57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS HETEROGÊNEOS COM MDSP: UMA AVALIAÇÃO ARQUITETURAL

Italo Ramella
Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV) - Marinha do Brasil
Rio de Janeiro, RJ, Brasil
italo.ramella@marinha.mil.br

Valquire da Silva de Jesus
Instituto de Computação (IC) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV) - Marinha do Brasil
Rio de Janeiro, RJ, Brasil
valquire@marinha.mil.br

RESUMO

Os ambientes de operações militares do século XXI caracterizam-se pela constante geração, manipulação e troca automática de dados, realizadas por sistemas digitais heterogêneos. Quando não há interoperabilidade, a troca de dados deve ocorrer por meio de um *Multi Data System Processor* (MDSP), garantindo-se consciência situacional em tempo oportuno. Este artigo identifica os principais componentes do contexto operacional em questão e propõe arquiteturas de comunicações com MDSP capazes de viabilizar o compartilhamento automático de dados entre sistemas heterogêneos. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa, baseada em *Design Science Research*, com modelagem e avaliação empírica. Os resultados associam as arquiteturas identificadas a cenários operacionais conforme suas características.

PALAVRAS CHAVE. Arquitetura de Comunicações, Interoperabilidade, Consciência Situacional, MDSP.

Tópicos (SE-PODMAR, D&SP)

ABSTRACT

The military operational environments of the 21st century are characterized by the constant generation, manipulation, and automatic exchange of data, carried out by heterogeneous digital systems. When interoperability is lacking, data exchange must occur through a Multi Data System Processor (MDSP), ensuring timely situational awareness. This article identifies the main components of this such operational context and proposes MDSP-based communication architectures capable of enabling the automatic sharing of data between heterogeneous systems. The research adopts a qualitative approach, based on Design Science Research, with modeling and empirical evaluation. The results link the identified architectures to operational scenarios according to their characteristics.

KEYWORDS. Communication Architectures, Interoperability, Situational Awareness, MDSP.

Paper topics (SE-PODMAR, D&SP)

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

1. Introdução

Dispor de redes de comunicações integradas tornou-se um objetivo fundamental do atual contexto de operações militares conjuntas. Redes integradas permitem compartilhar a consciência situacional[1] do ambiente operacional, condição necessária durante qualquer operação militar. [Hossain, 2023] faz uma análise ampla da importância de sistemas digitais, especialmente os Enlaces de Dados Táticos (EDT)[2], para o compartilhamento da informação em ambientes militares, e também em ambientes civis, no século XXI.

Plataformas militares em todo o mundo dependem de sistemas digitais para gerar e compartilhar dados entre plataformas navais, terrestres e aéreas, possibilitando a construção automática de um cenário tático[3] comum [Hossain, 2023]. Entretanto, as peculiaridades de cada domínio operacional levam ao uso de sistemas que, muitas vezes, não conseguem interoperar. Nesses casos, torna-se necessária uma solução intermediária capaz de prover a interoperabilidade e, consequentemente, permitir o compartilhamento da consciência situacional.

Essa solução intermediária é implementada por um *gateway*, denominado Processador de Múltiplos Sistemas de Dados, ou *Multi Data System Processor* (MDSP) na língua inglesa. O MDSP atua como mediador entre sistemas heterogêneos, que não conseguiriam interoperar por meios próprios.

A utilização do MDSP resolve o problema da comunicação direta entre sistemas digitais distintos, mas introduz outro desafio: a definição da arquitetura de comunicações que viabilizará a troca de dados entre múltiplos MDSP. Essa arquitetura, por sua vez, depende da infraestrutura de comunicações disponível, entendida como o conjunto de equipamentos e seus periféricos que interligam sistemas, e influencia diretamente a confiabilidade e a eficácia da interoperabilidade.

2. Fundamentação

Os componentes do contexto de uma rede de comunicações em operações militares conjuntas são: os sistemas digitais, os elementos que os constituem, o MDSP, a infraestrutura de comunicações e a arquitetura de comunicações. A Figura 1 apresenta os símbolos que representam os componentes do contexto, conforme as definições de [Ramella, 2021].

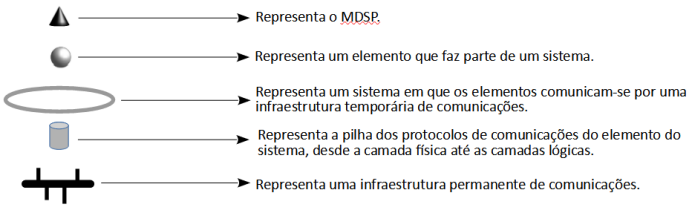


Figura 1: Simbologia dos componentes do contexto.

Esses símbolos serão importantes na compreensão de todas as figuras apresentadas ao longo do texto. Ainda na Figura 1, verifica-se um componente não mencionado anteriormente, a

[1] A consciência situacional é a percepção precisa dos fatores e condições do que se passa ao redor do decisor durante um período determinado de tempo. [BRASIL, 2015c]

[2] Os EDT também recebem a denominação de Enlaces Automáticos de Dados (EAD) em face da automação na troca de dados entre seus componentes. A literatura internacional consagra o termo *Tactical Data Link* (TDL), cuja tradução é exatamente Enlace de Dado Tático.

