

Modelagem e Simulação como Serviço: Uma Prova de Conceito para o Domínio Espacial Baseada em SpaceFOM e Federados HLA Containerizados

Me. João Rodolfo de Oliveira Rosa¹ e Prof. Dr. Álvaro Luiz Fazenda¹

¹Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo Avenida Cesare Mansueto Giulio Lattes, 1201, Eugênio de Mello, São José dos Campos, SP, 12247-014, Brasil

Resumo—A complexidade dos sistemas espaciais e os custos associados ao seu desenvolvimento tornam essenciais tanto a adoção de simuladores quanto abordagens que favoreçam sua integração, reuso e interoperabilidade. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma prova de conceito de simulação distribuída baseada na proposta de oferta de serviços de simulação, Arquitetura de Alto Nível (HLA, ou *High Level Architecture*) e no padrão SpaceFOM, utilizando um RTI de código aberto, o PORTICO. A solução proposta demonstra a viabilidade de integração entre diferentes componentes de sistemas satelitais — especificamente dinâmica orbital e controle — por meio de um modelo de dados padronizado. Os resultados obtidos evidenciam o potencial da abordagem para a redução de custos, aumento da reutilização de ativos de simulação e facilitação da colaboração entre organizações. Além disso, o trabalho aponta oportunidades para a aplicação em gêmeos digitais e validação de sistemas espaciais, bem como para o estabelecimento de parcerias entre a indústria, a academia e o governo no desenvolvimento de um ecossistema de negócios relacionado a serviços de simulação.

Palavras-Chave— Modelagem e Simulação como Serviço, HLA e SpaceFOM.

I. INTRODUÇÃO

As atividades relacionadas ao domínio espacial brasileiro remontam à década de 1960, com os primeiros resultados obtidos com o desenvolvimento dos foguetes da família SONDA, de acordo com [1]. Alguns dos interesses relacionados à política espacial brasileira são comuns aos interesses dos demais países emergentes: pequenos satélites, habilidades de lançamento e independência em relação aos sistemas de satélites de posicionamento global.

No contexto brasileiro, acrescentam-se os interesses em satélites de observação, como o Amazonia-1, lançado em fevereiro de 2021 a partir do Centro de Lançamento de Sriharikota, na Índia.

A indústria espacial é fortemente centrada na cidade de São José dos Campos, com muitas das empresas criadas a partir da indústria aeronáutica e de defesa, tendo um histórico de parcerias internacionais e enfrentando uma recorrente dificuldade na obtenção de recursos.

Considerando o cenário apresentado, este trabalho tem como premissa que a redução de custos e o aumento da integração entre os diversos atores do setor são fatores-chave para o fortalecimento da indústria espacial brasileira.

Desta maneira, o objetivo deste artigo é apresentar uma prova de conceito de modelagem e simulação como serviço

para o domínio da indústria espacial, utilizando o SpaceFOM, um padrão aberto desenvolvido de forma colaborativa entre governo, indústria e academia, cujo objetivo é facilitar o desenvolvimento de simulações interoperáveis.

A. Desafios de interoperabilidade e reuso de simuladores

De acordo com [2], a simulação tem sido uma tecnologia fundamental para o domínio espacial, e muitas vezes um único simulador não é suficiente para que se alcancem os objetivos estabelecidos, sendo necessária a sua integração com outros existentes.

Ainda nos anos 90, como apresentado por [3], não era possível contabilizar o número de simuladores utilizados pelo Departamento de Defesa norte-americano. Cada organização que identificava a necessidade de implementação o fazia sem que houvesse a preocupação com o reuso de seus componentes ou com sua interoperabilidade.

Integrar diversas tecnologias relacionadas à simulação, implementadas de forma independente, de modo que, para os usuários, se apresentassem como um sistema maior que não fosse somente a soma dos componentes integrados, motivou o desenvolvimento de uma arquitetura de simulação que está na origem da HLA, como observado por [3].

Outro aspecto relevante refere-se às dificuldades relacionadas ao tempo de implementação, à necessidade de pessoal especializado e aos custos de uma infraestrutura de servidores e estações de trabalho utilizados na construção de sistemas de simulação. [4] aborda essas dificuldades e cita os relativamente recentes avanços tecnológicos relacionados à *cloud computing* e às arquiteturas relacionadas a serviços como forma de mitigá-las.

A disponibilização de uma infraestrutura que suporte os usuários na utilização de aplicações relacionadas à modelagem e simulação de forma ágil e sob demanda trata-se, inclusive, de um dos objetivos da Organização do Tratado do Atlântico Norte, operacionalizado, principalmente, pelos Grupos de Modelagem e Simulação (NMSG) 131 e 136 ([5] e [6]).

