REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

SPRB-BD: UMA ARQUITETURA DE REFERÊNCIA PARA SISTEMAS DE POSICIONAMENTO REGIONAL

SPRB-BD: A REFERENCE ARCHITECTURE FOR REGIONAL POSITIONING SYSTEMS

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 03/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/793705697

Raphaela Barbosa Monteiro
Gildárcio Sousa Gonçalves
Johnny Cardoso Marques
Adilson Marques da Cunha

RESUMO

Sistemas de Posicionamento, Navegação e Tempo (PNT) são fundamentais para a resiliência de infraestruturas críticas, e a dependência de GNSS estrangeiros pode expor esses serviços a riscos de indisponibilidade, interferência e degradação. Iniciativas de sistemas regionais de PNT enfatizam aspectos orbitais e de processamento de sinais, deixando em segundo plano a persistência, a auditoria e a rastreabilidade dos dados e operações. Este trabalho propõe e avalia o SPRB-BD (Sistema de Posicionamento Regional Brasileiro baseado em Banco de Dados), uma arquitetura de referência para a camada de dados de sistemas regionais de PNT, organizada em quatro camadas (apresentação, aplicação, persistência e análise) e composta por um modelo de dados do domínio, um mecanismo de auditoria de comandos e uma camada analítica separada do banco transacional. A pesquisa seguiu a Design Science Research, com os ciclos de construção do artefato executados em três sprints Scrum de quatro semanas, que totalizaram 54 User Stories. A arquitetura foi instanciada em um protótipo com dois segmentos (espacial e terrestre) e avaliada por meio de 137 casos de teste funcionais e de integração, todos aprovados em ambiente local, com dados sintéticos (528 registros de telemetria e 338 pontos de localização). Os resultados indicam que a arquitetura permite registrar, persistir, consultar e recuperar as informações necessárias à rastreabilidade das operações no ambiente avaliado; a avaliação também evidenciou limitações de reprodutibilidade, das quais foram derivados princípios de projeto para novas instanciações da arquitetura.

Palavras-chave: Arquitetura de Referência; Design Science Research; Sistemas de Posicionamento Regional; Sistemas PNT; Rastreabilidade de Dados; Engenharia de Software.

ABSTRACT

Positioning, Navigation, and Timing (PNT) systems are fundamental to the resilience of critical infrastructure, and dependence on foreign Global Navigation Satellite Systems (GNSS) may expose these services to risks of unavailability, interference, and degradation. Regional PNT initiatives emphasize orbital and signal-processing aspects, leaving data persistence, auditing, and traceability in the background. This work proposes and evaluates SPRB-BD (Brazilian Regional Positioning System – Database), a reference architecture for the data layer of regional PNT systems, organized into four layers (presentation, application, persistence, and analysis) and comprising a domain data model, a command auditing mechanism, and an analytical layer separated from the transactional database. The research followed Design Science Research, with the build cycles of the artifact carried out in three four-week Scrum sprints, totaling 54 User Stories. The architecture was instantiated in a prototype with two segments (space and ground) and evaluated through 137 functional and integration test cases, all of which passed in a local environment using synthetic data (528 telemetry records and 338 location points). The results indicate that the architecture makes it possible to record, persist, query, and retrieve the information required for operational traceability in the evaluated environment; the evaluation also revealed reproducibility limitations, from which design principles for new instantiations of the architecture were derived.

Keywords: Reference Architecture; Design Science Research; Regional Positioning Systems; PNT Systems; Data Traceability; Software Engineering.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Os sistemas de Posicionamento, Navegação e Tempo (PNT) tornaram-se componentes essenciais de infraestruturas críticas modernas, oferecendo suporte a aplicações em áreas como aviação, defesa, logística, agricultura de precisão, telecomunicações e distribuição de energia elétrica (Lombardi, 2021; McCarthy et al., 2023).

A dependência de GNSS operados por outros países em aplicações críticas pode introduzir riscos à disponibilidade, à continuidade e à integridade dos serviços, especialmente em cenários de indisponibilidade, interferência, degradação ou restrição de acesso aos sinais, inclusive em situações associadas a conflitos geopolíticos (United States, 2021; McCarthy et al., 2023).

Além dos aspectos relacionados à disponibilidade e à integridade dos serviços, a literatura de sistemas PNT contempla temas como modelagem orbital, geometria de posicionamento, determinação de órbita e processamento de sinais (Kaplan; Hegarty, 2017; Hofmann-Wellenhof; Lichtenegger; Wasle, 2007). Esses elementos constituem a base para o desenvolvimento e a avaliação de sistemas capazes de fornecer informações de posicionamento, navegação e tempo em diferentes contextos operacionais.

Entretanto, à medida que as tecnologias PNT são integradas a ambientes distribuídos, compostos por simuladores, serviços de software e aplicações baseadas em localização (Location-Based Services — LBS), torna-se relevante considerar também aspectos relacionados à persistência, organização e reprodutibilidade dos dados e experimentos. Em aplicações LBS, as informações de

localização constituem elementos fundamentais para a prestação dos serviços e podem ser obtidas a partir de receptores GNSS em conjunto com outras fontes de informação de posicionamento. Essa integração amplia a cadeia de dependências entre a infraestrutura de PNT e as aplicações de nível superior, fazendo com que, além dos mecanismos de posicionamento propriamente ditos, a organização, o armazenamento e a rastreabilidade dos dados utilizados ao longo do processamento também assumam importância.

Nesse contexto, a integração entre processamento de dados orbitais, persistência de dados e mecanismos de auditoria constitui um aspecto relevante para o desenvolvimento e a validação de arquiteturas de sistemas regionais de posicionamento.

1.2. Problema, Questão de Pesquisa e Justificativa

Diante desse cenário, este trabalho investiga a seguinte questão de pesquisa (QP): é viável construir uma arquitetura de referência de software para um Sistema de Posicionamento Regional Brasileiro capaz de organizar, persistir, auditar e analisar os dados e operações, de modo a apoiar a rastreabilidade das operações e a reprodutibilidade dos experimentos? Para torná-la verificável, a QP foi desdobrada em três questões específicas:

QP1 (rastreabilidade): para qualquer comando registrado, a arquitetura permite recuperar o operador responsável, a estação de controle, o satélite, o tipo, o payload, o status e o instante da operação?

QP2 (reprodutibilidade): os registros persistidos (efemérides e parâmetros de cálculo) permitem recomputar um resultado de

processamento — por exemplo, a cobertura de um satélite — e obter o mesmo resultado?

QP3 (análise histórica): a separação entre o armazenamento transacional e a camada analítica permite executar consultas sobre o histórico de telemetria e rotas sem acesso ao banco transacional?

O projeto BRT-RPS (Silva et al., 2026), demonstrou experimentalmente um protótipo de posicionamento regional envolvendo simulação de satélites, processamento de pseudodistâncias, estação terrestre, comunicação entre segmentos e validação Hardware-in-the-Loop (HITL). Nesse contexto, o SPRB-BD aborda uma dimensão complementar desse problema: a organização e a persistência dos dados produzidos por uma infraestrutura desta natureza, incorporando mecanismos voltados à rastreabilidade, à auditoria e à análise posterior dos registros.

A partir dessa necessidade, o SPRB-BD propõe e implementa uma arquitetura de referência composta por camadas de apresentação, aplicação, persistência e análise, integrando bancos de dados relacionais, mecanismos de registro operacional, visualização geoespacial e processamento analítico. A abordagem estabelece uma base arquitetural para o desenvolvimento e a avaliação de sistemas regionais de PNT, com ênfase na organização, rastreabilidade, persistência e análise dos dados produzidos ao longo das operações do sistema.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Propor, implementar e avaliar uma arquitetura de referência de software para organização, persistência, auditoria e análise dos dados produzidos por um Sistema de Posicionamento Regional Brasileiro, visando apoiar a rastreabilidade das operações e a reprodutibilidade dos experimentos.

1.3.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

I. Especificar uma arquitetura de referência para o gerenciamento dos dados, contemplando mecanismos de ingestão, processamento, persistência, auditoria e análise;

II. Modelar e implementar uma estrutura de persistência capaz de representar entidades e operações relacionadas a satélites, constelações, estações de controle, telemetria, comandos e demais dados produzidos pelo sistema;

III. Implementar um pipeline para processamento de dados orbitais e cálculo de cobertura, incluindo a geração de informações geoespaciais;

IV. Implementar mecanismos de rastreabilidade e auditoria capazes de registrar operações, comandos, estações de controle, operadores e eventos relevantes do sistema;

V. Integrar mecanismos de visualização geoespacial e processamento analítico aos dados persistidos, permitindo a consulta e a análise de informações históricas;

VI. Avaliar a arquitetura proposta, por meio de testes funcionais e de integração e de cenários de demonstração, quanto à sua capacidade de registrar, persistir, consultar e recuperar as informações necessárias à rastreabilidade das operações e à reprodução das etapas de processamento (QP1 a QP3);

VII. Disponibilizar os artefatos necessários à reprodução do ambiente experimental e à avaliação da arquitetura proposta, incluindo código-fonte, scripts de geração dos dados sintéticos e plano de testes.

1.4. Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

I. Arquitetura de referência para a camada de dados de sistemas regionais de posicionamento, organizada em quatro camadas (apresentação, aplicação, persistência e análise) e composta por elementos específicos do domínio PNT: modelo de dados de satélites, constelações, efemérides, comandos, estações de controle e telemetria; mecanismo de auditoria de comandos; e separação entre armazenamento transacional e análise histórica;

II. Pipeline de cálculo de cobertura baseado em propagação orbital a partir de efemérides, com geração de geometrias GeoJSON compatíveis com bibliotecas de mapas;

III. Mecanismo de rastreabilidade de comandos com validação de estação de controle, associação a operador e registro de eventos de auditoria;

IV. Camada analítica baseada em Apache Spark sobre dados exportados do banco transacional, mantendo as operações transacionais no PostgreSQL;

V. Instanciação da arquitetura em um protótipo de código aberto (Monteiro, 2026), com dois segmentos, 19 tabelas e plano de testes com 137 casos, que permite a reprodução do ambiente experimental;

VI. Princípios de projeto derivados da construção e da avaliação do artefato (Seção 5.3), que podem orientar novas instanciações da arquitetura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sistemas GNSS e PNT

O termo PNT (Posicionamento, Navegação e Tempo) refere-se aos serviços que fornecem localização, movimento e sincronização temporal, e o GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) é a principal infraestrutura tecnológica para fornecer esses sinais em escala global (Kaplan; Hegarty, 2017).

Os principais sistemas GNSS em operação são o GPS (EUA) (Kaplan; Hegarty, 2017), Galileo (UE) (ESA, 2026), GLONASS (Rússia) (GLONASS IAC, 2026) e BeiDou (China) (BEIDOU, 2026), cujas características principais são resumidas na Tabela 1.

2.1.1. Principais Sistemas GNSS

Tabela 1. Comparação dos principais sistemas GNSS.

Sistema	Operador	Cobertura	Órbita	Particularidade Relevante
BDS (BeiDou)	China	Global	GEO; IGSO; MEO	Arquitetura híbrida e diversidade orbital.
Galileo	União Europeia	Global	MEO	Disponibilidade de mecanismos de autenticação de sinais.
GLONASS	Rússia	Global	MEO	Acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA) e cobertura em altas latitudes.
GPS	Estados Unidos	Global	MEO	Ampla utilização como fonte de posicionamento e sincronização temporal.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em Kaplan e Hegarty (2017), ESA (2026), GLONASS IAC (2026) e BeiDou (2026).