[3] Os níveis decisórios, em sentido decrescente, seguem esta cadeia hierárquica: político, estratégico, operacional e tático. O nível político define os objetivos das ações a serem tomadas, as alianças internacionais a serem estabelecidas, as limitações do direito internacional e dos acordos entre nações e as restrições ao uso do espaço e dos meios militares. O nível estratégico transforma as condicionantes e as orientações políticas em ações estratégicas a serem desenvolvidas pelas forças militares. O nível operacional planeja e conduz as operações necessárias. O nível tático emprega as forças militares para se atingirem os objetivos traçados. [BRASIL, 2015c]

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

pilha dos protocolos de comunicações, de compreensão intuitiva, e não se verifica a arquitetura de comunicações, objetivo deste artigo e explorada em seção própria.

O MDSP foi projetado para possibilitar a comunicação automática entre dois sistemas heterogêneos e incompatíveis. Esses sistemas, incapazes de trocar dados por conta de suas diferenças, operam em um ambiente com infraestrutura de comunicações que pode ser temporária ou permanente.

A infraestrutura temporária de comunicações forma-se, majoritariamente, pela atuação de equipamentos de radiofrequência (RF), ou simplesmente rádios, que se comunicam entre si em igualdade de condições e durante um período determinado e finito, muitas vezes curto, que tem duração suficiente para se atingir determinado objetivo. Por outro lado, a infraestrutura permanente de comunicações oferece serviços de telecomunicações por meio de redes cabeadas, MPLS (*Multiprotocol Label Switching*), enlaces LPCD (Linha Privativa de Comunicação de Dados), redes 5G[4] enlaces satelitais e outras tecnologias que compõem uma infraestrutura perene, que serve a propósitos diversos.

O MDSP, por concepção, será independente da camada física[5] que os elementos de determinado sistema usam para se comunicarem, portanto não será responsável pela transmissão ou recepção de dados por um canal de RF nem por qualquer outro canal da camada física. Assim, o MDSP comunicar-se-á sempre com as camadas lógicas[6] dos sistemas com os quais interagirá.

Na Figura 2, todos os elementos dos dois sistemas heterogêneos comunicam-se por meio de uma infraestrutura temporária de comunicações. Não há interação entre os dois sistemas. A interação ocorre apenas entre os elementos de um mesmo sistema, e os dados trocados percorrem as camadas da pilha dos protocolos de comunicações. Embora essa pilha tenha sido representada em apenas um dos elementos de cada sistema, ela está presente em todos os elementos.

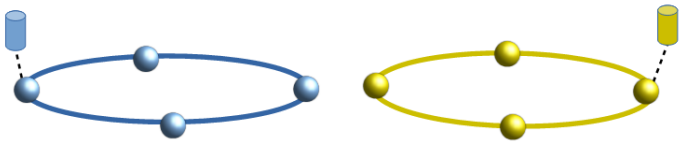


Figura 2: Dois sistemas heterogêneos sem interoperabilidade.

Na Figura 3, os elementos dos dois sistemas heterogêneos ainda se comunicam por meio de uma infraestrutura temporária de comunicações. Entretanto, nesse caso, os sistemas interagem, ou interoperam, por meio de um único elemento que faz parte de dois sistemas ao mesmo tempo. Esse elemento é o *gateway*. Nele, estará sempre o MDSP, cuja função é interagir com as camadas lógicas dos dois sistemas e promover a troca de dados entre eles. Em contextos em que o MDSP sempre interagir com os sistemas, independentemente da infraestrutura de comunicações que os sistemas usem, o *gateway* com o MDSP será componente de todos os sistemas e deverá possuir os equipamentos referentes a esses sistemas.

Na Figura 4, há quatro sistemas heterogêneos com suas infraestruturas temporárias de comunicações que interoperam por meio de seus *gateways*. Entretanto, o *gateway* de cada sistema

[4]Tecnologia de serviços de telefonia celular de quinta geração.

[5]A camada física pode ser entendida como os equipamentos responsáveis pelo envio e recebimento de dados. Em redes com infraestrutura temporária de comunicações, a camada física é composta por equipamentos de RF, ou simplesmente rádios, mas, em redes com infraestrutura permanente de comunicações, a camada física é composta por redes cabeadas, MPLS, redes 5G e outras tecnologias.

[6]As camadas lógicas são todas as camadas que estão acima da camada física. As camadas lógicas e a camada física formam a pilha dos protocolos de comunicações.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

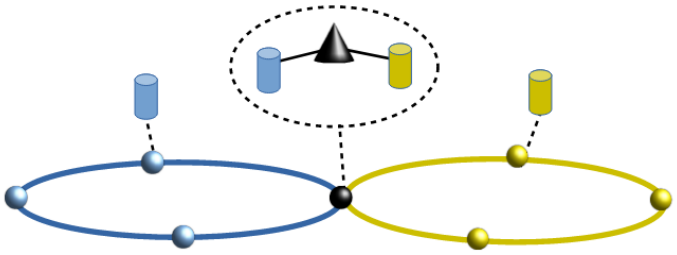


Figura 3: Dois sistemas heterogêneos interoperam por meio do MDSP.

está conectado a uma infraestrutura permanente de comunicações. Nesse contexto, o MDSP de cada *gateway* comunica-se com a camada lógica de apenas um sistema e com os demais *gateways*. Portanto, em contextos em que um MDSP se comunicar diretamente com outros MDSP e interagir com apenas um sistema, independentemente da infraestrutura de comunicações que os sistemas e os *gateways* com o MDSP usem, o *gateway* com o MDSP será componente de apenas um sistema e deverá possuir os equipamentos referentes a apenas esse sistema.