B. Proposta para simulação distribuída no domínio espacial

A indústria aeroespacial apresenta uma série de desafios, principalmente relacionados aos riscos e altos custos envolvidos. [7] acrescenta a complexidade relacionada aos requisitos de projeto de sistemas espaciais e às mudanças ocorridas durante a sua implementação, impactando diretamente o custo e o cronograma definidos.

É neste contexto que [2] e [7] descrevem as possibilidades do emprego de simuladores na área espacial, que incluem as fases de projeto, engenharia, treinamento e operações, considerando que a simulação distribuída, incluindo a de grande escala, possibilita a integração de modelos entre organizações distintas.

[8] destaca que a simulação contribui para o desenvolvimento de tecnologias e métodos inovadores ao disponibilizar plataformas virtuais para testes que replicam as condições espaciais. Os autores também apontam que a simulação distribuída possibilita que a simulação de sistemas espaciais complexos seja realizada de forma que subsistemas ou componentes menos complexos sejam implementados e integrados. Além disso, operações conjuntas de diferentes agências podem ser realizadas, a despeito da dispersão geográfica.

A HLA, enquanto solução para a superação dos desafios da simulação distribuída, é uma alternativa para o domínio espacial e vem sendo empregada desde a década de 1990. Por sua vez, diante dos custos e dificuldades apresentados na última década, a comunidade de simulação vem empreendendo esforços para a disponibilização de serviços em nuvem.

Em relação ao domínio espacial, ao utilizar o SpaceFOM, a HLA possibilita que, a partir de uma série de dados históricos ou dados integrados a um sistema físico, gêmeos digitais — uma das principais tecnologias da indústria 4.0 — contribuam para o processo de engenharia de novos produtos.

C. Principais contribuições e resultados da prova de conceito

A prova de conceito implementada buscou apresentar e demonstrar a viabilidade da utilização de contêineres para a disponibilização de serviços de simulação e o emprego do SpaceFOM, a partir da utilização de RTI de código aberto, evidenciando sua viabilidade para a indústria espacial brasileira e contribuindo para posicioná-la, no domínio da simulação, ao lado dos principais atores globais.

Buscou-se, a partir do integrador de código aberto, demonstrar a viabilidade da implementação sem que houvesse dependência de soluções proprietárias, e a federação implementada, composta por dois federados, apesar de mínima, é bastante significativa por integrar dois subsistemas reais do domínio satelital: a dinâmica orbital e o controle de satélites.

Como principal resultado, demonstra-se uma abordagem viável para a integração de simuladores no domínio espacial, disponibilizados na forma de serviços e com a utilização de um padrão aberto e viável. Essa abordagem é aplicável desde as fases de projeto de sistemas de satélites até sua operação, além de indicar potencial para uso futuro em aplicações de gêmeos digitais.

O principal trabalho relacionado a esta pesquisa é apresentado em [9]. Embora proponha uma arquitetura para a containerização de federações HLA, o estudo aborda um domínio distinto do espacial, que é o foco da presente pesquisa.

II. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS E TECNOLÓGICOS

As tecnologias básicas para o entendimento de como a simulação distribuída se aplica ao domínio espacial são apresentadas nesta seção. Inicialmente, são apresentados os conceitos da HLA; em seguida, o SpaceFOM, um dos componentes da arquitetura, implementado especificamente para

padronizar o compartilhamento de dados em sistemas espaciais; por último, são apresentadas a modelagem e a simulação como serviços.

A. Arquitetura de Alto Nível (HLA)

A HLA é a especificação técnica de uma arquitetura que tem por objetivo facilitar a integração de sistemas e ativos de simulação, como sensores para coleta de dados, promovendo a interoperabilidade e o reuso de seus componentes, de acordo com [10].

Trata-se de um padrão definido pela IEEE 1516 (*Institute of Electrical and Electronics Engineers 1516*), a partir das discussões e recomendações da SISO. A IEEE 1516 é composta por um conjunto de 5 especificações voltadas para o desenvolvimento de aplicações de simulações distribuídas, sendo três delas especificamente voltadas para a HLA, apresentadas na tabela I.

TABELA I
PADRÕES IEEE 1516 - ADAPTADO DE [11]

Padrão	Definição
IEEE 1516 - 2010	Padrão IEEE para modelagem e simulação (M & S) – Regras e Estrutura da HLA, 18 de agosto de 2010.
IEEE 1516.1 - 2010	Padrão IEEE para M & S – Especificação da Interface de Federado HLA, 18 de agosto de 2010.
IEEE 1516.2 - 2010	Padrão IEEE para M & S – Especificação do Template para Modelo de Objeto HLA, 18 de agosto de 2010.
IEEE 1516.3 - 2010	Padrão IEEE para M & S – Práticas recomendadas pela IEEE para desenvolvimento de federação e execução de processos, 23 de abril de 2003.
IEEE 1516.4 - 2010	Padrão IEEE para M & S – Práticas recomendadas pela IEEE para verificação, validação e acreditação de uma federação: sobreposição da FEDEP HLA, 20 de dezembro de 2007.