Uma visão abrangente dos princípios e aplicações desses sistemas pode ser encontrada em Kaplan e Hegarty (2017) e Hofmann-Wellenhof et al. (2007).

2.1.2. Vulnerabilidades e Dependência de Sistemas GNSS

A dependência de sistemas GNSS estrangeiros pode expor o Brasil a vulnerabilidades. Os sinais GNSS são de baixa potência e suscetíveis

a interferências (jamming) e manipulação (spoofing) (Zidan et al., 2021; Zhang et al., 2020).

A crescente dependência de serviços GPS por aplicações militares, civis e comerciais torna diversos sistemas vulneráveis à interrupção ou à manipulação dos sinais, reforçando a necessidade de resiliência dos serviços de posicionamento, navegação e tempo (PNT) (United States, 2021).

A dependência de serviços PNT em infraestruturas críticas também introduz riscos associados à interrupção, degradação ou manipulação dos sinais e dados utilizados pelos sistemas dependentes, tornando necessária a adoção de mecanismos de resiliência e gerenciamento de riscos (McCarthy et al., 2023).

Em aplicações críticas, como a sincronização de redes elétricas e de telecomunicações, a perda ou a manipulação do sinal pode gerar efeitos em cadeia (Lombardi, 2021; Zhang et al., 2020). Adicionalmente, em regiões equatoriais como o Brasil, efeitos ionosféricos podem degradar o desempenho de sistemas GNSS (Moraes; Perrella, 2009). A diversificação de constelações (uso de diferentes GNSS simultaneamente) aumenta a redundância, mas não elimina a dependência estrutural de infraestruturas externas. Para o Brasil, isso reforça a necessidade de estratégias de resiliência e de sistemas complementares de PNT.

2.1.3. Síntese: Vulnerabilidades Comuns e Lições para o Brasil

A literatura citada também evidencia que os impactos potenciais da perda ou manipulação do sinal ultrapassam as aplicações diretamente relacionadas à navegação, afetando também os

sistemas que dependem da sincronização temporal, como as redes elétricas.

Para o contexto brasileiro, a extensão territorial do país, além da distribuição geográfica de infraestruturas críticas e da crescente utilização de sistemas digitais e sincronizados temporalmente reforçam a importância de estratégias voltadas à continuidade e à resiliência dos serviços dependentes de PNT.

A questão passa a ser, portanto, não apenas a disponibilidade das diferentes constelações GNSS, mas a capacidade de manter funções críticas diante da perda ou comprometimento dessa referência. Nesse sentido, torna-se necessário investigar fontes alternativas e complementares de PNT que possam contribuir para a continuidade operacional de sistemas dependentes de GNSS.

2.2. Sistemas Regionais e Sistemas de Aumentação Baseados em Satélite

Os Sistemas Regionais de Navegação por Satélite (Regional Navigation Satellite Systems — RNSS) funcionam de forma semelhante ao GNSS, porém podem ser projetados para atender necessidades específicas de uma região, como cobertura em latitudes específicas ou integração com infraestruturas locais.

Além dos RNSS, existem os Sistemas de Aumentação Baseados em Satélite (Satellite-Based Augmentation Systems — SBAS), que fornecem informações complementares ao GNSS para melhorar a precisão, integridade ou disponibilidade do sinal. Esses sistemas utilizam estações terrestres de referência para calcular correções e transmiti-las aos usuários via satélite.

2.2.1. Principais Sistemas RNSS

Tabela 2. Comparação dos principais sistemas RNSS.

Sistema	Operador	Órbita	Particularidade Relevante
Navigation with Indian Constellation (NavIC)	Índia	GEO; IGSO	Serviço regional para a Índia e seu entorno
Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)	Japão	Quasi-Zenith (QZO); GEO	Satélites quase no zênite, melhora disponibilidade em cânions urbanos

Fonte: Elaborada pelos autores com base em Cabinet Office (2025) e ISRO (2026).

Ambos os sistemas evidenciam a viabilidade técnica de arquiteturas regionais de PNT e a importância dos segmentos terrestre e espacial para a provisão dos serviços. Para o presente trabalho, essas arquiteturas são utilizadas como referência contextual para investigar uma dimensão complementar: a organização, persistência e rastreabilidade dos dados e operações de um sistema regional.

2.2.2. Satellite-Based Augmentation System (SBAS)

Diferentemente dos RNSS, os SBAS não substituem o GNSS, apenas o complementam. O EGNOS, na Europa, é um exemplo de SBAS que melhora a precisão e a integridade do sinal GPS, inclusive para aplicações de aviação civil (Euspa, 2026). No entanto, os SBAS não resolvem o problema da dependência externa, pois ainda

dependem do sinal GNSS subjacente. Para o Brasil, isso indica que os SBAS podem melhorar a precisão, mas não garantem autonomia.

2.3. O Brasil e a Busca por Soberania

No setor de navegação por satélite, o Brasil conta com a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), mantida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2026). A rede integra o Sistema Geodésico Brasileiro e é composta por estações de referência equipadas com receptores GNSS, que fornecem observações para a determinação de coordenadas com exatidão milimétrica em pós-processamento e apoiam atividades de topografia, engenharia, cartografia, georreferenciamento de imóveis e geodésia. Por meio da RBMC-IP, a rede também disponibiliza correções em tempo real para técnicas como RTK e DGPS, utilizando o protocolo NTRIP, o que dispensa a instalação de uma estação de base própria em campo.

Embora desempenhe papel relevante na infraestrutura geodésica brasileira, a função da RBMC é distinta daquela desempenhada por um sistema regional de navegação por satélite. A RBMC não constitui uma constelação orbital destinada à transmissão de sinais próprios de navegação e sincronização para usuários passivos. Nesse sentido, a infraestrutura terrestre existente não substitui um RNSS, embora possa desempenhar funções complementares em uma arquitetura nacional de PNT.

2.4. A Lacuna: Engenharia de Software em Sistemas de Posicionamento

A literatura focada no desenvolvimento de infraestruturas de navegação regional, como o QZSS japonês (Cabinet Office, 2025) e o

NavIC indiano (ISRO, 2026), enfatiza aspectos orbitais, de cobertura e de processamento de sinais.

O projeto acadêmico BRT-RPS (*Brazilian Real Time - Regional Positioning System*) (Silva et al., 2026), desenvolvido no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), demonstrou a viabilidade de um protótipo de sistema regional utilizando simulação *Hardware-in-the-Loop* (HITL) com microcontroladores ARM Cortex-M0+ (FRDM-KL25Z) e FreeRTOS, integrado a interfaces desenvolvidas via *Model-Driven Development* (MDD).

O BRT-RPS estabelece o fluxo de comunicação e o cálculo de pseudodistâncias e mantém persistência operacional associada ao Worker, mas não tem como foco principal a construção de uma trilha de auditoria de operações em tempo de execução orientada à reconstrução e à análise dos experimentos. De modo mais geral, nos sistemas e trabalhos citados nesta seção, a persistência, a rastreabilidade e a reprodução dos dados de posicionamento não constituem o foco principal das publicações acadêmicas abertas. É essa dimensão que o SPRB-BD explora, sob a perspectiva da Engenharia de Software.

O presente trabalho aborda essa lacuna ao complementar a infraestrutura conceitual do BRT-RPS, propondo uma arquitetura de referência que integra módulos de ingestão, persistência, auditoria e análise, com o objetivo de permitir a rastreabilidade das operações e a reconstrução de experimentos de posicionamento.

Adicionalmente, a literatura sobre proveniência de dados oferece um arcabouço conceitual para rastreabilidade que não foi explorado no BRT-RPS. O modelo W3C PROV (W3C, 2013) descreve a

proveniência por meio de três conceitos centrais: entidades (Entity), atividades (Activity) e agentes (Agent).

Embora a implementação formal do W3C PROV não faça parte do escopo deste trabalho, os elementos do SPRB-BD podem ser interpretados à luz desses conceitos: efemérides, telemetria e resultados de cobertura correspondem a entidades; comandos e cálculos de cobertura, a atividades; e operadores e estações de controle, a agentes. Essa correspondência orientou o projeto do mecanismo de auditoria, sem implementar diretamente o modelo PROV.

2.5. Arquiteturas de Referência

Arquiteturas de referência são abstrações que reúnem conhecimento de um domínio — elementos, responsabilidades, relacionamentos e boas práticas — para orientar o projeto de arquiteturas concretas de sistemas desse domínio (Cloutier et al., 2010). Diferentemente de uma arquitetura concreta, uma arquitetura de referência é descrita em nível mais alto de abstração e deve ser instanciada para originar sistemas específicos (Angelov; Grefen; Greefhorst, 2012). Processos sistemáticos, como o ProSA-RA, orientam a construção, a representação e a avaliação desse tipo de artefato (Nakagawa et al., 2014). A descrição arquitetural, por sua vez, pode ser organizada em visões que atendem às preocupações dos diferentes interessados, conforme a ISO/IEC/IEEE 42010 (ISO/IEC/IEEE, 2022). Neste trabalho, esses conceitos fundamentam a proposta do SPRB-BD como arquitetura de referência para a camada de dados de sistemas regionais de PNT.

3. METODOLOGIA

3.1. Natureza da Pesquisa

A metodologia adotada neste trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza tecnológica, conduzida segundo a Design Science Research (DSR) (Hevner et al., 2004; Peffers et al., 2007), envolvendo o projeto, a implementação e a avaliação de um artefato de software: a arquitetura de referência SPRB-BD e sua instanciação em protótipo. O processo de desenvolvimento de software seguiu práticas de engenharia de software ágil (Pressman; Maxim, 2021).

3.2. Etapas da Design Science Research

A pesquisa seguiu as seis atividades do processo de DSR proposto por Peffers et al. (2007), executadas conforme descrito a seguir:

I. Identificação do problema e motivação: dependência de GNSS estrangeiros e ausência, nos protótipos acadêmicos de sistemas regionais, de uma camada dedicada à persistência, à auditoria e à rastreabilidade dos dados (Seções 1 e 2);

II. Definição dos objetivos da solução: objetivos específicos e questões de pesquisa QP1 a QP3 (Seções 1.2 e 1.3);

III. Projeto e desenvolvimento: concepção da arquitetura de referência e construção do protótipo em três ciclos iterativos, executados como sprints Scrum (Seções 3.3 e 4);

IV. Demonstração: execução simultânea dos dois segmentos em ambiente local, com dados sintéticos (Seção 5.1);

V. Avaliação: testes funcionais e de integração derivados dos critérios de aceitação das User Stories e cenários de demonstração associados às questões de pesquisa (Seções 5.1.2 e 5.2);

VI. Comunicação: publicação deste artigo e disponibilização dos artefatos em repositório público (Monteiro, 2026).

Na perspectiva dos três ciclos da DSR (Hevner, 2007), o ciclo de relevância corresponde à motivação de resiliência de PNT e às necessidades de rastreabilidade identificadas no BRT-RPS; o ciclo de rigor, à base de conhecimento sobre arquiteturas de software e de referência (Bass; Clements; Kazman, 2012; Cloutier et al., 2010) e sobre proveniência de dados (W3C, 2013); e o ciclo de projeto, às iterações de construção e avaliação do artefato realizadas nas sprints. Quanto ao método de avaliação, foram empregados testes funcionais (caixa-preta) e cenários descritivos, ambos previstos entre os métodos de avaliação de artefatos em DSR (Hevner et al., 2004).