Em ambientes operacionais, em que se desenrolam operações militares, também chamado de Teatro de Operações (TO), os sistemas digitais das plataformas militares atuarão, quase sempre, sobre uma infraestrutura temporária de comunicações, portanto a arquitetura de comunicações sobre a qual atuará o MDSP para prover a interoperabilidade entre os sistemas digitais também estará, primordialmente, alicerçada em uma infraestrutura temporária de comunicações. Infraestruturas permanentes são vulneráveis, passíveis de interceptações se identificadas e difíceis de serem recuperadas se interceptadas. Infraestruturas temporárias de comunicações em operações militares formam-se sob demanda, geralmente estão protegidas por dispositivos de segurança e são suficientemente versáteis para se adequarem ao ambiente em que atuam.

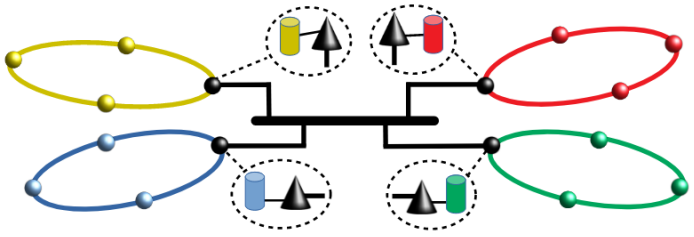


Figura 4: Sistemas heterogêneos interoperam por meio de MDSP que se comunicam por uma infraestrutura permanente.

O assunto em questão teve sua origem na necessidade de as Forças Armadas (FA) brasileiras – Marinha do Brasil (MB), Exército Brasileiro (EB) e Força Aérea Brasileira (FAB) – umentarem seu nível de interoperabilidade. [BRASIL, 2015a,b] mostram que o nível de interoperabilidade dos EDT das FA brasileiras é quase zero quando medido pelo modelo LISI[7] (*Levels of Information Systems Interoperability* – Níveis de Interoperabilidade de Sistemas de Informação). Esse nível pode chegar a 1 se for considerada a capacidade, já dominada, de trocar informações por áudio com o uso de rádios, capacidade, entretanto, muito aquém do necessário no século XXI conforme afirma [Hossain, 2023]. Esforços de técnicos militares brasileiros para a solução do problema culminaram no desenvolvimento da versão brasileira do MDLP (*Multi Data Link Processor*), equipamento há

[7]Modelo desenvolvido pelo C4ISR Architectures Working Group (https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA348197) para avaliar a capacidade de troca e compartilhamento de dados entre os sistemas de informação.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

algum tempo usado por outros países.

Os esforços para desenvolver o MDLP brasileiro surgiram antes dos conceitos e necessidades apontadas por [BRASIL, 2015a,b], mas a reconcepção da semântica do MDLP brasileiro aconteceu em 2018. Essa reconcepção transformou o MDLP em apenas um software capaz de trabalhar sobre qualquer hardware e permitiu que seu desenvolvimento fosse financiado pelo Ministério da Defesa do Brasil. A concepção sistêmica desse novo MDLP está mostrada em [Ramella, 2021], mas não é foco deste artigo. [Ramella, 2021] também mostrou a capacidade de o novo MDLP associar-se a diferentes arquiteturas de comunicações para integrar outros sistemas digitais, ampliando sua finalidade original, que estava atrelada apenas a EDT. A capacidade de trabalhar com múltiplos sistemas digitais permitiu evoluir do acrônimo MDLP para MDSP, um integrador de múltiplos sistemas digitais, que deverá incorporar outras capacidades, como a criptografia e a disponibilização de *Application Programming Interface* (API) para integração autônoma[8] de novos sistemas.

3. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem qualitativa, de natureza aplicada, fundamentada nos princípios da *Design Science Research* (DSR) [vom Brocke et al., 2020]. O objetivo central é propor e avaliar arquiteturas de comunicações com MDSP capazes de viabilizar a interoperabilidade entre sistemas digitais heterogêneos.

Para orientar e comunicar a lógica da pesquisa, adotou-se o *Framework DSR* [vom Brocke et al., 2020], que integra três elementos: *Ambiente* (problema e contexto), *Base de Conhecimento* (fundamentos teóricos e metodológicos) e o ciclo de *DSR* (*Criação* e *Avaliação*). A Figura 5 mostra a adaptação desse modelo ao contexto desta pesquisa, evidenciando a interação entre o ambiente operacional das FA brasileiras, os fundamentos doutrinários e técnicos e as etapas do *DSR* na modelagem e avaliação das arquiteturas propostas.



Figura 5: *Framework DSR* adaptado para esta pesquisa.

Adaptado de [vom Brocke et al., 2020].

As arquiteturas propostas foram derivadas de análises documentais e operacionais anteriores, com base nos requisitos observados em operações conjuntas e nas limitações identificadas nas soluções atualmente adotadas pelas FA brasileiras. A seleção das arquiteturas influenciou o desenvolvimento de protótipos funcionais de MDSP aplicáveis a todas elas, mantendo-se compatibilidade com a realidade dos sistemas digitais embarcados.