Os principais componentes da HLA são especificados na documentação apresentada na tabela I. A primeira delas refere-se aos federados, à federação e às regras que a eles se aplicam, definindo suas responsabilidades. A segunda define a interface entre os federados e o middleware que os integra: o RTI (**Runtime Infrastructure**). A terceira trata da documentação que padroniza as informações compartilhadas

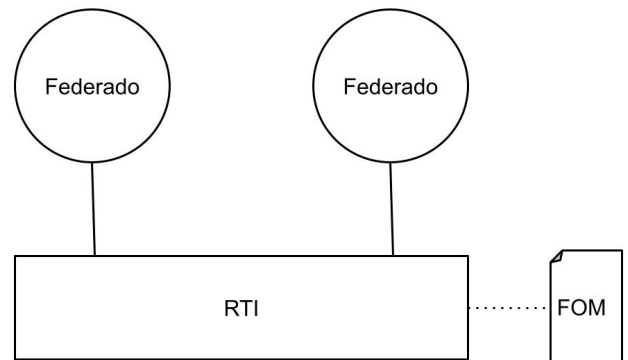


Fig. 1. Representação de uma federação.

entre os federados no contexto de uma federação; trata-se do modelo de objetos da federação, ou FOM (sigla para **Federation Object Model**). A figura 1 apresenta essa arquitetura.

Os federados se comunicam com o RTI por meio de uma interface, compartilhando as informações previamente definidas no FOM e, por não compartilharem detalhes de sua implementação, possibilitam a proteção de tecnologias proprietárias.

O FOM, central para a compreensão do SpaceFOM, é um documento único ou composto por módulos, em formato de tabela ou XML, que define a estrutura das informações compartilhadas entre os federados, como os objetos e as interações.

O desenvolvimento conjunto de um sistema de acoplagem do veículo de transferência automática da Agência Espacial Europeia ao segmento russo da Estação Espacial Internacional, baseado em HLA, é um marco para a simulação distribuída, como apresentado por [2], servindo de base para diversos desenvolvimentos posteriores.

B. SpaceFOM

Considerando o emprego da simulação nas diversas fases da indústria espacial, os ganhos são percebidos na engenharia de sistemas, no treinamento de operadores, na análise de cenários e de missões e no apoio às missões.

Ao considerar ainda a interoperabilidade, a compatibilidade e a reusabilidade como as grandes facilidades da HLA, pode-se concluir sobre seus benefícios para a indústria aeroespacial, ao possibilitar a integração de simuladores em um ambiente colaborativo, com o reuso de sistemas existentes em novos contextos.

Mesmo antes da criação do SpaceFOM, de acordo com [12], a HLA era amplamente utilizada pela indústria aeroespacial para o projeto de simuladores interoperáveis nos Estados Unidos e em alguns países asiáticos, sem que houvesse uma padronização das informações compartilhadas, o que elevava os custos a longo prazo.

Identificou-se, assim, uma lacuna referente à padronização das informações compartilhadas entre sistemas de simulação, o que motivou a criação do padrão SISO-STD-018-2020, o SpaceFOM, com a participação de membros governamentais, da academia e da indústria. Trata-se de um documento com o texto explicativo de seus aspectos e uma coletânea de arquivos dos módulos em formato XML. Seu principal objetivo, segundo [8], foi melhorar a interoperabilidade, a reutilização e a extensibilidade dos sistemas de simulação baseados em HLA.

[2] apresenta uma das principais motivações para o desenvolvimento do SpaceFOM, que foi o desenvolvimento colaborativo de sistemas de exploração espacial entre a Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (NASA), a Agência Espacial Europeia (ESA) e a Agência Japonesa para Exploração Aeroespacial (JAXA).

[8] aponta para o fato de que o SpaceFOM foi utilizado pela NASA como base para a arquitetura de simulação no contexto do projeto Artemis.

O [13] define os principais conceitos que devem ser implementados para que uma federação seja compatível com o SpaceFOM. Essas áreas são descritas a seguir:

- Papéis e responsabilidades, com destaque para três deles: o *master federate*, responsável pelo gerenciamento da

federação, como a inicialização de processos; o *pacing*, responsável pela gestão do tempo e pela sincronização da federação; e o *Root reference frame publisher*, responsável pela árvore de referência de quadros, com o objetivo de localizar os objetos;