A avaliação foi conduzida por meio de casos de teste definidos em planos de teste elaborados por uma equipe dedicada aos testes, a partir dos critérios de aceitação das User Stories. Os testes cobriram autenticação e sessões, cadastros, telemetria, comandos e auditoria, cobertura, mapas e consultas analíticas com Spark, e foram executados em ambiente local, com os dois segmentos operando simultaneamente.

3.3. Processo de Desenvolvimento

Os ciclos de projeto e desenvolvimento da DSR foram executados com o framework Scrum (Schwaber; Sutherland, 2020), em três sprints de quatro semanas cada, a última delas concluída em junho

de 2026. A equipe, formada por alunos de pós-graduação das disciplinas descritas a seguir, foi dividida em dois times Scrum:

TS1 (Segmento Espacial): responsável pelo cadastro de satélites, constelações, cálculo de cobertura, comandos e auditoria;

TS2 (Segmento Terrestre): responsável pelo cadastro de pontos de interesse, dashboards, visualização de mapas e dispositivos.

Cada time operou de forma independente, com bancos de dados e portas de execução distintas. A separação das bases foi adotada para reduzir o acoplamento entre os componentes e permitir o desenvolvimento e os testes independentes dos segmentos, com integração posterior. A Tabela 3 resume as entregas por sprint.

Tabela 3. Entregas por sprint.

Sprint	**Objetivo**	**User Stories (TS1)**	**User Stories (TS2)**	**Total**
1	Infraestrutura básica (autenticação, modelagem)	9	11	20
2	Expansão operacional (satélites, telemetria, comandos)	11	9	20
3	Consolidação (cobertura, análise Spark, dashboards)	-	-	14

Total		20	20	54

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).
Nota: na Sprint 3, as 14 User Stories foram desenvolvidas pelo time integrado (TS3, formado pela união de TS1 e TS2); assim, as 20 User Stories de cada time somadas às 14 do time integrado totalizam 54.

Nas duas primeiras Sprints, o desenvolvimento foi realizado separadamente pelos times TS1 e TS2. Na Sprint 3, os times foram unificados em um único time (denominado TS3), passando a trabalhar sobre um backlog integrado, o que resultou na implementação de 14 User Stories na sprint de consolidação.

A pesquisa foi conduzida no contexto da abordagem IPBL (Aprendizagem Baseada em Problemas Interdisciplinar), já aplicada em projetos interdisciplinares anteriores no ITA (Cunha et al., 2015), combinada ao Scrum e integrando três disciplinas de pós-graduação: CE-229 (Teste de Software), CE-240 (Projeto de Sistemas de Banco de Dados) e CE-245 (Tecnologia da Informação).

3.4. Ambiente Tecnológico

Tabela 4. Stack Tecnológica.

Categoria	**Tecnologia**	**Versão**	**Finalidade**
Backend	Python	3.13	Linguagem de programação
	FastAPI	0.136.1 (TS1) / 0.138.0 (TS2)	Framework para construção da API REST
	Uvicorn	0.46.0 (TS1) / 0.49.0 (TS2)	Servidor web ASGI para rodar a aplicação

	SQLAlchemy	2.0.x	ORM para mapeamento e acesso ao banco de dados
	Alembic	1.18.4	Ferramenta para controle e migrações do banco
	Pydantic	2.13.x	Validação de dados e construção de schemas
	Pydantic Settings	2.14.x	Gerenciamento de configurações da aplicação
	python-dotenv	1.2.2	Leitura automática de variáveis de ambiente (.env)
	python-jose	3.5.0 (TS1)	Geração e validação de tokens JWT
	PyJWT	2.13.0 (TS2)	Geração e validação de tokens JWT
	NumPy	2.4.6 (TS1)	Cálculo numérico e álgebra linear
	Shapely	2.1.2 (TS1)	Manipulação e análise de geometria geoespacial
Frontend	TypeScript	6.0.2	Linguagem de programação
	React	19.2.4	Biblioteca para construção da interface de usuário
	Vite	8.0.4	Ferramenta de build e empacotamento do projeto

	React Router DOM	7.14.1 (TS1) / 7.11.0 (TS2)	Sistema de roteamento dinâmico de páginas
	Axios	1.13.2 (TS2)	Cliente HTTP para requisições à API
	Zustand	5.0.9 (TS2)	Gerenciamento global de estado
	Tailwind CSS	4.2.x	Framework de estilização baseado em classes utilitárias
	Recharts	3.8.1	Biblioteca para renderização de gráficos e dashboards
	Leaflet	1.9.4	Biblioteca para mapas e marcações interativas
	React Leaflet	5.0.0	Wrapper React para mapas Leaflet
	React Icons	5.6.0 (TS1)	Biblioteca de ícones
	Lucide React	1.8.0 (TS2)	Biblioteca de ícones
Banco de Dados	PostgreSQL	15	Sistema gerenciador de banco de dados relacional
	Psycopg	3.3.3 (TS1) / 3.3.4 (TS2)	Driver oficial de conexão Python para o PostgreSQL
Infraestrutura	Docker	27.x	Criação de ambientes isolados via containers
	Docker Compose	2.x	Orquestração local de múltiplos containers
Análise	Apache Spark (PySpark)	—	Processamento analítico de dados históricos (Spark SQL)

Segurança	Bcrypt	5.0.0	Algoritmo para criptografia e hash de senhas
Testes/Qualidade	Pytest	9.0.3	Framework principal para automação de testes
	pytest-asyncio	1.3.0 (TS1) / 1.4.0 (TS2)	Plugin para execução de testes assíncronos (async/await)
	Coverage (pytest-cov)	7.14.2 (TS2)	Medição da cobertura de código pelos testes
	httpx	0.28.1	Cliente HTTP para testes
	Ruff	0.15.11 (TS1)	Linter e formatador estático de código Python rápido

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Os times TS1 e TS2 adotaram bibliotecas equivalentes, mas distintas, para algumas funcionalidades, por exemplo, python-jose e PyJWT para autenticação. Essa divergência decorre do desenvolvimento independente dos dois segmentos sem padrões técnicos compartilhados entre os times, aspecto discutido na Seção 5.3.

4. ARQUITETURA DE REFERÊNCIA SPRB-BD

4.1. Visão Geral

Neste trabalho, o termo “arquitetura de referência” designa uma organização proposta e potencialmente reutilizável de camadas, entidades de dados e mecanismos de rastreabilidade para sistemas

regionais de PNT, não correspondendo a uma implementação operacional validada em múltiplos sistemas ou em condições de campo. A proposta segue princípios de separação de responsabilidades e modularidade (Bass; Clements; Kazman, 2012; ISO/IEC/IEEE, 2022) e é instanciada no protótipo SPRB-BD por meio de dois segmentos, denominados TS1 e TS2. A validação em múltiplas instâncias e em ambiente de campo permanece como trabalho futuro.

Para distinguir a arquitetura de referência de sua instanciação, os elementos são descritos em dois níveis: (i) no nível de referência, independente de tecnologia, a arquitetura define as camadas, as entidades do domínio (satélite, constelação, efeméride, comando, estação de controle, operador e telemetria), o mecanismo de auditoria de comandos e a separação entre armazenamento transacional e análise histórica; (ii) no nível de instância, o SPRB-BD materializa esses elementos com as tecnologias descritas na Seção 3.4. Os principais interessados considerados são o operador do segmento espacial, o operador do segmento terrestre, o analista de dados e o auditor, cujas preocupações — registro e consulta de operações, visualização geoespacial, análise histórica e verificação da origem das operações — orientaram as visões apresentadas nesta seção: visão lógica (Seção 4.1), visão de fluxo de dados (Seção 4.4) e visão de dados (Seção 4.5).

A arquitetura do SPRB-BD separa as operações transacionais das atividades de análise sobre dados históricos. O PostgreSQL é utilizado para o armazenamento transacional de dados de cadastro, operação e auditoria, enquanto o Apache Spark é empregado na camada de análise para processamento de dados históricos de telemetria e rotas, consumidos a partir de arquivos exportados do

banco de dados. A adoção do Apache Spark (Zaharia et al., 2016), mesmo diante do volume reduzido de dados da demonstração, visa preparar a arquitetura para volumes maiores de telemetria e manter a análise histórica isolada do banco transacional.

A arquitetura é organizada em quatro camadas:

I. Apresentação, responsável pela interface do usuário, implementada com React, TypeScript e Leaflet;

II. Aplicação, responsável pela API REST, implementada com FastAPI, incluindo mecanismos de autenticação baseados em JWT;

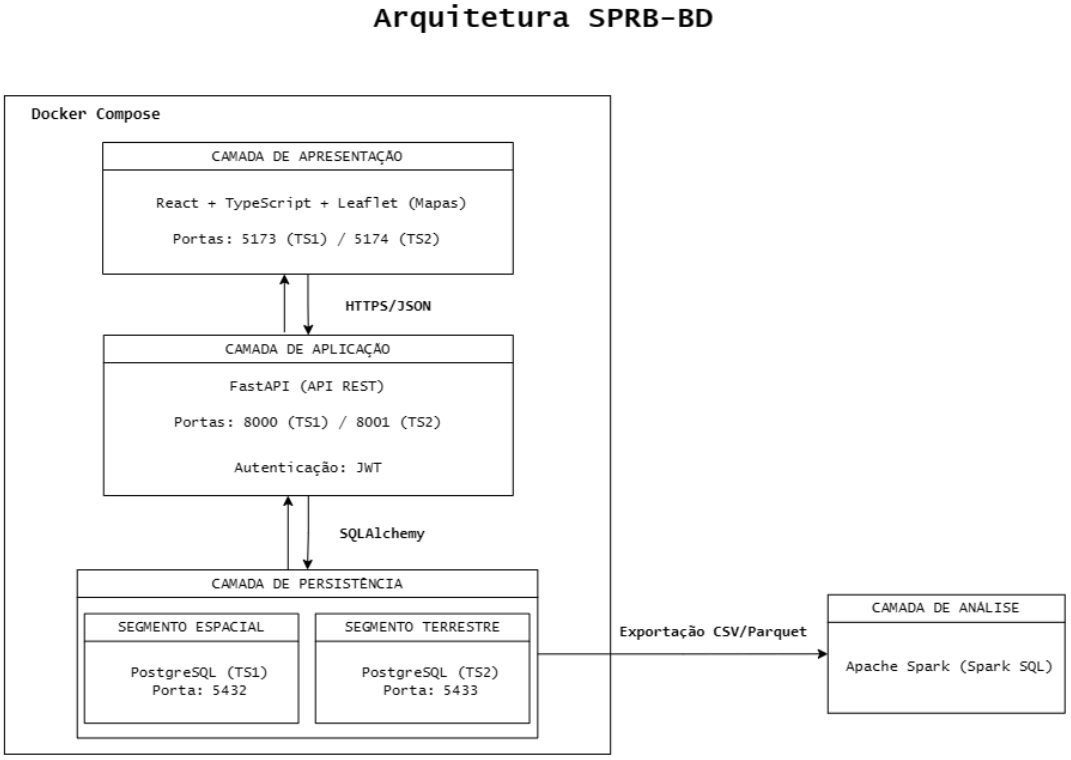
III. Persistência, responsável pelo armazenamento dos dados em dois bancos PostgreSQL, associados aos segmentos TS1 e TS2;

IV. Análise, responsável pelo processamento analítico de dados históricos utilizando Apache Spark.

As camadas de apresentação, aplicação e persistência são executadas em contêineres gerenciados por Docker Compose, enquanto a camada de análise opera de forma independente, consumindo dados exportados do PostgreSQL nos formatos CSV e Parquet.

