

Observatório de Tecnologias Espaciais

**Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial
Ano 7, Número 1**

Segmento solo para a área espacial



cgée

**Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial
Ano 7, Número 1**

Segmento solo para a área espacial

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

Ciência, Tecnologia e Inovação

Projeto – Observatório de Tecnologias Espaciais (OTE)

**Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial
Ano 7, Número 1**

Segmento solo para a área espacial



Brasília, DF

Dezembro, 2023

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

Organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

Presidente

Fernando Cosme Rizzo Assunção

Diretores

Carlos Roberto Fortner

Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial. Ano 7, Número 1.
Segmento solo para área espacial. Projeto – Observatório de Tecnologias
Espaciais – OTE. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2023.

117 p.: il.

1. Tecnologias espaciais. 2. Segmento solo. 3. CGEE.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE
SCS, Quadra 9 – Torre C – 4º andar – salas 401 a 405
Edifício Parque Cidade Corporate
70308-200 - Brasília, DF
Telefone: (61) 3424.9600
<http://www.cgee.org.br>

Referência bibliográfica:

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE. **Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial. Segmento solo para área espacial.** Observatório de Tecnologias Espaciais - OTE. Brasília, DF:2023. (Ano 7, Número 1).

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos neste relatório poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que citada a fonte.

Este relatório é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do 3º Contrato de Gestão CGEE – 3º Termo Aditivo/Projeto: Observatório de Tecnologias Espaciais – OTE – 8.10.56.01.50.01/MCTI/2023.

Projeto – Observatório de Tecnologias Espaciais (OTE)

Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial
Ano 7, Número 1

Segmento solo para a área espacial

Supervisão

Fernando Rizzo

Equipe técnica do CGEE

Thyrso Villela Neto (Coordenador)

Alessandra de Moura Brandão

César Augusto Costa

Fernando Teixeira Bueno

Consultor Externo

Claudemir Marcos da Silva

Apoio administrativo

Larissa Rocha

SUMÁRIO

SUMÁRIO	6
APRESENTAÇÃO	9
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. SISTEMAS ESPACIAIS E SEUS COMPONENTES	12
2.1 Segmento espacial.....	14
2.2 Segmento lançamento.....	18
2.2.1 Centro de Lançamento da Barreira do Inferno	24
2.2.2 Centro de Lançamento de Alcântara	26
2.3 Segmento apoio.....	28
2.4 Segmento solo.....	28
2.4.1 Redes de estações terrenas	31
2.4.2 Satélites retransmissores	32
2.4.3 Exemplo de arquitetura simplificada do segmento solo (e usuários) ..	34
2.4.4 Segmento solo do programa CBERS	39
2.4.5 Segmento solo do Amazonia 1	42
2.4.6 Segmento solo do programa SGDC	42
2.5 Segmento usuários	43
2.6 Implementação dos sistemas espaciais	44
3. ESTAÇÕES TERRENAS	46
3.1 Necessidade de comunicação das missões espaciais.....	46

3.2	Serviços do segmento solo das missões espaciais.....	47
3.3	<i>Deep space x near space</i>	48
3.4	Classificação das estações terrenas quanto à mobilidade.....	48
3.5	Uso do espectro eletromagnético pelo segmento solo	51
3.6	Estações terrenas de controle	54
3.7	Estações terrenas de dados	55
3.7.1	Estações de dados de RF	56
3.7.2	Estações de dados ópticas.....	56
3.8	Redes de estações terrenas.....	57
3.9	<i>Ground Station as a Service</i>	59
3.10	Estações terrenas nacionais.....	63
3.10.1	Estação terrena INPE/Cuiabá	63
3.10.2	Estação terrena INPE/Alcântara	64
3.10.3	Estação terrena INPE/Natal.....	64
3.10.4	Estação terrena INPE/Santa Maria	66
3.10.5	Estação terrena do ITA.....	66
3.10.6	Estação terrena da UFSC.....	67
3.10.7	Rede Integrada Brasileira de Rastreamento de Satélites.....	67
4.	NOVAS DEMANDAS E TECNOLOGIAS RELACIONADAS ÀS ESTAÇÕES TERRENAS	68
4.1	Bloco Antena + LNA.....	73
4.2	Bloco conversor de frequências para baixo	78
4.3	Bloco Receptor	80

