55 CARVALHO, M. Q. D. M. d. *Perspectivas da Família de Aplicativos de Comando e Controle da Força Terrestre*. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, 2016.
- 56 ABDALLA, G.; DAMASCENO, C. D. N.; GUESSI, M.; OQUENDO, F.; NAKAGAWA, E. Y. A systematic literature review on knowledge representation approaches for systems-of-systems. In: IEEE COMPUTER SOCIETY. *2015 IX Brazilian Symposium on Components, Architectures and Reuse Software (SBCARS)*. [S.l.], 2015. p. 70–79.

- 57 COOK, S. C.; PRATT, J. M. Towards designing innovative sose approaches for the australian defence force. In: *2014 9th International Conference on System of Systems Engineering (SOSE)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 295–300.