Esses protótipos foram empregados em Provas de Conceito (PoC) conduzidas em cenários reais controlados, simulando missões operacionais com troca automática de dados entre sistemas heterogêneos e replicando as condições e restrições de infraestrutura típicas de ambientes militares.

[8] A autonomia em questão oferece ao usuário do MDSP a possibilidade de integrar novos sistemas sem a necessidade de intervenção dos desenvolvedores do MDSP.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

Durante os experimentos, a equipe técnica coletou mensagens trocadas entre os MDSP e registros dos sistemas operacionais dos hardwares nos quais foram executados. As coletas permitiram observações qualitativas e discussões interpretativas sobre os comportamentos observados, servindo de base para a análise apresentada na Seção 5.

4. Proposta de Arquiteturas

Considerando-se as análises produzidas por [Ramella, 2021], que estudou arquiteturas de comunicações para prover a interoperabilidade entre EDT heterogêneos das FA brasileiras, é possível apontar quatro arquiteturas de comunicações a serem usadas pelos sistemas de dados: *Arquitetura em Cascata*, *Arquitetura Concentrada*, *Arquitetura Distribuída* e *Arquitetura Mista*.

4.1. Arquitetura em Cascata

Na *Arquitetura em Cascata*, mostrada na Figura 6, em que estão presentes quatro sistemas, o *gateway*, esfera de cor preta, que trabalha sempre como elemento de dois sistemas heterogêneos, deve ter todos os componentes de hardware e software que o permitam pertencer a dois sistemas simultaneamente. Em determinadas circunstâncias, cumprir essa exigência pode ser difícil.

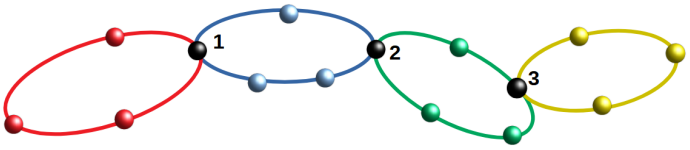


Figura 6: Arquitetura em Cascata.

Há pouca escalabilidade na *Arquitetura em Cascata* porque, se um *gateway* falhar, ele compromete a interoperabilidade de dois ou mais sistemas. Quanto maior o número de sistemas heterogêneos que devem interoperar, mais complicada e sujeita a erros é a situação de interoperabilidade. Percebe-se, na Figura 6, que: para os sistemas amarelo e vermelho interoperarem, os *gateways* 1, 2 e 3 deverão sempre estar presentes; em uma operação com os sistemas verde e azul, o *gateway* 2 deverá sempre estar presente; e, se os *gateways* 1 e 3 forem elementos pertencentes aos sistemas azul e verde apenas, esses sistemas deverão ceder seus elementos toda vez que os sistemas vermelho e amarelo quiserem interoperar.

4.2. Arquitetura Concentrada

Na *Arquitetura Concentrada*, mostrada na Figura 7, há apenas um *gateway*, que trabalha como elemento de todos os sistemas heterogêneos e que deve ter, portanto, os componentes de hardware e software que o permitam pertencer a todos os sistemas simultaneamente. Em determinadas circunstâncias, essa exigência pode ser impossível de cumprir.

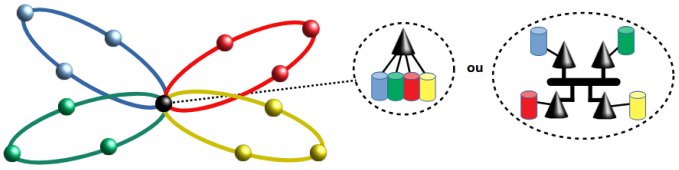


Figura 7: Arquitetura Concentrada.

Há muito pouca escalabilidade na *Arquitetura Concentrada* porque, se o gateway falhar, toda a interoperabilidade entre os sistemas estará comprometida. Quanto maior o número de sistemas heterogêneos que devem interoperar, pior a situação em questão. Comparando-se a Figura 6 e a Figura 7, percebe-se que a Arquitetura em Cascata e a *Arquitetura Concentrada* com apenas 2 sistemas cada uma são exatamente iguais.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

4.3. Arquitetura Distribuída

Na *Arquitetura Distribuída*, mostrada na Figura 8, quatro sistemas interoperam. Nota-se um enlace central, que opera como um sistema simples, com poucas tarefas na camada lógica da pilha de protocolos e cujo objetivo é apenas gerenciar o uso da camada física para que os elementos do enlace central transmitam seus dados sem perdas. Percebe-se, portanto, que a pilha de protocolos do sistema central é pequena quando comparada à pilha de protocolos dos demais sistemas. A arquitetura da Figura 8 é bastante escalável por estes dois motivos: a perda de um *gateway* só elimina a interoperabilidade do seu sistema; e um sistema, para interoperar, não precisa de um *gateway* pertencente a outros sistemas.