4.4	Cadeia de transmissão	81
5.	TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS DO SEGMENTO SOLO	84
5.1	Segmento solo e estação terrena como um serviço	84
5.2	Virtualização do segmento solo.....	88
5.3	AWS Ground Station.....	93
5.3.1	Soluções tecnológicas da Kratos	94
5.3.2	Soluções tecnológicas da Safran	95
5.4	<i>Estações terrenas ópticas</i>	95
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
	REFERÊNCIAS	99
	LISTA DE FIGURAS	107
	LISTA DE TABELAS	109
	LISTA DE ABREVIATURAS	110
	APÊNDICE A – Frequências na faixa 100 MHz – 40 GHz para os serviços espaciais	113
	APÊNDICE B – GaaS – Fornecedores e características	117

APRESENTAÇÃO

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) desenvolveu um projeto denominado Observatório de Tecnologias Espaciais (OTE), que tem o propósito de acompanhar o desenvolvimento e a evolução de tecnologias do setor espacial no Brasil e no mundo.

O OTE busca identificar tendências e oportunidades tecnológicas nesse setor e gerar informações sobre tecnologias consideradas relevantes para o Programa Espacial Brasileiro. As informações obtidas pelo OTE são compiladas em relatórios periódicos enviados ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e podem apoiar os tomadores de decisão no âmbito do Sistema Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais (SINDAE), coordenado pela Agência Espacial Brasileira (AEB). Além disso, o OTE sugere ações que possam auxiliar processos de gestão tecnológica e de estabelecimento de estratégias de domínio tecnológico para o setor espacial brasileiro.

Resumidamente, o OTE utiliza o conceito de inteligência tecnológica para programar as suas observações e usa metodologias próprias ou adaptadas para auxiliar o processo de análise dessas observações, de forma a transformá-las em informações que possam ser úteis para os gestores tecnológicos do setor espacial brasileiro.

Um dos produtos do OTE é a série “Documentos Estratégicos para o Setor Espacial”, da qual o presente documento faz parte, que tem como objetivo fornecer informações sobre tópicos tecnológicos específicos, de forma a propiciar um entendimento mais aprofundado sobre temas de interesse para o Brasil no setor espacial.

No primeiro documento dessa série foi tratada uma categoria de satélites de pequeno porte, que são os nanosatélites conhecidos como CubeSats. O segundo documento dessa série foi dedicado a veículos lançadores de satélites de pequeno porte, mostrando um panorama sobre veículos lançadores no mundo. O terceiro documento dessa série tratou de sistemas de propulsão elétrica para satélites de pequeno porte. O quarto documento foi dedicado a sistemas de telecomunicações baseados em satélites de pequeno porte. Já no quinto documento foi tratado um tópico relacionado ao segmento solo de satélites de pequeno porte, que são as estações portáteis para recepção de dados e controle desses artefatos.

O sexto volume dessa série apresentou informações sobre outra tecnologia de interesse nacional, que é radar de abertura sintética (SAR, da sigla em inglês para *Synthetic Aperture Radar*) para uso em satélites. Em particular, foi explorado o uso dessa tecnologia em satélites de pequeno porte. Essa tecnologia tem vários atrativos para o Brasil. Por exemplo, com

satélites SAR é possível observar a superfície terrestre durante a noite, uma grande vantagem em relação a satélites que operam na faixa do visível do espectro eletromagnético.

O presente documento, o sétimo dessa série, tem como objetivo apresentar informações sobre tecnologias de interesse nacional associadas ao segmento solo para a área espacial. Com base no sistema de normas da ECSS (*European Cooperation for Space Standardization*), é apresentada uma descrição da composição dos sistemas espaciais, que é o componente de nível lógico mais alto das missões espaciais. Com essa decomposição, é mostrado o componente nacional para o sistema de estações terrenas com detalhamento suficiente para permitir uma avaliação preliminar desse item da infraestrutura do setor espacial nacional para a implementação de futuras missões espaciais.

De um modo geral, estações terrenas sempre estiveram associadas a altos custos de implementação, manutenção e operação. Na atual era de acesso facilitado ao espaço, principalmente com a introdução dos chamados *lean satellites*, a demanda por estações terrenas aumentou substancialmente. A redução dos custos de construção desses artefatos espaciais, principalmente dos CubeSats, gerou uma demanda natural por meios de solo com custos também reduzidos, em comparação com os sistemas tradicionais.

Uma tendência tecnológica dos transmissores de dados dos satélites de pequeno porte e CubeSats que vem se afirmando nos últimos anos é o uso da norma *Digital Video Broadcast, Satellite Second Generation* (DVB-S2) que possibilita aumento da taxa de dados (> 1 Gbps na banda X e > 2 Gbps na banda Ka) ou a redução da potência de transmissão, por exemplo. A adoção dessa norma propicia a redução dos custos dos receptores usados nas estações de recepção de sinais de satélites.