A Figura 1 apresenta a arquitetura em camadas do SPRB-BD.

Figura 1. Arquitetura em camadas do SPRB-BD.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

4.2. Segmento Espacial (TS1)

O segmento espacial (TS1) é responsável pelo cadastro e gerenciamento de satélites e constelações, cálculo de cobertura, envio de comandos e registro de auditoria. O sistema é implementado com FastAPI (backend), React (frontend) e PostgreSQL (banco de dados).

As principais funcionalidades incluem:

I. Cadastro de satélites;

II. Cadastro de constelações;

III. Cálculo de cobertura (áreas de visibilidade);

IV. Recebimento e envio de comandos para satélites;

V. Autenticação de usuários;

VI. Registro de auditoria.

4.2.1. Cálculo de Cobertura

O cálculo de cobertura é realizado a partir da efeméride mais recente do satélite armazenada no banco de dados. As efemérides contêm elementos orbitais keplerianos, armazenados em formato JSON e associados a um instante de referência.

O serviço cobertura_satelite executa as seguintes etapas:

I. Consulta da efeméride: recupera o registro mais recente associado ao satélite;

II. Propagação orbital: utiliza um modelo kepleriano simplificado, com os parâmetros semieixo maior (a), excentricidade (e), inclinação (i), ascensão reta do nodo ascendente (Ω), argumento do perigeu (ω) e anomalia média na época (M_0), para calcular a posição do satélite em um instante posterior ao de referência da efeméride; a conversão do referencial inercial (ECI) para o terrestre (ECEF) considera apenas a rotação da Terra desde o instante de referência, e a Terra é modelada como uma esfera de raio 6.371 km;

III. Cálculo do footprint: a partir da posição e altitude estimadas, calcula a região de cobertura no solo com ângulo mínimo de elevação de 5°, representada como polígono geográfico e recortada ao retângulo envolvente (bounding box) do território brasileiro (latitudes de 36° S a 7° N e longitudes de 76° O a 32° O);

IV. Geração do resultado: retorna o resultado em GeoJSON (FeatureCollection), compatível com Leaflet.

A demonstração utiliza dados sintéticos: as efemérides são parâmetros keplerianos definidos para fins de teste, e os identificadores dos satélites são rótulos de teste. No serviço de cobertura, o instante de propagação corresponde ao instante de referência da efeméride acrescido de um intervalo sorteado entre dois e oito minutos, que simula o atraso de recepção da efeméride. O procedimento tem como finalidade demonstrar o fluxo de processamento orbital e de geração de informação geoespacial no protótipo; portanto, o cálculo de cobertura não deve ser interpretado como avaliação de precisão orbital ou de desempenho de um sistema operacional de navegação por satélite.

Em relação aos modelos orbitais, a implementação utiliza dois modelos distintos: o cálculo de cobertura no TS1 utiliza o modelo kepleriano simplificado descrito acima, com parâmetros lidos das efemérides armazenadas no banco, enquanto as posições utilizadas nas rotas do TS2 são calculadas por um modelo IGSO regional (orbit_igso.py), que representa uma constelação de cinco satélites em órbita em forma de oito, com semieixo maior de aproximadamente 42.176 km, inclinação de 43° e excentricidade de 0,078. A unificação desses fluxos de propagação orbital constitui trabalho futuro.

4.3. Segmento Terrestre (TS2)

O segmento terrestre (TS2) é responsável pela visualização de mapas, pelo cadastro de pontos de interesse, pela visualização de

telemetria e do histórico de localização de satélites e pelo acompanhamento de dispositivos conectados.

As principais funcionalidades incluem:

I. Visualização de mapa com pontos de interesse;

II. Visualização de telemetria;

III. Consulta e visualização do histórico de localização de satélites, com trilhas e áreas de cobertura;

IV. Listagem dos dispositivos conectados do usuário autenticado.

A identificação de satélites por região (Figura 7) e o envio e a consulta de comandos são realizados no segmento espacial (TS1).

4.4. Fluxo de Dados do SPRB-BD

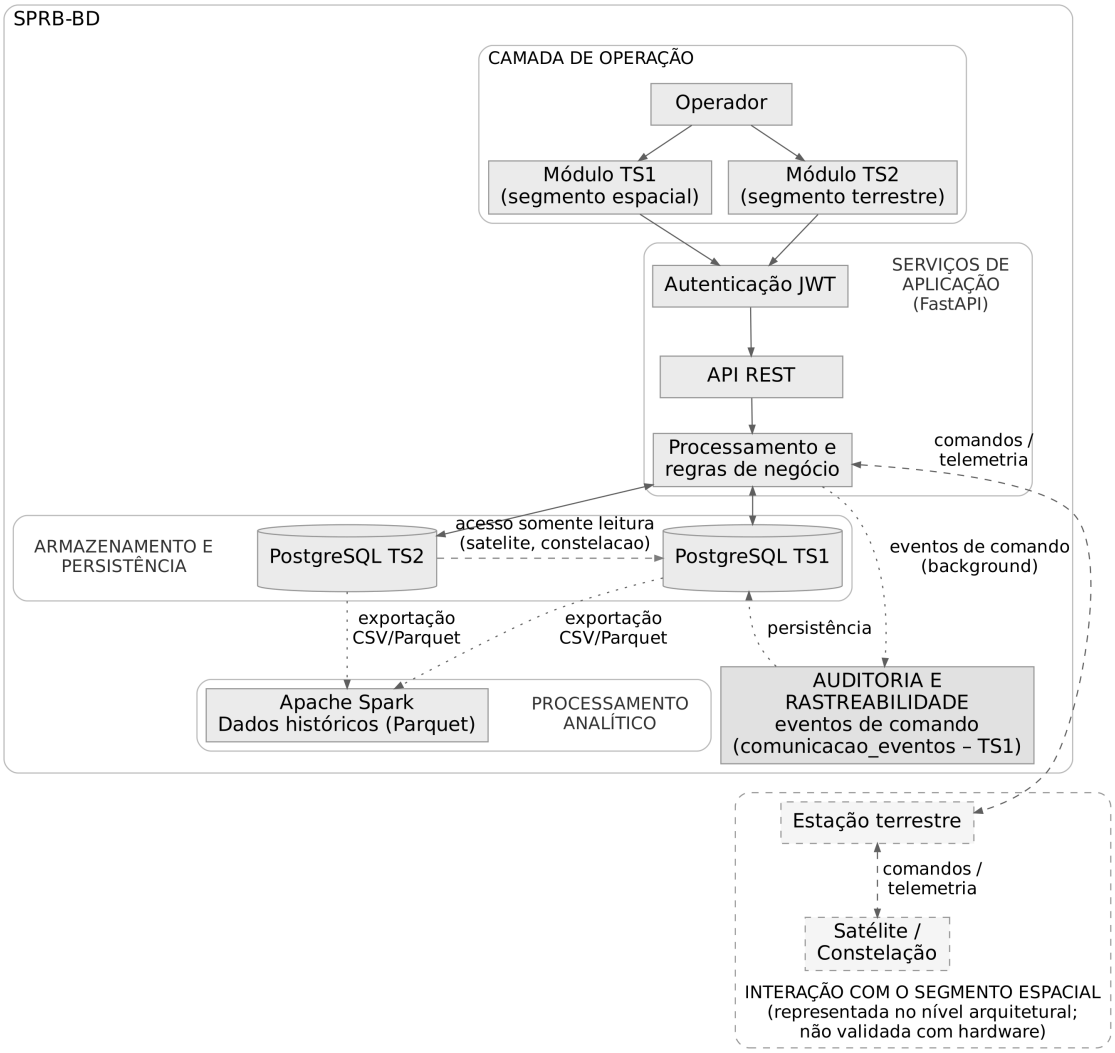
O fluxo de dados do SPRB-BD integra componentes de operação, processamento, persistência e comunicação espacial.

Conforme a Figura 2, o fluxo compreende: (i) a camada de operação, na qual o operador interage com os módulos TS1 e TS2; (ii) os serviços de aplicação (autenticação JWT, API REST e processamento das regras de negócio); (iii) o armazenamento e a persistência nos bancos PostgreSQL de cada segmento, com acesso somente leitura do TS2 às tabelas satelite e constelacao do TS1; (iv) o processamento analítico com Apache Spark, a partir de dados exportados; (v) a auditoria e a rastreabilidade, em que os eventos de comando são registrados em segundo plano (background) na tabela de auditoria do TS1; e (vi) a interação com o segmento espacial (estação terrestre

e satélites), representada no nível arquitetural e não validada com equipamentos físicos no protótipo (Seção 5.4).

A Figura 2 apresenta o fluxo de dados do SPRB-BD.

Figura 2. Arquitetura e fluxo de dados do SPRB-BD.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

4.5. Módulo de Auditoria e Persistência

O SPRB-BD utiliza dois bancos de dados PostgreSQL, um para cada segmento (TS1 e TS2), totalizando 19 tabelas, sendo 8 no segmento espacial e 11 no segmento terrestre.

A integração entre TS1 e TS2 ocorre por meio de acesso somente leitura do TS2 ao banco de dados do TS1, especificamente para consulta das tabelas satelite e constelacao. Essa abordagem dispensa chamadas HTTP entre os segmentos para esses dados e preserva bancos fisicamente separados. Cada segmento mantém sua própria tabela de telemetria, com schemas distintos: o TS1 armazena telemetria completa dos satélites; o TS2 armazena uma versão simplificada, utilizada para visualização em dashboards. Essa decisão, contudo, introduz acoplamento no nível de dados: alterações no esquema dessas tabelas no TS1 afetam diretamente o TS2. Além disso, as tabelas de telemetria e de histórico de localização do TS2 referenciam os satélites por identificadores textuais, sem integridade referencial com o TS1.

I. Segmento Espacial (TS1): As 8 tabelas do TS1 modelam as entidades do segmento espacial: operador, estacao_controle, comando, constelacao, satelite, telemetria, efemeride e comunicacao_eventos.

II. Segmento Terrestre (TS2): As 11 tabelas do TS2 modelam as entidades do segmento terrestre: login, usuario, refresh_tokens, dispositivo, usuario_dispositivo, ponto, rua, cidade, local, telemetria e historico_localizacao.

Cada segmento adotou sua própria convenção de nomenclatura para chaves primárias e estrangeiras (por exemplo, opr_ no TS1 e usu_ no TS2), refletindo a independência de desenvolvimento entre os dois times.

Tabela 5. Entidades do banco de dados do SPRB-BD.