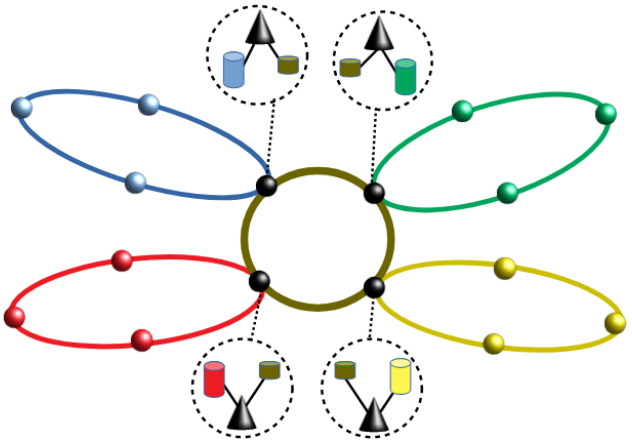


Figura 8: Arquitetura Distribuída.

O sistema central da *Arquitetura Distribuída* existe para que outros sistemas possam ser incorporados ao contexto e passem a interoperar. Se a Figura 8 for comparada à Figura 4, percebe-se que a infraestrutura permanente de comunicações da Figura 4 faz a função de enlace central, portanto pode-se afirmar que os MDSP de seus sistemas digitais, quando conectados por uma infraestrutura permanente de comunicações, configuram também uma *Arquitetura Distribuída* e desfrutam dos benefícios desse tipo de arquitetura.

Na Figura 9, a pilha de protocolos do enlace central foi materializada por equipamentos de radiofrequência (rádio), que serão os responsáveis por controlar o acesso ao meio eletromagnético e promover as comunicações entre os MDSP.

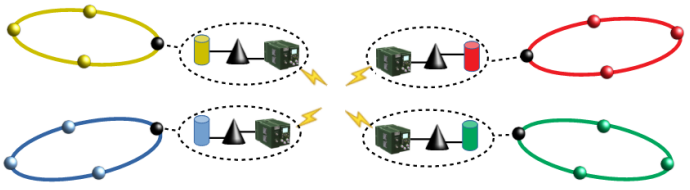


Figura 9: A pilha de protocolos do enlace central é materializada por um rádio.

A *Arquitetura Distribuída* foi selecionada por [Ramella, 2021] devido à sua versatilidade na solução de problemas relacionados à falta de interoperabilidade entre os EDT das Forças Armadas brasileiras. Essa abordagem oferece uma estrutura eficiente para a troca de dados entre MDSP, permitindo a interoperabilidade entre sistemas heterogêneos de diferentes plataformas.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

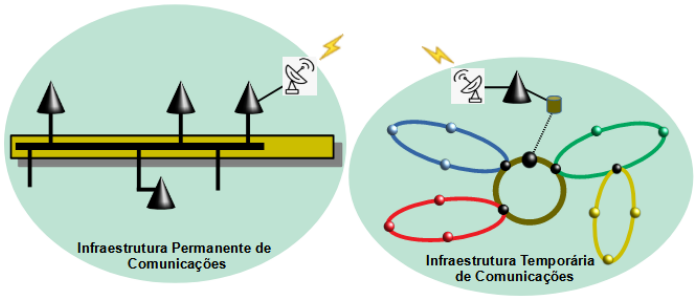


Figura 10: Arquitetura Mista.

4.4. Arquitetura Mista

Arquitetura Mista é aquela que combina, em um mesmo cenário, pelo menos dois dos três tipos de arquiteturas apontadas. A Figura 10 mostra um exemplo de *Arquitetura Mista* com dois cenários. No cenário com infraestrutura temporária, percebem-se uma *Arquitetura Distribuída* e outra arquitetura que pode ser a *Arquitetura em Cascata* ou a *Arquitetura Concentrada*. No cenário com infraestrutura permanente, percebe-se que a rede de MDSP configura um *Arquitetura Distribuída*, embora se tenham omitidos os sistemas aos quais os MDSP estão conectados. Na interação entre os dois cenários, realizada por outros dois MDSP, pode-se considerar a presença de uma *Arquitetura Distribuída* com dois elementos.

4.5. Escolha da Arquitetura de Comunicações

Depende de avaliações estratégicas a escolha da arquitetura de comunicações a ser usada em ambientes operacionais em que se almeja a interoperabilidade entre sistemas heterogêneos. Haja vista a diversidade de sistemas que podem interoperar, devem ser ponderadas, antes da escolha em questão, as condições operacionais das plataformas navais, aéreas e terrestres que serão empregadas. Citam-se algumas dessas condições operacionais: sistemas digitais que estarão disponíveis, características de cada sistema, quantos e quais sistemas devem interoperar, necessidades de sigilo e discrição nas comunicações, disponibilidade de infraestrutura permanente de comunicações, eficiência e eficácia das infraestruturas temporárias de comunicações. As avaliações são diversas e dependentes dos objetivos pretendidos.

Apesar da dificuldade de se definir a melhor arquitetura de comunicações a ser usada, é possível estabelecer algumas considerações:

1. A *Arquitetura Distribuída* sempre pode ser empregada em função de sua versatilidade, principalmente quando se deseja integrar sistemas heterogêneos cujas plataformas, por razões institucionais ou operacionais, não podem absorver outro sistema.