Alguns outros aspectos tecnológicos e de serviços acerca de estações terrenas são também abordados neste documento.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste documento é apresentar uma visão introdutória do segmento solo dos sistemas espaciais para diferentes missões espaciais. É dada ênfase à identificação e descrição dos grandes blocos funcionais que compõem esse segmento de forma que elas possam ser utilizadas com facilidade na investigação da infraestrutura do setor espacial disponível no País.

Para alcançar esse objetivo, na Seção 2 é feita uma subdivisão dos sistemas espaciais em grandes blocos, obedecendo a abordagem do sistema de normas da ECSS, com a identificação, ao final, dos blocos de interesse para o trabalho, nominalmente, o segmento solo e o seu componente sistema de estações terrenas. Na Seção 3 são apresentados os detalhes adicionais sobre o bloco “estações terrenas”. Nas Seções 4 e 5 são apresentadas, respectivamente, algumas das demandas e tendências tecnológicas do setor. Na Seção 6, são apresentadas algumas considerações sobre o tema.

2. SISTEMAS ESPACIAIS E SEUS COMPONENTES

O sistema espacial pode ser definido como “veículos e infraestrutura operando conjuntamente para realizar uma tarefa no ambiente espacial” (UNIVERSITY OF ILLINOIS URBANA-CHAMPAIGN, 2023). Com base em Wertz e Larson (1992), pode-se inferir que o sistema espacial é o sistema projetado e construído para realizar uma missão espacial específica.

De acordo com a ECSS, no seu glossário de termos (ECSS, 2012, p. 10 – 12), o sistema espacial (*space system*) é o sistema que contém, no mínimo, um segmento espacial (*space segment*) e um segmento solo (*ground segment*) ou um segmento lançamento (*launch segment*). O segmento espacial, de acordo com a mesma referência, é a parte do sistema espacial colocada no espaço para atender aos objetivos da missão espacial. O segmento solo é a parte do sistema espacial localizada no solo que monitora e controla os elementos do segmento espacial. O segmento lançamento é a parte do sistema espacial que é utilizada para transportar para o espaço os elementos do segmento espacial.

Conforme a ECSS (2012, p. 8), os sistemas espaciais são estruturados de acordo com a Figura 1 e compreendem quatro segmentos: espacial, lançamento, solo e apoio.

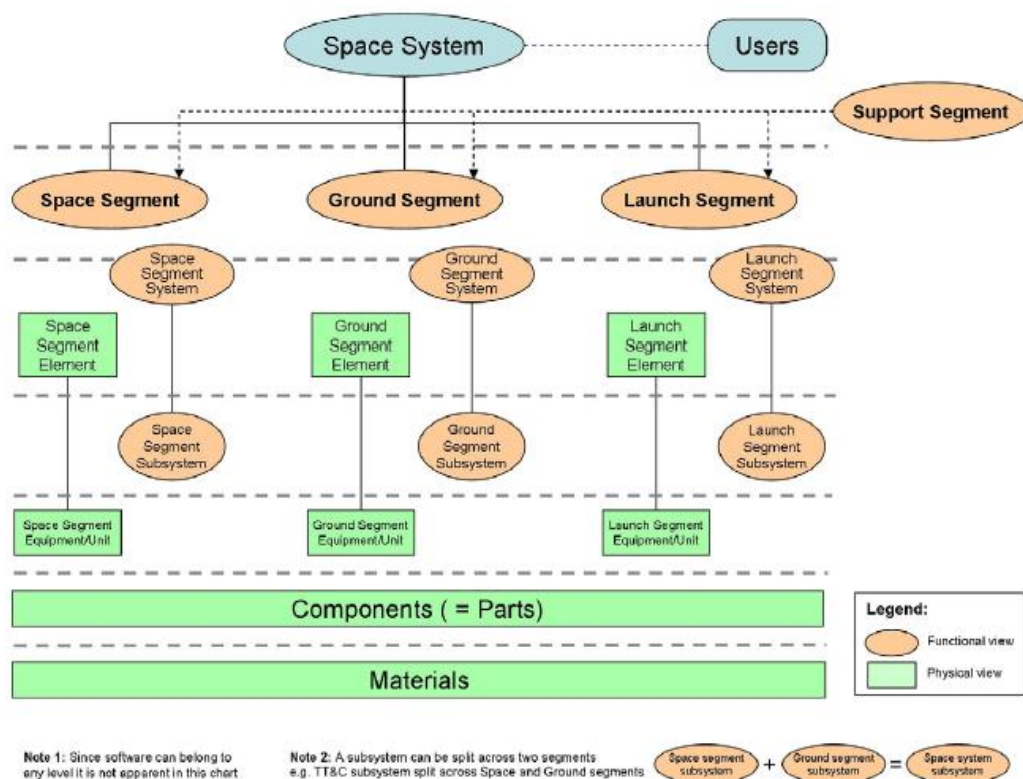


Figura 1 - Estruturação dos sistemas espaciais conforme a ECSS.