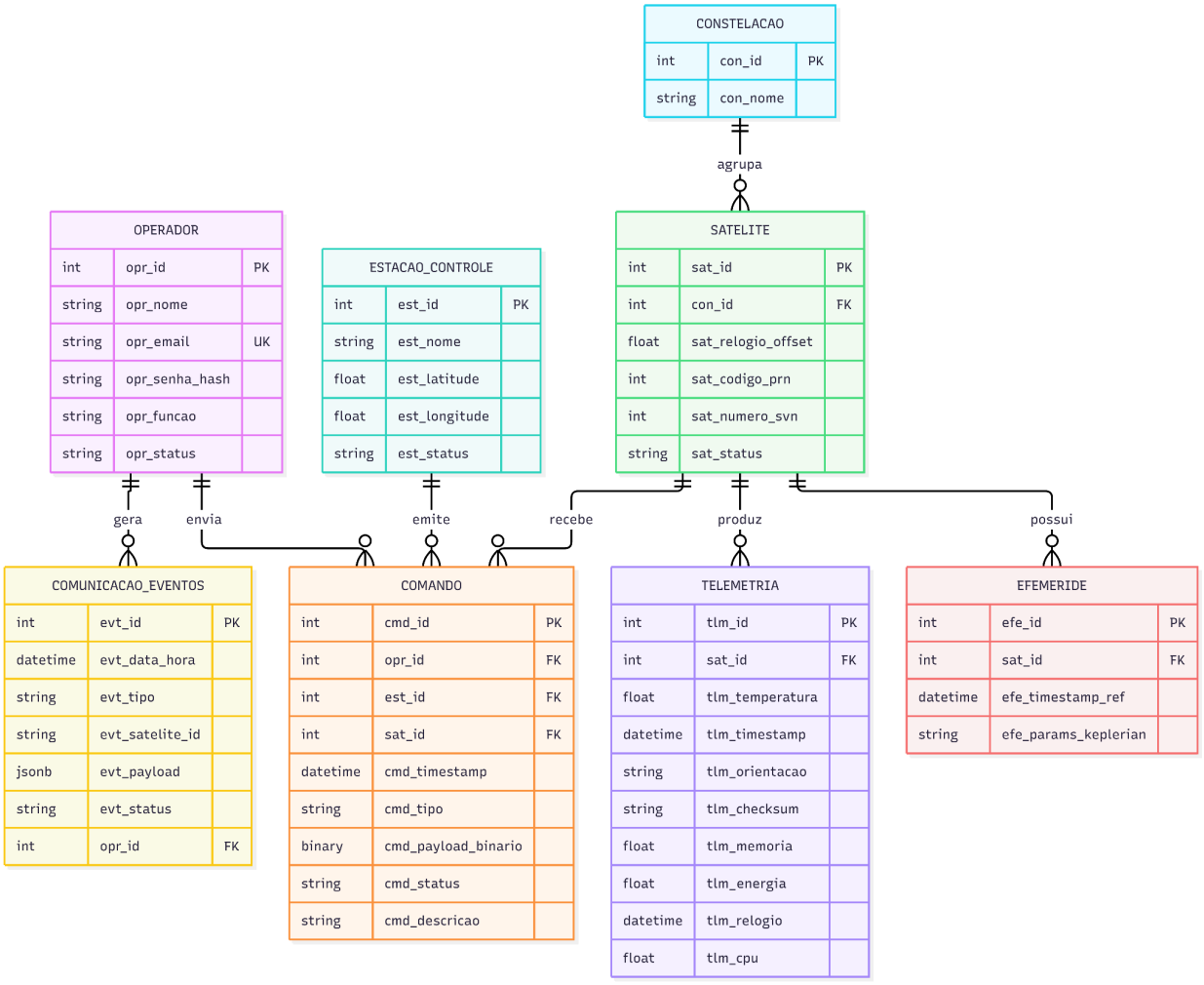
Segmento	Tabela	Descrição
TS1 (Espacial)	OPERADOR	Operadores do segmento espacial
	ESTACAO_CONTROLE	Estações de controle terrestres
	COMANDO	Comandos enviados aos satélites
	CONSTELACAO	Constelações de satélites
	SATELITE	Satélites cadastrados
	TELEMETRIA	Dados de telemetria do segmento espacial
	EFEMERIDE	Parâmetros orbitais keplerianos
	COMUNICACAO_EVENTOS	Eventos de auditoria e comunicação
TS2 (Terrestre)	LOGIN	Sessões de usuário
	USUARIO	Operadores do segmento terrestre
	REFRESH_TOKENS	Tokens de renovação de sessão
	DISPOSITIVO	Dispositivos móveis terrestres
	USUARIO_DISPOSITIVO	Associação entre usuários e dispositivos
	PONTO	Pontos geográficos (lat, lon, alt)
	RUA	Vias e logradouros
	CIDADE	Municípios
	LOCAL	Pontos de interesse
	TELEMETRIA	Dados de telemetria do segmento terrestre

	HISTORICO_LOCALIZACAO	Histórico de localização dos satélites

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, os diagramas entidade-relacionamento dos segmentos espacial (TS1) e terrestre (TS2).

Figura 3. Diagrama Entidade-Relacionamento TS1



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Figura 4. Diagrama Entidade-Relacionamento TS2



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

4.5.1. Rastreabilidade de Comandos

O gerenciamento de comandos remotos implementa um mecanismo de rastreabilidade que registra cada operação realizada. O fluxo compreende:

I. Validação: verificação de que a estação de controle existe e está ativa, e que o satélite existe e está operacional;

II. Persistência: o comando é armazenado com associação ao operador responsável, estação de controle, satélite, tipo, payload binário, status e descrição;

III. Auditoria: cada comando enviado gera um evento de auditoria com timestamp, usuário, operação e dado manipulado;

IV. Consulta: os comandos podem ser filtrados por satélite, tipo e período, com paginação e ordenação cronológica.

4.5.2. Serviço de Auditoria

O serviço de auditoria implementa duas funções complementares:

I. registrar_evento_db: persiste o evento associando-o a um satélite, operador e payload, com status de execução;

II. registrar_evento_background: executa o registro em background, abrindo uma sessão própria de banco de dados fora do ciclo da requisição, garantindo que operações assíncronas (como o envio de comandos) sejam auditadas mesmo após o término da requisição HTTP.

O registro em sessão própria evita bloquear a requisição; porém, por não ocorrer na mesma transação do comando, uma falha no registro de auditoria não reverte o comando. Consequentemente, é possível que um comando seja persistido sem o evento de auditoria correspondente. Além disso, a associação entre o evento e o comando é feita pelo identificador do comando (cmd_id) registrado

no campo JSONB do evento, sem chave estrangeira, e a imutabilidade da trilha não é imposta pelo banco de dados. Mecanismos como o padrão transactional outbox — em que o evento é gravado na mesma transação do comando e processado de forma assíncrona —, rotinas periódicas de reconciliação e restrições de somente inserção (append-only) podem eliminar essas lacunas e são considerados trabalhos futuros.

A rastreabilidade de comandos foi validada por meio dos casos de teste CT-COMANDO-001 a CT-COMANDO-003 e CT-HISTCOM-001 a CT-HISTCOM-003, que verificam o registro, envio e consulta de comandos, incluindo a persistência de eventos de auditoria.

4.6. Camada de Análise com APACHE SPARK

A camada de análise utiliza Apache Spark para consultas analíticas sobre dados históricos de telemetria e rotas. O pipeline de dados segue as seguintes etapas:

I. Exportação: os dados são extraídos do PostgreSQL via consultas SQL e exportados para arquivos CSV;

II. Conversão: os arquivos CSV são convertidos para o formato Parquet;

III. Carregamento: os DataFrames Spark são criados a partir dos arquivos Parquet;

IV. Consulta: as consultas Spark SQL suportam filtros por satélite, período, tipo de evento e duração de rota;

V. Agregação: o sistema calcula indicadores como total de rotas e extensão média percorrida.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Demonstração Operacional

A demonstração funcional do SPRB-BD foi realizada em ambiente controlado (localhost), com execução simultânea dos dois segmentos previstos na arquitetura. O TS1 operou nas portas 5173 (frontend), 8000 (API) e 5432 (banco de dados), enquanto o TS2 operou nas portas 5174 (frontend), 8001 (API) e 5433 (banco de dados).

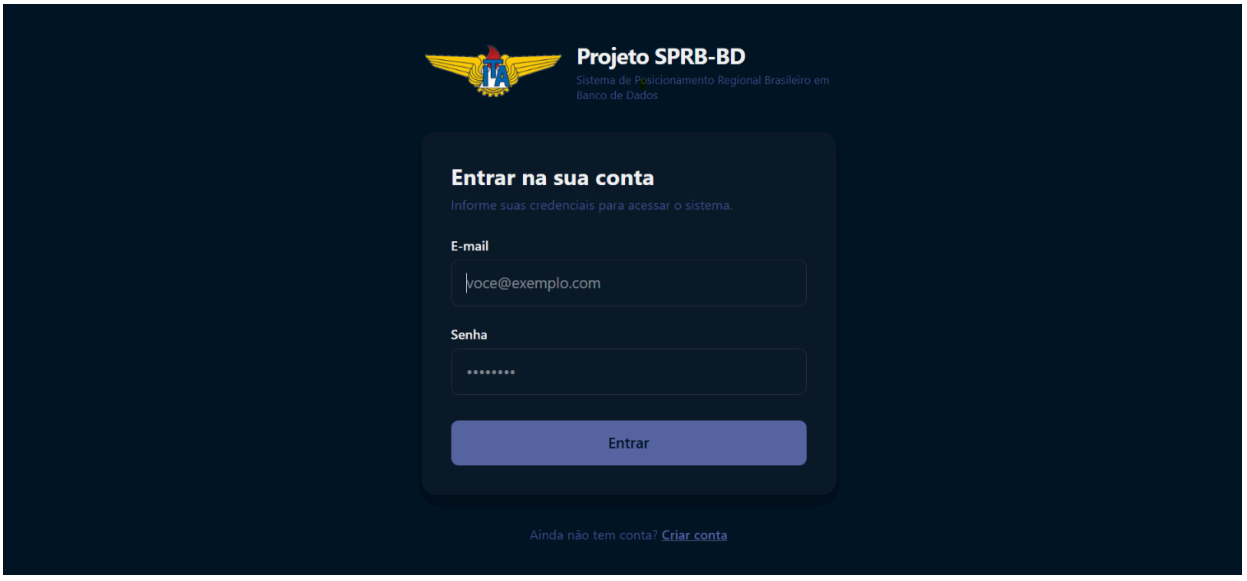
Os dados utilizados na demonstração são sintéticos: a telemetria é gerada por simulação com valores aleatórios e as efemérides são parâmetros keplerianos definidos para fins de teste, selecionados de modo que os footprints cubram as regiões de referência. Assim, os resultados de cobertura ilustram o funcionamento do pipeline e não constituem avaliação de desempenho orbital. Os identificadores dos satélites são rótulos de teste e não correspondem a dados orbitais reais. A telemetria sintética é gerada pelo módulo telemetry_simulation.py, com valores sorteados em distribuição uniforme (por exemplo, temperatura entre 20 °C e 60 °C e uso de CPU entre 10% e 80%), sem semente aleatória fixa; os dados de demonstração do TS2 são gerados pelos scripts seed_ts2_demo.py e reseed_ts2_historico.py, disponíveis no repositório do projeto (Monteiro, 2026).

A execução simultânea permitiu verificar o funcionamento simultâneo dos dois segmentos, a disponibilidade de seus respectivos serviços e a operação das funcionalidades

implementadas. Nesse ambiente, foram demonstrados recursos de autenticação, cadastro, persistência, cálculo de cobertura, visualização geoespacial, registro e consulta de telemetria, histórico de localização e análise de dados.