2. A *Arquitetura Distribuída* sob infraestrutura permanente de comunicações é bastante indicada para testes, pois minimiza a influência e a incerteza da pilha de protocolos do enlace central quando esse enlace é implementado por rádios. Dessa forma, o grau de incerteza do contexto diminui e é possível concentrar esforços na validação do protocolo de comunicações entre os MDSP e na integração do MDSP com os diversos sistemas que devem interoperar;

3. Nem sempre é factível instalar dois sistemas heterogêneos em um mesmo *gateway* em virtude de óbices operacionais, financeiros ou até mesmo institucionais. Entretanto, quando não houver tais óbices, o contexto de interoperabilidade for formado apenas pelos dois sistemas em questão e houver a possibilidade de se compor um *gateway* reserva, a *Arquitetura em Cascata* ou a *Arquitetura Concentrada* são opções de emprego consideráveis;

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

4. A *Arquitetura Concentrada* com o *gateway* operando com muitos sistemas em uma infraestrutura de comunicações baseada em rádios deve ser evitada porque o nível e a constância do sinal de RF no *gateway* denunciarão facilmente sua posição e o tornarão alvo fácil dos sistemas de combate das plataformas militares inimigas;

5. Avaliação Empírica e Resultados

A Figura 11 ilustra a Arquitetura Mista empregada em uma PoC voltada à integração de sistemas digitais heterogêneos, distribuídos geograficamente em diferentes cidades brasileiras: Rio de Janeiro (RJ), Rio Grande (RS), Porto Alegre (RS) e Brasília (DF). Essa arquitetura concretiza os princípios descritos na Seção 4, que propõe estruturas capazes de promover a interoperabilidade entre sistemas heterogêneos por meio da utilização do MDSP.

Durante a PoC, foram envolvidos cinco MDSP integrando estes cinco sistemas: um EDT aeronáutico, dois EDT navais e um sistema de C2 terrestre, todos classificados como sistemas do nível tático e localizados no Rio de Janeiro, em Rio Grande e em Porto Alegre; e um sistema de Comando e Controle (C2) do nível operacional, localizado em Brasília. Os ícones que compõem a figura representam as infraestruturas reais que foram empregadas. Assim, percebe-se que o EDT aeronáutico e o sistema de C2 terrestre utilizaram rádios, que se caracterizam como infraestrutura temporária de comunicações, enquanto os demais sistemas utilizaram a internet e redes locais cabeadas, que se caracterizam como infraestrutura permanente de comunicações.

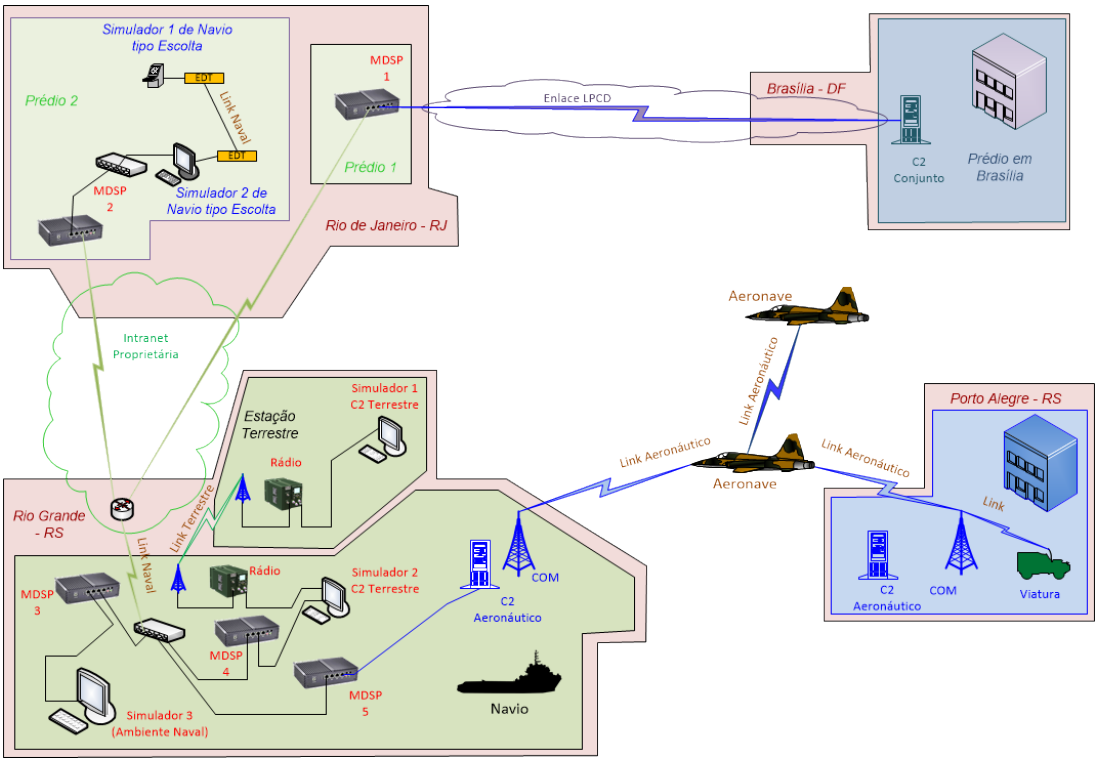


Figura 11: Arquitetura Mista empregada na PoC de integração de dados.