Fonte: ECSS (2012, p. 8).

Inspecionando-se a Figura 1 constata-se que os segmentos espacial, solo e lançamento são subdivididos funcionalmente em sistemas e subsistemas e, fisicamente, em elementos, equipamentos/unidades, componentes (ou partes) e materiais. Na Figura 1, é identificado também o segmento de apoio constituído pela infraestrutura e serviços genéricos utilizados para apoiar o desenvolvimento e a operação dos elementos dos outros três segmentos dos sistemas espaciais (ECSS, 2012, p. 12).

A arquitetura dos sistemas espaciais delineada na Figura 1 é bastante geral e permite a descrição de praticamente qualquer sistema espacial. Essa generalidade implica que a descrição detalhada dos sistemas espaciais específicos requer, normalmente, uma adaptação (tailoring) da arquitetura e esse processo é definido pela própria ECSS (2020).

O glossário de termos da ECSS (ECSS, 2012) não define um termo para se referir aos “usuários” dos sistemas espaciais identificados na Figura 1. Todavia, essa referência identifica alguns serviços executados no segmento solo que são destinados aos “usuários” (ECSS, 2012, p. 57).

O termo segmento usuários (*user segment*) é de uso corrente no ecossistema dos sistemas espaciais. Apesar de não definido no seu glossário de termos, a ECSS também o emprega no seu sistema de normas como, por exemplo, na norma sobre os requisitos de engenharia de sistemas (ECSS, 2009, p. 16, 43).

No presente trabalho, os sistemas espaciais são definidos como os sistemas projetados e construídos para realizar uma missão espacial específica e são compostos pelos segmentos espacial, lançamento, apoio, solo e usuários, conforme ilustrado na Figura 2.

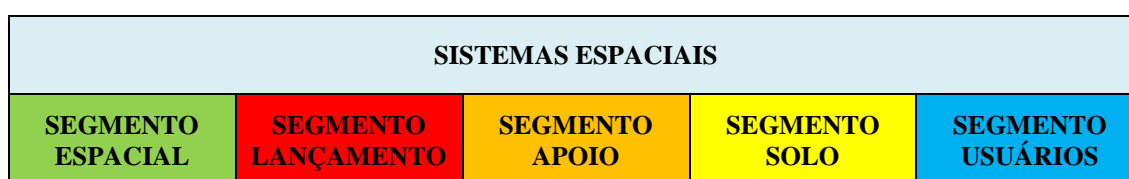


Figura 2 - Composição dos sistemas espaciais utilizada neste trabalho.

Deve-se notar a diferença da posição dos “usuários” dos sistemas espaciais nas Figuras 1 e 2. Na primeira figura, destaca-se a posição hierárquica dos “usuários” para enfatizar o fato de que os sistemas espaciais são desenvolvidos para atendê-los. Na segunda, destaca-se o aspecto operacional do uso dos sistemas espaciais pelos “usuários” o que requer sua

interação direta com os segmentos componentes, excetuando-se, usualmente, o segmento lançamento.

As missões espaciais podem ser as mais variadas e alguns exemplos mais comuns são o uso de satélites terrestres para o provimento de comunicações, imageamento da superfície e pesquisa da atmosfera; utilização de foguetes de sondagem para a pesquisa da atmosfera terrestre; uso de plataformas suborbitais para experimentos de microgravidade; uso de sondas e satélites para a pesquisa do espaço exterior.

Os componentes dos sistemas espaciais mostrados na Figura 2 são brevemente descritos nas próximas seções. O segmento solo é abordado mais extensamente devido ao foco do presente trabalho.

2.1 Segmento espacial

O segmento espacial é composto por um ou mais artefatos espaciais. Com base na Wikipedia, artefato espacial é um veículo projetado para voar e operar no espaço exterior (WIKIPEDIA, 2023). Ainda de acordo com essa referência, o espaço exterior é a região que se estende além da atmosfera terrestre a partir da linha de Kármán, na altitude aproximada de 100 km (WIKIPEDIA, 2023a).