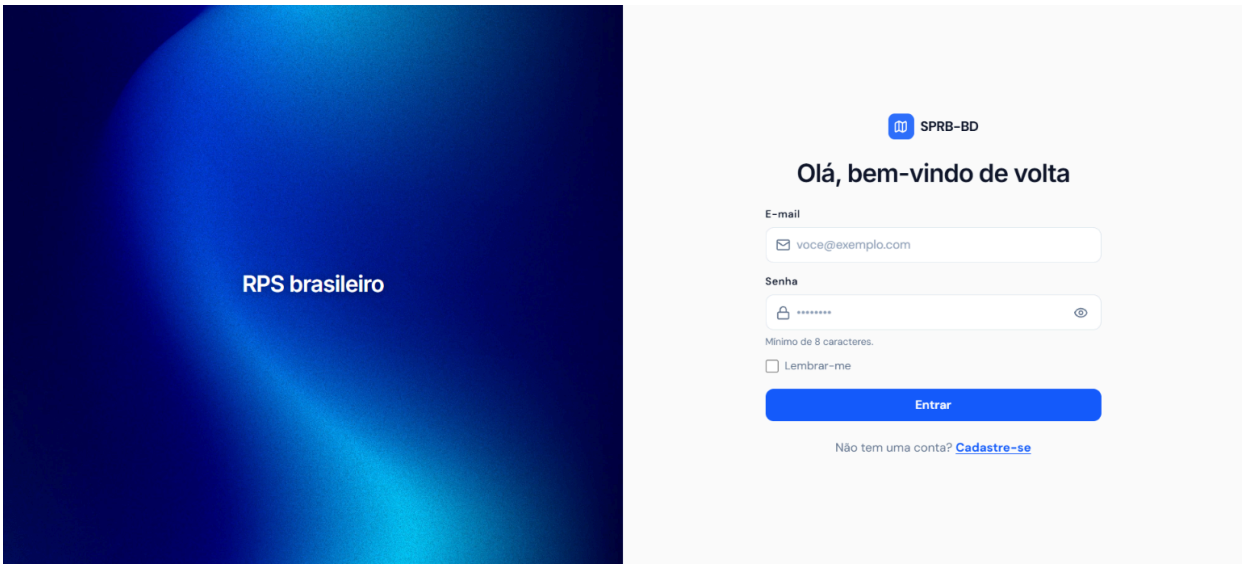
As Figuras 5 a 10 apresentam as principais interfaces do sistema em funcionamento, incluindo as telas de autenticação dos segmentos, gerenciamento de satélites, cálculo de cobertura, visualização de telemetria, histórico de localização e dashboard analítico.

Figura 5. Tela de autenticação do TS1.



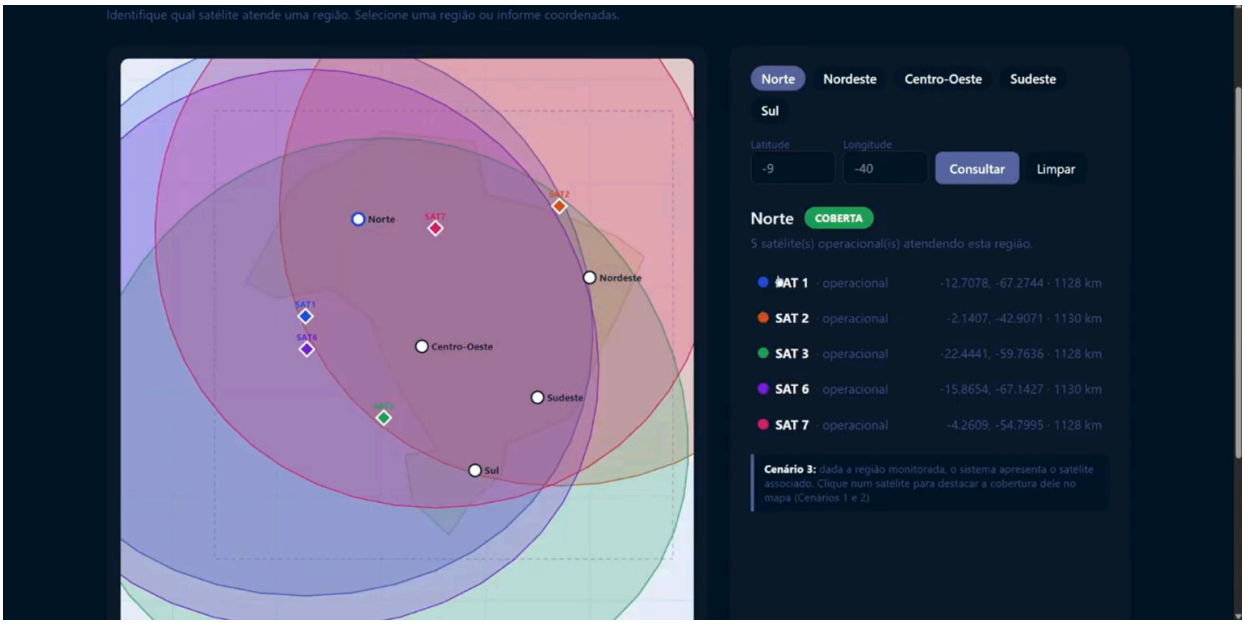
Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Figura 6. Tela de autenticação do TS2.



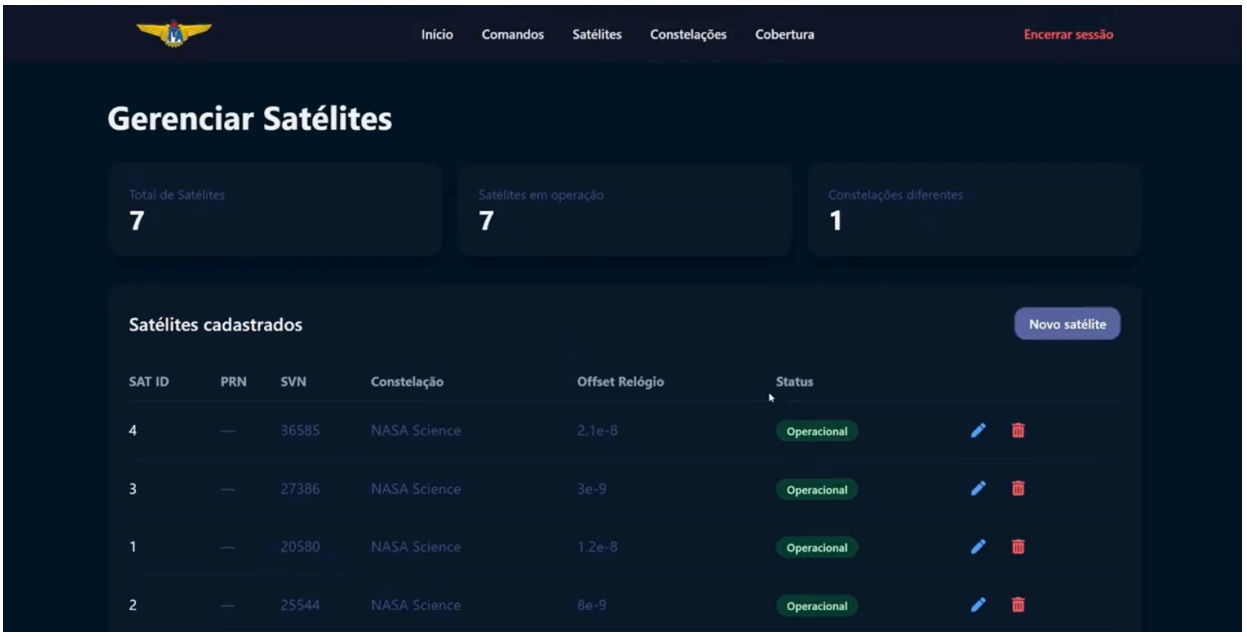
Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Figura 7. Tela de cobertura por região (TS1)



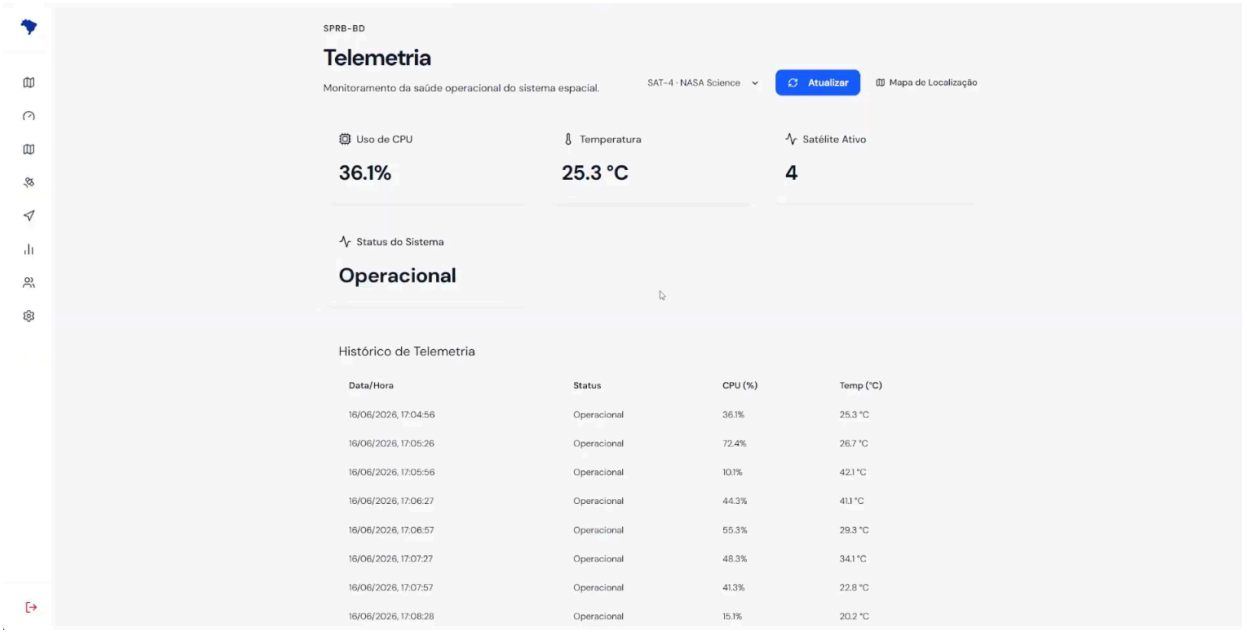
Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Figura 8. Tela de gerenciamento de satélites (TS1)



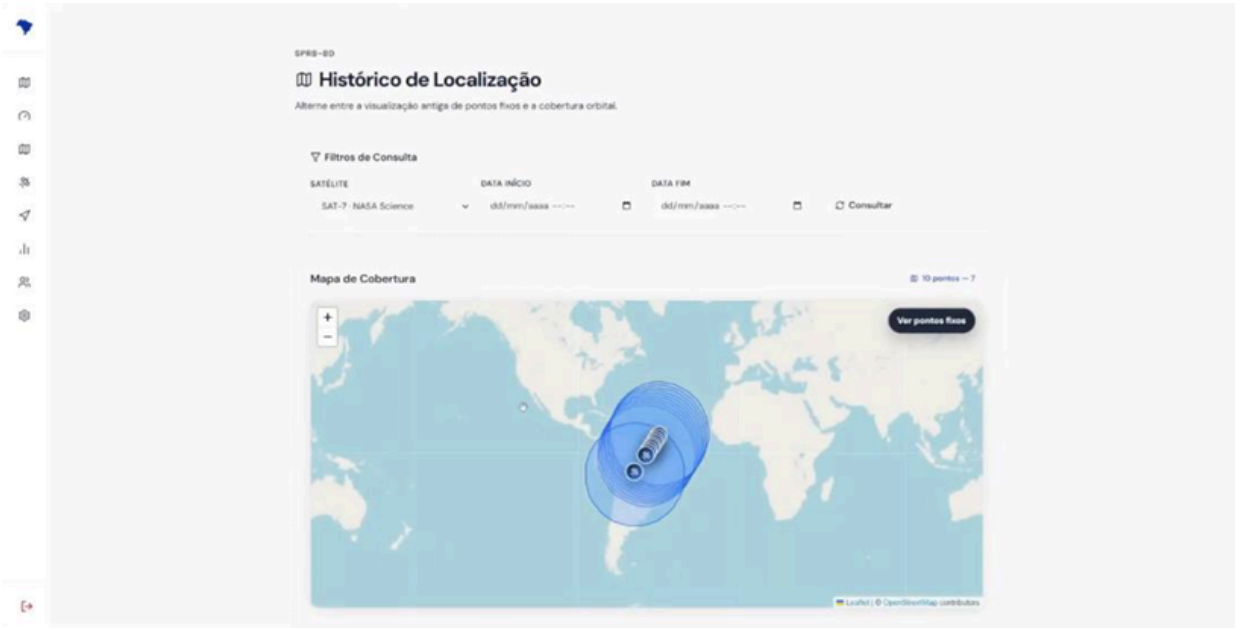
Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Figura 9. Tela de telemetria (TS2)



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Figura 10. Tela de cobertura e histórico de localização do satélite (TS2).