- Tipos comuns de dados, definidos nos módulos disponibilizados, em formato XML e que podem ser estendidos;
- Linhas do tempo e representação do tempo: além do tempo físico definido, o SpaceFOM define uma série de outras linhas do tempo úteis para a sincronização do tempo em uma federação em execução;
- Gerenciamento do tempo, definido com um avanço de tempo específico;
- Quadros de referência, definidos na forma de um sistema hierárquico e flexível, usados para o posicionamento das entidades. É definida uma relação hierárquica entre os quadros usados para o posicionamento. A figura 2, adaptada de [13], a exemplifica;
- Convenção de nomes dos quadros de referência: o SpaceFOM define as regras a serem seguidas para nomear os quadros de referência. Além de serem únicos e descritivos, devem seguir algumas regras de sintaxe.
- Entidades e interfaces, baseadas nos componentes necessários para a implementação de complexos sistemas espaciais. Os componentes definidos são as entidades físicas, dinâmicas e as interfaces físicas;
- Controle de Execução é a estrutura de controle provida pelo SpaceFOM, que envolve a sincronização do tempo de execução da federação, a conexão de novos federados e ainda o congelamento ou desligamento dessa federação;
- Módulos do FOM: o SpaceFOM é composto por 5 módulos em formato XML, *SISO_SpaceFOM_Switches*, *SISO_SpaceFOM_datatypes*, *SISO_SpaceFOM_management*, *SISO_SpaceFOM_environment* e *SISO_SpaceFOM_entity*, como apresentado na figura 3;
- Regras e orientações: para cada um dos tópicos tratados na documentação, há uma seção de regras que pode ser utilizada como um guia para aquele tópico. São definidas algumas regras, sua motivação e justificativa.

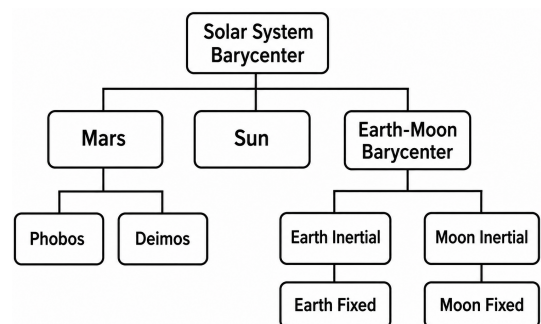


Fig. 2. Exemplo de árvore de referência. Extraída de [13]

Cada um dos módulos do FOM descreve as informações e as interações necessárias para a configuração, a consistência nos tipos de dados utilizados, a coordenação da execução da federação, os parâmetros relacionados aos ambientes e a representação física das entidades.

O módulo MIM refere-se ao *Management and Initialization Module*, utilizado como padrão para uma federação HLA e

SISO_SpaceFOM_entity	
SISO_SpaceFOM_environment	SISO_SpaceFOM_management
SISO_SpaceFOM_datatypes	
SISO_SpaceFOM_switches	
MIM	

Fig. 3. Estrutura de módulos do SpaceFOM. Extraída de [8]

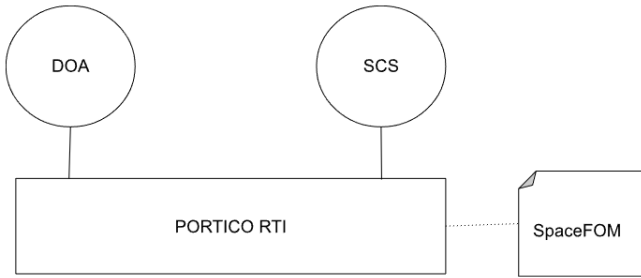


Fig. 4. Representação da federação Implementada.

que permite seu controle e monitoramento. Como descrito em [10], o MIM contém as estruturas dos objetos e interações previamente definidas, como as relacionadas ao transporte da informação e aos tipos de dados.

C. Modelagem e Simulação como Serviço

Como observado por [14], a tendência relacionada aos serviços em nuvem também contribui para o campo da modelagem e simulação. Os autores destacam que parte dessa contribuição se deve à diminuição dos custos com equipamentos dedicados e à redução do tempo utilizado na implantação de sistemas e na sua manutenção.

Tal contribuição foi observada também pelo NMSG-131 ([15]), que, após pesquisa, recomendou uma investigação detalhada relacionada ao tema, o que foi objeto de estudo do NMSG-136.

A abordagem da modelagem e simulação como serviço é definida nos seguintes documentos:

- MSaaS Documento Operacional Conceitual;
- MSaaS Política e Governança;
- MSaaS Relatório de Avaliação do Conceito e da Arquitetura de Referência;
- MSaaS Volume 1 - Arquitetura de Referência;
- MSaaS Volume 2 - Metadados e Descoberta de Serviços;
- MSaaS Volume 3 - Processo de Engenharia de Referência;
- MSaaS Volume 4 - Relatório de Experimentação

A arquitetura proposta para a modelagem e simulação como serviço beneficia tanto os usuários dos serviços de simulação quanto os provedores desses serviços, que podem oferecê-los por meio de um portal. Os usuários, por sua vez, ao acessarem o portal, podem descobrir os serviços oferecidos, compor novos serviços e executá-los.