No Rio de Janeiro (RJ), dois prédios abrigam componentes distintos da simulação. O prédio 1 contém o MDSP 1, conectado diretamente a Brasília via enlace proprietário, configurando uma comunicação baseada em infraestrutura permanente. Já o prédio 2 integra dois sistemas digitais que simulam um EDT naval, conectado ao MDSP 2.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

No município de Rio Grande, observa-se uma complexa composição de sistemas e simuladores, representando o ambiente terrestre e naval. Estão presentes três instâncias de MDSP (MDSP 3, 4 e 5) que interligam um simulador de C2 terrestre, um EDT aeronáutico e um simulador de EDT naval. Esses componentes compartilham dados por infraestrutura temporária de comunicações, via rádio e rede cabeada *ad hoc*, o que reproduz o ambiente operacional real das FA, onde a conectividade é instável e sujeita a degradação. Destaca-se também a presença de uma unidade de C2 aeronáutico embarcada em navio, capaz de se comunicar com aeronaves e outros nós do sistema por meio do EDT aeronáutico, estabelecendo a interoperabilidade entre plataformas distintas (navais, terrestres e aéreas).

Já em Porto Alegre, um prédio equipado com C2 aeronáutico e antenas de comunicações conecta-se a uma viatura militar, configurando um sistema tático terrestre. Essa porção do sistema dialoga com o navio e as aeronaves por meio de enlaces táticos, compondo uma das pontas da rede de interoperabilidade. Por sua vez, Brasília abriga o sistema de C2 Conjunto, representado por um servidor centralizado, conectado ao MDSP 1 por meio de enlace proprietário, permitindo a supervisão central e agregação de dados em um nó de alto nível hierárquico.

Essa arquitetura, portanto, combina infraestruturas permanentes (como enlaces proprietários e internet) com infraestruturas temporárias (enlaces de rádio e redes cabeadas *ad hoc*), caracterizando-se como uma *Arquitetura Mista* conforme já definida. Essa abordagem mista permite aproveitar a robustez das conexões permanentes para funções de supervisão e controle, ao mesmo tempo em que mantém a flexibilidade e a mobilidade necessárias nas bordas operacionais.

Utilizando-se os símbolos da Figura 1, a Figura 11 pode ser traduzida na Figura 12 para identificar claramente todas as arquiteturas de comunicações envolvidas na *Arquitetura Mista* da PoC. Percebe-se, portanto, uma *Arquitetura Concentrada*, em que o *gateway* trabalha com 3 sistemas, e uma *Arquitetura Distribuída*, alicerçada em infraestrutura permanente, cuja pilha de protocolos está representada pelos cilindros de cor marrom ligados a todos os MDSP. A escolha dessa *Arquitetura Mista* mostrou-se adequada para o propósito em questão, que era avaliar a capacidade de o MDSP integrar todos os sistemas, apesar de a perda proposital da rede local do navio, executada durante a POC, ter provocado a desconexão dos MDSP 3, 4 e 5, isolando completamente os sistemas integrados por esses MDSP.

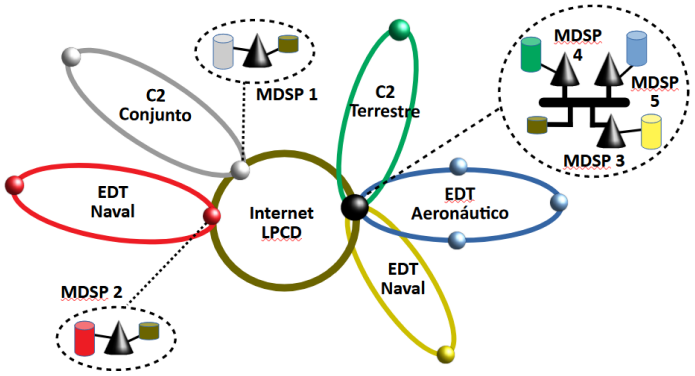


Figura 12: Arquitetura Mista empregada na PoC traduzida pela simbologia.

A adoção dessa *Arquitetura Mista* foi estratégica para a avaliação empírica da viabilidade técnica da proposta. Conforme discutido, ela se mostrou particularmente eficaz ao viabilizar a interoperabilidade entre sistemas que operam sob diferentes camadas físicas de comunicações, permitindo a troca automática e contínua de dados mesmo em condições adversas. Além disso, a estrutura modular e distribuída facilita a escalabilidade e a reconfiguração rápida do ambiente,

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

atributos indispensáveis para operações conjuntas em teatros reais.

[Cecilio et al., 2021], [Oliveira et al., 2020] e [Botelho et al., 2021] também elaboraram suas PoC para testar o desenvolvimento do software do então MDLP. Nesses trabalhos, utilizou-se a *Arquitetura Distribuída* sobre infraestrutura permanente de comunicações por seus atributos de versatilidade, robustez e escalabilidade e pela necessidade de se eliminarem todas as variáveis alheias ao desempenho do software do MDLP.

A *Arquitetura Distribuída*, apesar de suas características positivas, está sujeita a possíveis problemas decorrentes de diferenças dos sistemas quanto a taxas de geração, processamento e transmissão de dados. Tais problemas serão melhor estudados nas próximas fases de desenvolvimento do MDSP.

6. Conclusão

A análise conceitual e empírica desenvolvida permitiu identificar quatro arquiteturas de comunicações com MDSP – Cascata, Concentrada, Distribuída e Mista – voltadas à promoção da interoperabilidade entre sistemas digitais heterogêneos e com potencial de aplicação em cenários operacionais reais.