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

A demonstração foi realizada com dados de teste persistidos nos bancos PostgreSQL dos respectivos segmentos. Os resultados apresentados correspondem ao estado funcional do protótipo no ambiente experimental utilizado, não constituindo uma avaliação de desempenho, precisão de posicionamento ou escalabilidade.

5.1.1. Métricas do Protótipo

Ao final das três sprints, o protótipo apresenta as seguintes métricas de implementação:

Tabela 6. Métricas de implementação.

Métrica	**Valor**
Tabelas no banco de dados	19 (8 TS1 + 11 TS2)
User Stories totais	54 (3 Sprints)
Registros de telemetria	528
Pontos de localização	338
Locais cadastrados	388

Estações de controle	215

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

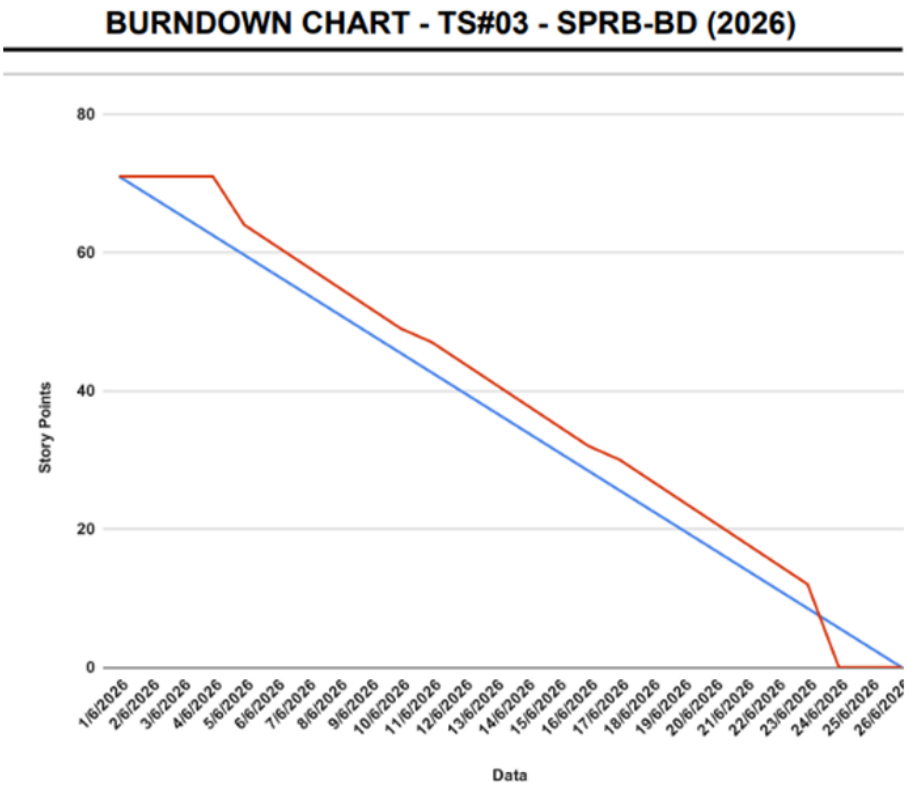
As métricas apresentadas caracterizam o estado do protótipo ao final do ciclo de desenvolvimento e servem como referência para a demonstração realizada no ambiente controlado. Elas não devem ser interpretadas como métricas de desempenho ou escalabilidade do sistema.

A demonstração evidencia que a arquitetura proposta permite organizar, em componentes independentes, funcionalidades de cadastro, processamento, persistência, visualização e análise. Os segmentos mantêm bancos independentes.

Por construção, a camada de análise opera sobre dados exportados, de modo que o processamento de dados históricos não acessa o banco transacional. Esses resultados indicam que a arquitetura é adequada como base experimental para a construção e integração de funcionalidades de sistemas regionais de PNT, embora sua adequação a cenários operacionais de maior escala ainda dependa de validações adicionais.

A Figura 11 apresenta o burndown chart da Sprint 3, referente ao acompanhamento do time integrado (TS3), com duração de 26 dias corridos (de 1º a 26 de junho de 2026). A linha real permaneceu estável nos quatro primeiros dias e apresentou queda abrupta de 12 story points para zero entre 23 e 24 de junho, o que indica concentração do encerramento de tarefas ao final da sprint.

Figura 11. Burndown chart da Sprint 3 (time integrado TS3).



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

5.1.2. Resultados de Teste

O plano de testes foi estruturado de forma incremental ao longo das três sprints, com casos derivados dos critérios de aceitação de cada User Story. A Tabela 7 apresenta a distribuição dos casos de teste por sprint e o resultado consolidado.

Tabela 7. Resultados de Teste por Sprint e Time.

Sprint	Time	Casos	Aprovados	Reprovados
Sprint 1	TS1	16	16	0
Sprint 1	TS2	32	32	0
Sprint 2	TS1	30	30	0
Sprint 2	TS2	21	21	0
Sprint 3	TS3 (TS1 + TS2)	38	38	0
Total	-	137	137	0

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Os casos de teste foram executados em ambiente controlado (localhost), com os dois segmentos operando simultaneamente. Cada caso especifica critérios de aceitação, passos de execução, resultado esperado e dados de teste. A planilha completa de testes está disponível no repositório do projeto (Monteiro, 2026). Complementarmente, os backends dos dois segmentos contêm testes automatizados com pytest; no TS2, esses testes são executados em integração contínua, com medição da cobertura de código.

A Tabela 8 apresenta exemplos representativos de casos de teste por área funcional.

Tabela 8. Exemplos de Testes.

ID	Descrição	Resultado
CT-COBERTURA-001	Validação de exibição de áreas cobertas no mapa	Sucesso
CT-COBERTURA-002	Validação de detalhes da área de cobertura	Sucesso
CT-COBERTURA-003	Validação de alternância de camadas de satélites	Sucesso
CT-COMANDO-001	Validação de registro de solicitação de comando	Sucesso
CT-COMANDO-002	Validação de envio de comando ao dispositivo	Sucesso
CT-COMANDO-003	Validação de histórico de comandos enviados	Sucesso

CT-SPARK-004	Validação de consulta de logs de satélites no Spark	Sucesso
CT-SPARK-006	Validação de consultas agregadas em logs	Sucesso

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

5.2. Respostas às Questões de Pesquisa

QP1 (rastreabilidade). O mecanismo descrito na Seção 4.5.1 associa cada comando ao operador, à estação de controle, ao satélite, ao tipo, ao payload, ao status e ao instante da operação, e os casos de teste CT-COMANDO-001 a CT-COMANDO-003 e CT-HISTCOM-001 a CT-HISTCOM-003 verificaram o registro e a consulta dessas informações. A resposta é, portanto, afirmativa no ambiente avaliado, com a ressalva de que o evento de auditoria é registrado fora da transação do comando (Seção 4.5.2).

QP2 (reprodutibilidade). A resposta é parcial. As efemérides são persistidas com seu instante de referência, e a função de propagação para um instante especificado é determinística e retorna, junto com a posição, o identificador da efeméride utilizada, o que permite recalcular a posição histórica de um satélite a partir dos registros armazenados. Entretanto, no cálculo de cobertura exibido ao operador, o instante de propagação é obtido somando ao instante de referência um intervalo sorteado que não é persistido; assim, o polígono de cobertura apresentado não pode ser reproduzido exatamente a partir dos registros. De forma análoga, os dados sintéticos de telemetria são gerados sem semente aleatória fixa, e a identificação do modelo orbital que gerou as rotas do TS2 não é registrada junto aos dados.

QP3 (análise histórica). As consultas analíticas sobre telemetria e rotas foram executadas no Spark a partir de arquivos Parquet exportados, sem acesso ao banco transacional, conforme verificado pelos casos CT-SPARK-004 e CT-SPARK-006. A resposta é afirmativa no ambiente avaliado, embora o desempenho dessa separação com volumes maiores de dados não tenha sido medido.

Em relação à questão de pesquisa principal, os resultados indicam que é viável construir uma arquitetura de referência com as características propostas, no escopo funcional e no ambiente avaliados, com rastreabilidade das operações de comando e reprodutibilidade ainda parcial.

5.3. Discussão e Princípios de Projeto

Além do artefato, a construção e a avaliação do SPRB-BD produziram conhecimento de projeto que pode orientar outras instanciações da arquitetura. Os principais princípios identificados são:

I. Vincular explicitamente o registro de auditoria à operação auditada: a ausência de chave estrangeira entre o evento de auditoria e o comando dificulta a reconstrução íntegra da trilha; recomenda-se que cada evento referencie a operação de origem e seja gravado na mesma transação ou por meio de um mecanismo de outbox;

II. Registrar a proveniência dos dados derivados: o sorteio não registrado do instante de propagação no cálculo de cobertura e a coexistência de dois modelos orbitais mostraram que cada posição ou cobertura calculada deve registrar o instante, o modelo, a versão e os parâmetros que a geraram, e que os

dados sintéticos devem ser gerados com semente fixa e registrada, em consonância com os conceitos de entidade, atividade e agente do W3C PROV;

III. Separar a análise histórica do armazenamento transacional por meio de snapshots identificáveis: a exportação para Parquet isola a carga analítica, mas a reprodutibilidade das análises depende de que cada snapshot seja identificado e versionado;

IV. Explicitar contratos de integração entre segmentos: o acesso direto do TS2 ao banco do TS1 simplificou a integração, mas acoplou os segmentos ao esquema de dados; interfaces explícitas (API ou visões de banco dedicadas) reduzem esse acoplamento;

V. Estabelecer padrões técnicos comuns desde a primeira iteração: o desenvolvimento independente dos times resultou em bibliotecas e convenções de nomenclatura divergentes, o que aumentou o esforço de integração na Sprint 3; padrões compartilhados e uma definição de pronto (definition of done) comum mitigam esse efeito.

5.4. Limitações e Ameaças à Validade

Este trabalho apresenta limitações que devem ser consideradas:

I. Ambiente de validação: os testes foram conduzidos em ambiente controlado (localhost), não tendo sido realizada avaliação da arquitetura em infraestrutura distribuída real ou em condições operacionais de campo.

II. Comunicação com hardware: o sistema não foi validado com antenas GNSS, equipamentos de radiofrequência ou hardware espacial reais. A comunicação entre os componentes associados à estação terrestre e ao segmento espacial foi representada no nível arquitetural e de software, mas não foi submetida a validação experimental com equipamentos físicos.