As recomendações contidas nos diversos documentos analisados indicam a utilização de contêineres Docker, considerando a menor utilização de recursos computacionais quando comparados às máquinas virtuais e a praticidade e agilidade na implantação das aplicações.

III. PROVA DE CONCEITO: ARQUITETURA E IMPLEMENTAÇÃO

Nesta seção, apresenta-se o conjunto de tecnologias utilizadas, com destaque para a containerização dos simuladores utilizados, o SpaceFOM e o RTI PORTICO.

A. Arquitetura da federação

Foram implementados dois federados: o DOA (Dinâmica Orbital e Ambiente) e o SCS (Sistema de Controle de Satélite). A figura 4 ilustra a federação implementada.

O DOA é o componente central da federação, pois é ele quem gera os dados de estado (ambiente físico) do satélite. O estado do satélite é a sua orientação no espaço. O DOA simula um estimador de estado, descrito por [16], que recebe os dados dos sensores de atitude do satélite e os processa.

O SCS, por sua vez, pode representar tanto uma estação em Terra que recebe os dados do DOA e os compara com valores de referência, com o objetivo de corrigir eventuais erros, quanto um computador a bordo do satélite que realiza a mesma tarefa, agindo nos atuadores a fim de corrigir os erros verificados.

Os federados foram implementados em Java, *OpenJDK 21.0.8 LTS* e Eclipse IDE. Para a execução da federação. Após a implementação, foram gerados os arquivos no formato JAR, os quais foram exportados para os contêineres previamente configurados e as imagens criadas. As bibliotecas necessárias para a execução do RTI foram adicionadas como dependências, utilizando o gerenciador de dependências Maven.

Os contêineres foram executados em uma máquina virtual Ubuntu 22.04, e sua comunicação se deu através da rede interna do Docker.

B. PORTICO

Trata-se de uma implementação de RTI de código aberto, desenvolvida com o objetivo de assegurar o livre acesso à infraestrutura necessária para executar uma federação, segundo a equipe responsável pelo seu desenvolvimento ([17]).

Foi desenvolvido na linguagem de programação Java, com a atualização estável mais recente (PORTICO v2.1.3 Release), utilizando a JDK 21, disponibilizada em maio de 2024.

O PORTICO utiliza a biblioteca Java JGroups para a comunicação entre os federados. Segundo [18], a biblioteca JGroups implementa o paradigma de comunicação indireta em sistemas distribuídos, no qual não há comunicação direta entre os remetentes e os destinatários das mensagens compartilhadas.

A configuração do RTI é feita por meio de um arquivo de inicialização denominado RID (*RTI Initialization Data*), que possibilita ajustar vários parâmetros de execução, como o tamanho dos pacotes compartilhados e os dados necessários para o roteamento entre redes distintas.

O principal aspecto que contribui para uma avaliação negativa da usabilidade do PORTICO é a falta de uma interface

gráfica, e toda a interação com o RTI ocorre por meio da linha de comando. Tal aspecto foi abordado por [19], ao avaliar a viabilidade de um RTI de código aberto para simulações distribuídas de tempo real.

Para este estudo de caso, como já abordado por [9], a utilização do PORTICO contribuiu para a flexibilização da oferta dos serviços, pois cada um dos contêineres possuía o seu componente RTI local, necessário para a execução da federação.

IV. RESULTADOS E ANÁLISE

Além de detalhes da implementação, com destaque para os módulos do SpaceFOM utilizados, esta seção aborda alguns aspectos relacionados às possibilidades da simulação como serviço e à interoperabilidade de sistemas com a HLA.

A. Funcionamento da Federação

Após a inicialização do contêiner com o federado DOA, ele conectava-se ao componente local do RTI, carregava os módulos do FOM, criava a federação SCSFederation e conectava-se a ela, aguardando a conexão de novos federados.