A POC conduzida em um cenário real controlado, envolvendo múltiplas localidades e diversos sistemas simulados, demonstrou que a *Arquitetura Distribuída*, quando associada a infraestruturas temporárias, oferece vantagens em termos de escalabilidade, segurança e modularidade. Já a *Arquitetura Mista* mostrou-se eficaz em contextos híbridos, nos quais coexistem infraestruturas permanentes e temporárias de comunicações, como verificado entre os nós de Brasília, Rio de Janeiro, Rio Grande e Porto Alegre.

Um importante achado deste estudo reside no papel do MDSP como elemento facilitador da interoperabilidade entre sistemas heterogêneos. Durante a PoC, o MDSP atuou como elemento integrador independente da camada física, mediando com sucesso a troca automática de dados entre plataformas navais, terrestres e aéreas, mesmo quando elas operavam sobre protocolos, modelos de dados e infraestruturas distintas.

Esse experimento marca um avanço inédito no contexto brasileiro ao demonstrar, pela primeira vez, a viabilidade de uma rede integrada de interoperabilidade tática sustentada por múltiplas instâncias do MDSP em um ambiente distribuído, controlado e realista. O cenário simulado contemplou, de forma explícita, um ambiente de C2 Conjunto, em que unidades das três FA operaram de forma coordenada e integrada.

Apesar das fragilidades e robustezas intrínsecas das arquiteturas de comunicações com MDSP aplicadas à interoperabilidade de sistemas digitais heterogêneos, saber identificá-las e corretamente aplicá-las é fundamental para garantir uma consciência situacional consistente no contexto de operações militares.

Os resultados coletados mostraram uma forte influência da arquitetura de comunicações nos parâmetros que definem o MDSP. Saber definir a arquitetura de comunicações a ser usada é o primeiro passo para a configuração do MSDP e para o sucesso da interoperabilidade dos sistemas táticos heterogêneos.

Propõe-se, como trabalho futuro, ampliar a avaliação das arquiteturas em ambientes operacionais completos, com envolvimento de usuários finais e a coleta de métricas quantitativas, de modo a complementar a análise qualitativa aqui conduzida. Espera-se que os resultados obtidos sirvam como base para a evolução doutrinária e tecnológica das capacidades de C2 das FA brasileiras.

7. Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FINEP/DCT/FAPEB (nº 2904/20-01.20.02-72.00), no âmbito do Projeto ”S2C2”.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br

Referências

Botelho, T. d. A. T., Cecilio, E. L., e Oliveira, A. F. d. (2021). A distributed architecture for tactical data link interoperability. In *Anais do 26th ICCRTS*, Québec, Canadá. International Command and Control Institute. URL https://internationalc2institute.org/2021-track-6.

BRASIL, E.-M. C. d. F. A. (2015a). *MD31-M-03 - Doutrina para o Sistema Militar de Comando e Controle*. Ministério da Defesa, Brasília, DF, 3ª edition. URL https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/doutrina_militar/lista_de_publicacoes/md31a_ma_03a_douta_sismca_3a_eda_2015.pdf.

BRASIL, E.-M. C. d. F. A. (2015b). *MD31-S-02 - Conceito de Operações do Sistema Militar de Comando e Controle*. Ministério da Defesa, Brasília, DF, 1ª edition. URL https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ajuste-01/doutrina_militar/lista_de_publicacoes/md31a_sa_02a_conopsa_sismca_1a_eda_2015.pdf.

BRASIL, M. d. D. (2015c). *MD35-G-01 – Glossário das Forças Armadas*. Ministério da Defesa, Brasília, DF, 5ª edition. URL https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ajuste-01/legislacao/emcfa/publicacoes/doutrina/md35-G-01-glossario-das-forcas-armadas-5-ed-2015-com-alteracoes.pdf/view.

Cecilio, E. L., Botelho, T. d. A. T., Oliveira, A. F. d., e Calvelli, J. E. (2021). Multi data link processor: Mdlp-defesa. In *XXIII SIGE*. Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa. URL https://www.sige.ita.br/wp-content/uploads/2021/09/218307_1.pdf.

Hossain, K. (2023). Analysis of importance of tactical data link (tdl) in military domains in 21st century. *Scientific Research Journal*, 10:70–94. URL https://www.scirj.org/papers-0823/scirj-P0823957.pdf.

Oliveira, A. F. d., Cecilio, E. L., e Botelho, T. d. A. T. (2020). A distributed architecture for tactical data link interoperability. In *Anais do 25th ICCRTS*. International Command and Control Institute. URL https://drive.google.com/file/d/1298hi3vAKt9unJdpmGjopfwgPKa2pIoe/view.

Ramella, I. (2021). Uma arquitetura de comunicações para a interoperabilidade das forças armadas brasileiras. Master's thesis, Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, RJ. URL https://www.marinha.mil.br/egn/sites/www.marinha.mil.br.egn/files/011CPEM2021_TESEFINAL_CMGENITALO.pdf.

vom Brocke, J., Hevner, A., e Maedche, A. (2020). *Introduction to Design Science Research*, p. 1–13. Springer International Publishing, Cham. ISBN 978-3-030-46781-4. URL https://doi.org/10.1007/978-3-030-46781-4_1.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212196
https://proceedings.science/p/212196?lang=pt-br