III. Métricas quantitativas: não foram realizadas avaliações sistemáticas de precisão posicional, como erro médio quadrático (RMSE), nem medições de latência de comunicação, vazão (throughput) ou escalabilidade. Essas métricas permanecem como objetivos para trabalhos futuros.

IV. Validação da arquitetura de referência: a arquitetura foi instanciada e demonstrada em um único protótipo. Portanto, não foi avaliada sua reutilização em múltiplas implementações independentes ou em diferentes cenários de sistemas regionais de PNT.

V. Modelo orbital: a implementação atual utiliza dois modelos de propagação orbital distintos — um modelo kepleriano simplificado no cálculo de cobertura (TS1) e um modelo IGSO regional nas rotas do TS2. A validação dos modelos com efemérides reais e a unificação dos fluxos de propagação orbital constituem trabalhos futuros.

VI. Integração entre segmentos: a integração entre TS1 e TS2 limita-se ao acesso somente leitura do TS2 às tabelas satelite e constelacao do TS1. Não há replicação automática de telemetria ou de eventos de auditoria entre os segmentos, o

que pode limitar análises que exijam correlação temporal entre dados dos dois segmentos.

VII. Validade da avaliação: os casos de teste foram derivados dos critérios de aceitação definidos pela própria equipe e executados com dados sintéticos; além disso, o artefato foi construído em contexto acadêmico, o que limita a generalização dos resultados para ambientes operacionais.

Apesar dessas limitações, os resultados demonstram a viabilidade funcional da arquitetura proposta no ambiente avaliado, evidenciando a integração dos componentes e a execução das principais funcionalidades previstas. A validação em campo, a avaliação quantitativa de desempenho e a instanciação da arquitetura em diferentes ambientes constituem etapas futuras de investigação.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o SPRB-BD, uma arquitetura de referência para sistemas regionais de posicionamento, com ênfase em persistência, auditoria e rastreabilidade das operações. Desenvolvida no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) segundo a Design Science Research, com ciclos de construção executados em Scrum no contexto da abordagem IPBL, a arquitetura foi instanciada em um protótipo composto por dois segmentos — espacial e terrestre — executados simultaneamente no ambiente experimental.

Em resposta à questão de pesquisa, os resultados indicam que é viável construir uma arquitetura com essas características no ambiente avaliado: o protótipo permitiu recuperar a trilha das operações de comando (QP1), recalcular posições históricas a partir

das efemérides persistidas — embora o polígono de cobertura exibido ao operador não seja reproduzível exatamente (QP2) — e executar análises históricas sem acesso ao banco transacional (QP3), com as ressalvas discutidas nas Seções 5.2 a 5.4.

Os resultados obtidos permitem destacar as seguintes contribuições deste trabalho:

6.1. Principais Contribuições

I. Arquitetura de referência: foi proposta e instanciada uma arquitetura em camadas para a camada de dados de sistemas regionais de PNT, com elementos específicos do domínio. Essa organização fornece uma base arquitetural reutilizável que favorece a separação de responsabilidades e a evolução independente de seus componentes.

II. Módulo de auditoria e rastreabilidade: foi implementado um mecanismo capaz de registrar e rastrear as operações realizadas pelo sistema. Essa funcionalidade contribui para a identificação da origem e do histórico das operações e complementa o BRT-RPS ao enfatizar a rastreabilidade das operações.

III. Pipeline de análise de dados: foi integrada uma infraestrutura baseada em Apache Spark para a realização de consultas e análises sobre dados históricos. Essa abordagem permite separar o processamento transacional das atividades de processamento analítico sobre dados históricos, contribuindo para uma arquitetura mais adequada à evolução do sistema.

IV. Avaliação funcional: o protótipo foi submetido a 137 casos de teste ao longo das três sprints, com os segmentos espacial e terrestre operando simultaneamente em ambiente controlado. Os resultados demonstraram a viabilidade funcional da arquitetura proposta e de seus principais mecanismos de persistência, auditoria e análise.

V. Princípios de projeto: a construção e a avaliação do artefato resultaram em princípios de projeto (Seção 5.3) que podem orientar novas instanciações da arquitetura.

6.2. Trabalhos Futuros

Embora os resultados obtidos demonstrem a viabilidade funcional do SPRB-BD, algumas etapas permanecem necessárias para sua evolução e validação em condições mais próximas de um cenário operacional real. Entre os principais trabalhos futuros, destacam-se:

I. Validação em campo: integração do sistema com uma antena GNSS real e realização de experimentos em condições operacionais, incluindo a avaliação do desempenho posicional por meio de métricas como o RMSE (Root Mean Square Error).

II. Implantação em infraestrutura de nuvem: disponibilização do sistema em ambiente de computação em nuvem para avaliar aspectos relacionados à escalabilidade, disponibilidade, desempenho e comportamento do sistema sob diferentes cargas de processamento.

III. Integração com o Serviço de Aumentação para a Aviação Civil (SAC): investigação da integração com o SAC como forma de complementar as capacidades do sistema e ampliar suas

possibilidades de aplicação em cenários relacionados à infraestrutura de posicionamento e navegação.

IV. Evolução do mecanismo de auditoria e da proveniência: vincular os eventos de auditoria às operações de origem, adotar a gravação transacional dos eventos, registrar o modelo orbital associado a cada dado derivado e unificar os modelos de propagação orbital.

Em síntese, o SPRB-BD demonstrou a viabilidade de uma arquitetura de referência orientada à persistência, auditoria e rastreabilidade de dados e operações em sistemas regionais de posicionamento. Os resultados obtidos estabelecem uma base para a continuidade do desenvolvimento e para futuras avaliações de desempenho em ambientes reais. Nesse sentido, a arquitetura proposta pode servir de base para iniciativas futuras voltadas a soluções nacionais aplicadas a infraestruturas críticas de posicionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELOV, Samuil; GREFEN, Paul; GREEFHORST, Danny. A framework for analysis and design of software reference architectures. Information and Software Technology, v. 54, n. 4, p. 417-431, 2012.

BASS, Len; CLEMENTS, Paul; KAZMAN, Rick. Software Architecture in Practice. 3. ed. Upper Saddle River: Addison-Wesley, 2012.

BEIDOU NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (BEIDOU). System. 2026. Disponível em: http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/. Acesso em: 15 set. 2026.

CABINET OFFICE, Government of Japan. Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) — Orbital Characteristics. 2025. Disponível em: https://qzss.go.jp/en/technical/technology/orbit.html. Acesso em: nov. 2025.

CLOUTIER, Robert et al. The concept of reference architectures. Systems Engineering, v. 13, n. 1, p. 14-27, 2010.

CUNHA, Adilson Marques da et al. Applying Scrum in an interdisciplinary project using Big Data, Internet of Things, and credit cards. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY – NEW GENERATIONS (ITNG), 12., 2015, Las Vegas. Proceedings [...]. Los Alamitos: IEEE, 2015.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). What is Galileo? 2026. Disponível em: https://www.esa.int/Applications/Satellite_navigation/Galileo/What_is_Galileo. Acesso em: 15 set. 2026.

EUROPEAN UNION AGENCY FOR THE SPACE PROGRAMME (EUSPA). EGNOS: frequently asked questions. 2026. Disponível em: https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/egnos/faqs. Acesso em: 19 out. 2026.

GLONASS INFORMATION AND ANALYTICAL CENTER (GLONASS IAC). About GLONASS. 2026. Disponível em: https://glonass-iac.ru/en/about_glonass/. Acesso em: 15 set. 2026.

HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. Design Science in Information Systems Research. MIS Quarterly, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.

HEVNER, Alan R. A three cycle view of design science research. Scandinavian Journal of Information Systems, v. 19, n. 2, p. 87-92, 2007.

HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard; LICHTENEGGER, Herbert; WASLE, Elmar. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.

INDIAN SPACE RESEARCH ORGANISATION (ISRO). Satellite Navigation Services. 2026. Disponível em: https://www.isro.gov.in/SatelliteNavigationServices.html. Acesso em: 19 out. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Obter acesso à RBMC-IP. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/pt-br/servicos/obter-acesso-a-rbmc-ip. Acesso em: 19 out. 2026.

ISO/IEC/IEEE. ISO/IEC/IEEE 42010:2022 — Software, systems and enterprise — Architecture description. Geneva: ISO, 2022.

KAPLAN, Elliott D.; HEGARTY, Christopher J. (ed.). Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. 3. ed. Boston: Artech House, 2017.

LOMBARDI, Michael A. An Evaluation of Dependencies of Critical Infrastructure Timing Systems on the Global Positioning System (GPS). NIST Technical Note 2189, 2021. DOI: 10.6028/NIST.TN.2189. Disponível em: https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2189. Acesso em: 5 out. 2026.

MCCARTHY, James; LI-BABOUD, Ya-Shian; BRULE, Joseph; MELDORF, Karri. Foundational PNT Profile: Applying the

Cybersecurity Framework for the Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Services. NIST Interagency/Internal Report 8323 Revision 1, 2023. DOI: 10.6028/NIST.IR.8323r1. Disponível em: https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8323r1. Acesso em: 5 out. 2026.

MONTEIRO, Raphaela Barbosa. SPRB-BD: Projeto Acadêmico para um Sistema de Posicionamento Regional Brasileiro em Banco de Dados. GitHub, 2026. Disponível em: https://github.com/raphaelamonteiro/sprb-bd. Acesso em: 5 out. 2026.

MORAES, A. de O.; PERRELLA, W. Performance evaluation of GPS receiver under equatorial scintillation. Journal of Aerospace Technology and Management, v. 1, n. 2, p. 193-200, 2009. DOI: 10.5028/jatm.v1i2.24.

NAKAGAWA, Elisa Yumi et al. Consolidating a process for the design, representation, and evaluation of reference architectures. In: IEEE/IFIP CONFERENCE ON SOFTWARE ARCHITECTURE (WICSA), 2014, Sydney. Proceedings [...]. Los Alamitos: IEEE, 2014. p. 143-152.

PEFFERS, Ken; TUUNANEN, Tuure; ROTHENBERGER, Marcus A.; CHATTERJEE, Samir. A design science research methodology for information systems research. Journal of Management Information Systems, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007.

PRESSMAN, Roger S.; MAXIM, Bruce R. Engenharia de Software: Uma Abordagem Profissional. 9. ed. Porto Alegre: AMGH (Bookman), 2021.

SCHWABER, Ken; SUTHERLAND, Jeff. The Scrum Guide. 2020. Disponível em: https://scrumguides.org/. Acesso em: 19 out. 2026.

SILVA, J. M. F. et al. BRT-RPS: A Brazilian Real-Time Regional Positioning System — Proof of Concept. Journal of Aerospace Technology and Management, v. 18, e0126, 2026.

UNITED STATES. U.S. Space-Based Positioning, Navigation, and Timing Policy. Washington, D.C.: The White House, 2021.

W3C. PROV-Overview: An Overview of the PROV Family of Documents. W3C Working Group Note, 2013. Disponível em: https://www.w3.org/TR/prov-overview/. Acesso em: 15 set. 2026.

ZAHARIA, Matei et al. Apache Spark: a unified engine for big data processing. Communications of the ACM, v. 59, n. 11, p. 56-65, 2016.

ZHANG, H.; PENG, S.; LIU, L.; SU, S.; CAO, Y. Review on GPS spoofing-based time synchronisation attack on power system. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 14, p. 4301-4309, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0253. Acesso em: 20 set. 2026.

ZIDAN, J. et al. GNSS vulnerabilities and existing solutions: a review of the literature. IEEE Access, v. 9, p. 153960-153976, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973759. Acesso em: 20 set. 2026.