De forma análoga, após a inicialização do contêiner com o federado SCS, ele conectava-se ao RTI, carregava os módulos do FOM, tentava criar a federação, caso ela ainda não existisse; conectava-se, então, à federação existente e também entrava em modo de espera. As figuras 5 e 6 ilustram a execução de ambos os federados.

```
root@d655f61abc14:/app# java -jar -Djava.net.preferIPv4Stack=true DoaFederation.jar
DOA Federate : Creating RTIAmbassador
DOA Federate : Connecting...
DOA Federate : Creating Federation...

.....
GMS: address=d655f61abc14-1830, cluster=SCSFederation, physical address=172.17.0.2:37369
.....
20:23:12.028 WARN [main] portico.lrc.jgroups: No co-ordinator found - appointing myself!
DOA Federate : Joined Federation as DOA
FederateAmbassador: Successfully registered sync point: ReadyToRun
FederateAmbassador: Synchronization point announced: ReadyToRun
DOA Federate : >>>>>>> Press Enter to Continue <<<<<<<<
I am coordinator - received request for me from 7c51a3df-f6cb-44a2-b9d8-c2ce90ef9006

DOA Federate : Achieved sync point: ReadyToRun, waiting for federation...
FederateAmbassador: Federation Synchronized: ReadyToRun
DOA Federate : Time Policy Enabled
DOA Federate : Published and Subscribed
DOA Federate : Registered Object, handle = 2
FederateAmbassador: Discovered Object handle = 2097153, classHandle = 741, name = HLA2097153
DOA Federate : Time advanced to 1.0
DOA Federate : Time advanced to 2.0
DOA Federate : Time advanced to 3.0
DOA Federate : Time advanced to 4.0
DOA Federate : Time advanced to 5.0
DOA Federate : Time advanced to 6.0
DOA Federate : Time advanced to 7.0
DOA Federate : Time advanced to 8.0
DOA Federate : Time advanced to 9.0
DOA Federate : Time advanced to 10.0
DOA Federate : Time advanced to 11.0
DOA Federate : Time advanced to 12.0
DOA Federate : Time advanced to 13.0
DOA Federate : Time advanced to 14.0
DOA Federate : Time advanced to 15.0
DOA Federate : Time advanced to 16.0
DOA Federate : Time advanced to 17.0
DOA Federate : Time advanced to 18.0
DOA Federate : Time advanced to 19.0
DOA Federate : Time advanced to 20.0
root@d655f61abc14:/app#
```

Fig. 5. Federado SCS em execução

Foram utilizados 2 módulos do SpaceFOM: o *SISO_SpaceFOM_datatypes* e o *SISO_SpaceFOM_Entity*, ambos descritos em [13]. Do *SISO_SpaceFOM_Entity* foi implementada a classe do *PhysicalEntity*, representando uma entidade única, localizada no tempo e no espaço.

Dos vários atributos do *PhysicalEntity*, foram utilizados o atributo *name* e o atributo *SpaceTimeCoordinateState*, que faz parte do módulo *SISO_SpaceFOM_datatypes*. Trata-se de um objeto com 3 dimensões de espaço (*ReferenceFrameTranslation*), 3 dimensões de atitude (*ReferenceFrameTranslation*) e uma dimensão de tempo.

```
root@d17e30cc431:/app# java -jar -Djava.net.preferIPv4Stack=true SCSFederation.jar
SCS Federate : Creating RTIAmbassador
SCS Federate : Connecting...
SCS Federate : Creating Federation...

.....
GMS: address=d17e30cc431-53645, cluster=SCSFederation, physical address=172.17.0.3:48142
.....
20:23:26.103 ERROR [main] portico.lrc.jgroups: FAILURE createFederation: already exists, name=SCSFederation
SCS Federate : Didn't create federation, it already existed
FederateAmbassador: Synchronization point announced: ReadyToRun
SCS Federate : Joined Federation as SCS
SCS Federate : >>>>>>> Press Enter to Continue <<<<<<<<

SCS Federate : Achieved sync point: ReadyToRun, waiting for federation...
FederateAmbassador: Failed to register sync point: ReadyToRun, reason = SYNCHRONIZATION_POINT_LABEL_NOT_UNIQUE
FederateAmbassador: Federation Synchronized: ReadyToRun
SCS Federate : Time Policy Enabled
SCS Federate : Published and Subscribed
SCS Federate : Registered Object, handle = 2097153
SCS Federate : PhysicalEntity [name=Din?mica Orbital, state=10.0]
FederateAmbassador: Discovered Object handle = 2, classHandle = 741, name = HLA2
FederateAmbassador: Reflection for object: handle=2, tag=(timestamp) 1782678219855, time=0, attributeCount=1
attributeHandle=747 -> SpaceTimeCoordinateState [time=0.0, x=1.0, y=10.0, z=0.0, vx=0.0, vy=1.0, vz=0.0]

SCS Federate : Time advanced to 1.0
SCS Federate : PhysicalEntity [name=Din?mica Orbital, state=10.0]
FederateAmbassador: Reflection for object: handle=2, tag=(timestamp) 1782678219961, time=0, attributeCount=1
attributeHandle=747 -> SpaceTimeCoordinateState [time=1.0, x=2.0, y=20.0, z=0.0, vx=0.0, vy=1.0, vz=0.0]

SCS Federate : Time advanced to 2.0
SCS Federate : PhysicalEntity [name=Din?mica Orbital, state=10.0]
FederateAmbassador: Reflection for object: handle=2, tag=(timestamp) 1782678220061, time=0, attributeCount=1
attributeHandle=747 -> SpaceTimeCoordinateState [time=2.0, x=3.0, y=30.0, z=0.0, vx=0.0, vy=1.0, vz=0.0]

SCS Federate : Time advanced to 3.0
SCS Federate : PhysicalEntity [name=Din?mica Orbital, state=10.0]
FederateAmbassador: Reflection for object: handle=2, tag=(timestamp) 1782678220162, time=0, attributeCount=1
attributeHandle=747 -> SpaceTimeCoordinateState [time=3.0, x=4.0, y=40.0, z=0.0, vx=0.0, vy=1.0, vz=0.0]

SCS Federate : Time advanced to 4.0
```

Fig. 6. Federado SCS em execução

Para esta prova de conceito, foram implementadas somente duas dimensões: o *ReferenceFrameTranslation* e o tempo. O *SpaceFrameTranslation* foi implementado com seus 2 atributos: o de posição e o de velocidade, que são, além do tempo, os valores atualizados durante a execução da federação.

Foram definidas 20 iterações, durante as quais os valores de posição, da velocidade do federado DOA e do tempo foram atualizados e publicados para assinatura do federado SCS. Para cada atualização dos valores de posição e de velocidade do DOA, era solicitado o avanço do tempo, com incremento de 1 segundo.

B. Interoperabilidade

Apesar de as aplicações serem implementadas na mesma linguagem (Java) e de serem executadas em um mesmo *host*, a comunicação entre elas se deu através da rede interna disponibilizada pelo Docker, e a interoperabilidade dependia exclusivamente das mensagens enviadas e recebidas a partir do RTI, com o formato previamente definido nos módulos do SpaceFOM e nas interfaces da HLA.

A interface HLA e o RTI asseguram a interoperabilidade sintática, considerando ainda que as mensagens são codificadas antes do envio para o RTI e decodificadas pelo federado assinante ao recebê-las. No entanto, a interoperabilidade semântica é assegurada pelo SpaceFOM.

O contêiner DOA poderia, sem quaisquer prejuízos, ser substituído por um *hardware (hardware-in-the-loop)* ou utilizar uma série de dados históricos, dependendo dos objetivos da simulação.

O gerenciamento do tempo, um desafio inerente a ambientes distribuídos, constitui um dos principais mecanismos da HLA para garantir a interoperabilidade. Nesse contexto, o avanço do tempo em um federado só é concedido pelo RTI após a garantia de que todos os demais federados já receberam e processaram as mensagens com *timestamp* anterior ao instante solicitado.

C. Limitações observadas

A validação da proposta foi conduzida por meio de protótipos simplificados, adequados a uma avaliação preliminar do uso do SpaceFOM e da HLA no domínio espacial. Contudo, a ausência de simuladores de maior fidelidade e de dados reais configura uma limitação do estudo, restringindo a profundidade das análises realizadas.

Não foi possível, ainda, devido à infraestrutura utilizada, realizar testes de desempenho ou resiliência da federação, principalmente no que se refere à escalabilidade. A execução remota dos contêineres em uma instância virtualizada em nuvem, por exemplo, possibilitaria avaliar métricas de desempenho da federação, como a latência na transmissão de pacotes compartilhados.

Além disso, devido às restrições de infraestrutura, não foram implementados o *pacing federate* e o *frame publisher*, o que, apesar de caracterizar uma limitação da implementação, não a inviabilizou, tendo em vista que o principal objetivo era apresentar o SpaceFOM e uma prova de conceito relacionada à simulação como serviço.

V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A abordagem de modelagem e simulação como serviço é uma tendência de pesquisa na oferta de serviços de simulação. Compreender parte da arquitetura proposta, além de implementar e apresentar uma prova de conceito, da forma como foi elaborada, contribui para a construção de um ecossistema de negócios relacionado ao tema no contexto brasileiro.

É importante considerar que a HLA é utilizada pelos principais atores globais, como a NASA e a ESA; utilizá-la no cenário brasileiro contribui para uma maior integração da indústria espacial nacional ao cenário global. O uso de um RTI de código aberto contribui para o domínio tecnológico, resultando na consequente independência em relação a tecnologias proprietárias, além da diminuição dos custos de implementação.

A integração de simuladores de subsistemas de satélites, utilizando HLA e compartilhando dados previamente definidos no SpaceFOM, aponta para a possibilidade de que gêmeos digitais satelitais possam também ser integrados e utilizar dados reais de seu gêmeo físico ou de uma base de dados histórica, contribuindo para o desenvolvimento de novas tecnologias ou viabilizando o treinamento de equipes na operação dos dispositivos existentes.

Desta maneira, como trabalhos futuros, espera-se integrar simuladores que modelem sistemas existentes, compartilhem dados reais ou sejam integrados a sensores ou atuadores satelitais.

Espera-se também implementar um Portal de Modelagem de Simulação como Serviço, como prova de conceito, para que os usuários possam descobrir serviços de simulação, compô-los, criando novos serviços, e executá-los. Tais serviços seriam containerizados e implantados em um ambiente de nuvem, de forma a possibilitar a análise de seu desempenho.

Após a implantação dos serviços em ambiente de nuvem, será possível ainda realizar análises de desempenho e resiliência da federação, comparando os com serviços nuvem com serviços em execução em ambiente local.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Cabello, L. H. Michels Freitas, , M. Melo, "Brazilian space sector: Historical analysis of the public budget," *Space Policy*, vol. 62, p. 101502, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265964622000285>
- [2] B. Möller, E. Crues, A. Garro, A. Falcone, , D. Dexter, "Evolving the spacefom: Lessons learned and future development," in *Conference: 2025 SISO Simulation Innovation Workshop*, 02 2025.
- [3] G. Couloris, J. Dollimore, T. Kindberg, , G. Blair, *Creating Computer Simulation Systems: An Introduction to the High Level Architecture*. Prentice Hall, 1999.
- [4] T. van den Berg, B. Siegel, , A. Cramp, "Containerization of high level architecture-based simulations: A case study," *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, vol. 14, 09 2016.
- [5] NATO Science and Technology Organization, "Modelling and simulation as a service: New concepts and service-oriented architectures," final Report of Specialist Team MSG-131. [Online]. Available: <https://www.sto.nato.int/document/modelling-and-simulation-as-a-service-new-concepts-and-service-oriented-architectures/>
- [6] —, "Operational concept document (ocd) for the allied framework for m&s as a service," developed by NATO MSG-136. [Online]. Available: <https://www.sto.nato.int/document/operational-concept-document-ocd-for-the-allied-framework-for-ms-as-a-service-2/>
- [7] E. Z. Crues, D. E. Dexter, A. Falcone, A. Garro, , B. Möller, "Enabling simulation interoperability between international standards in the space domain," in *2022 IEEE/ACM 26th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, 2022, pp. 127–134.
- [8] R. E. De Grande, A. Falcone, , A. Garro, "Adding flexibly in distributed simulation of space missions by enhancing the spacefom standard," in *2024 28th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, 2024, pp. 48–55.
- [9] O. S. Costa Neto, C. M. O. d. Abreu, M. A. M. d. Conceição, A. B. Baccarin, , A. M. d. Cunha, "Hla e microsserviços: Uma aplicação para simulação distribuída," in *Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE)*, 2021.
- [10] IEEE, "IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)– Framework and Rules," IEEE Computer Society, DOI: 10.1109/IEEESTD.2010.5557731, Tech. Rep., 2010.
- [11] H. Oguztüzün , O. Topçu, *Guide to Distributed Simulation with HLA*. Springer Publishing Company, Incorporated, 11 2017.
- [12] E. Z. Crues, D. Dexter, A. Falcone, A. Garro, , B. Möller, "Spacefom - a robust standard for enabling a-priori interoperability of hla-based space systems simulations," *Journal of Simulation*, vol. 16, no. 6, pp. 624–644, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/17477778.2021.1945962>
- [13] The SpaceFOM Product Development Group (PDG), "SISO-STD-018-00-2020: Space Reference Federation Object Model (SpaceFOM)," Simulation Interoperability Standards Organization (SISO), Inc., Orlando, FL, Tech. Rep., Oct. 2019, approved SISO Standard. [Online]. Available: <https://www.sisostandards.org/page/DataFiles>
- [14] M. Gütlein , A. Djanatljev, "Modeling and simulation as a service using apache kafka," 01 2020, pp. 171–180.
- [15] NATO MSG-136, "Modelling and simulation as a service (msaas) – rapid deployment of interoperable and credible simulation environments," NATO Science and Technology Organization (STO), Neuilly-sur-Seine, France, STO Technical Report STO-TR-MSG-136-Part-I, oct 2018, final Report. [Online]. Available: <https://www.sto.nato.int/publications/STO20TechnicalReports/STO-TR-MSG-136-Part-I/TR-MSG-136-Part-I-ALL.pdf>
- [16] P. N. De Souza, "Subsistema de controle de atitude," Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil, Tech. Rep., November 2002, curso Introdução em Tecnologia de Satélites, Unidade 2, Parte 2.2, Versão 1.0. [Online]. Available: <https://aebescolavirtual.aeb.gov.br/user/preferences.php?userid=58221>
- [17] PORTICO Development Team, "Open LVC - PORTICO," <https://github.com/openlvc/portico>, 2025, accessed: 2026-03-01.
- [18] G. Couloris, J. Dollimore, T. Kindberg, , G. Blair, *Sistemas Distribuídos: Conceitos e Projeto*. Bookman Editora, 2013.
- [19] J. R. Oliveira Rosa , A. Luiz Fazenda, "Assessing the performance and impact of an open-source rti in distributed real-time military simulation," in *Anais do XXVI Simpósio em Sistemas Computacionais de Alto Desempenho*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2025, pp. 25–36. [Online]. Available: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sscad/article/view/37884>