Os satélites são um tipo de artefato espacial bastante comum e a sua característica distintiva dos outros artefatos é serem projetados para permanecer na órbita de um corpo celeste.

As órbitas dos satélites terrestres podem ser classificadas, em função das suas altitudes em relação à superfície da Terra, em baixa (LEO – *Low Earth Orbit*), média (MEO – *Medium Earth Orbit*) e geoestacionárias (GEO – *Geostationary Orbit*). Recentemente foi proposta a classe de órbitas terrestres de altitude muito baixa (VLEO – *Very Low Earth Orbit*) (VIRGILI LLOP et alii, 2014). Dependendo da trajetória dos satélites no espaço, as órbitas também podem ser classificadas em circulares ou elípticas. O período da órbita é o tempo necessário para que o satélite execute uma volta completa em torno do corpo celeste (no caso, a Terra, ou algum outro corpo ou um ponto imaginário, como o L2). Na Tabela 1 são listadas as classes de altitude das órbitas terrestres e os períodos correspondentes para o caso de órbitas circulares.

Tabela 1 - Altitude e período das órbitas terrestres.

ÓRBITA	ALTITUDE (km)	PERÍODO (h)
VLEO	< 450	< 1,6
LEO	500 – 1.000	1,6 – 1,8
MEO	5.000 – 12.000	3,5 – 7,0
GEO	≈ 36.000	≈ 24

Fonte: baseada em Elbert (2008, p. 22-23).
e Virgili Llop et alli (2014).

Os valores das faixas de altitude da tabela acima não são rigorosos (exceto para GEO) e variam um pouco conforme a referência consultada. Outra classificação usual dos satélites é quanto à sua massa. Na Tabela 2, são listadas as classes de satélites utilizando esse critério e os acrônimos correspondentes que serão usados nesse trabalho.

Tabela 2 - Classificação dos satélites pela sua massa.

MASSA (kg)	CLASSE DE SATÉLITE	ABREVIATURA
0,1 – 1	Picossatélite	PicS
1 – 10	Nanossatélite	NanS
10 – 100	Microssatélite	MicS
100 – 1.000	Satélite de pequeno/médio porte	SPMP
> 1.000	Satélite de grande porte	SGP

Fonte: Baseada em CGEE (2018, p. 9).

Os *CubeSats* são uma classe particular de nanossatélites que utiliza uma arquitetura de desenvolvimento aberta e relativamente padronizada para os subsistemas mais comuns (CGEE, 2018, p. 9). Eles são construídos a partir de um módulo básico, na forma de um cubo com aresta de 10 cm, sendo possível a combinação de dois ou mais desses módulos para a obtenção de satélites maiores. Neste trabalho os *CubeSats* serão referenciados como CubS.

Um exemplo de segmento espacial composto por vários satélites é a constelação Starlink (STARLINK, 2023) da empresa americana SpaceX. A missão do sistema espacial que engloba essa constelação é o fornecimento de serviço de internet de alta velocidade para usuários localizados em, praticamente, qualquer lugar da superfície terrestre, especialmente nos locais sem a cobertura dos sistemas de comunicação convencionais. A Starlink entrou em operação em novembro de 2019 com 60 satélites da versão 1.0, utilizando a banda Ku para a comunicação com os terminais dos usuários. Em julho de 2023 havia 4.519 satélites em órbita,

incluindo satélites da primeira geração, com massa de 260 kg, e da segunda geração, com tecnologia mais avançada e massa de 800 kg. A altitude da órbita dos satélites Starlink é 550 km, mas o projeto prevê sub-constelações em órbitas com altitude de 340 km e 1.200 km atingindo o número total de 12.000 satélites e o uso da banda Ka. Atualmente, a SpaceX pediu permissão às autoridades americanas para expandir a sua constelação em 30.000 satélites podendo atingir, se autorizada, o total de 42.000 satélites (NSSDCA, 2023; PULTAROVA; HOWELL, 2023). Utilizando-se as classificações dos satélites vistas acima, conclui-se que os satélites da constelação Starlink são do tipo SPMP e operam em órbitas LEO.

Na situação oposta à da constelação de satélites, tem-se o segmento espacial composto por um satélite isolado. Pode-se citar como exemplo o SGDC-1 – Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas 1 pertencente ao Governo Federal Brasileiro e operado pela empresa estatal Telebrás e pelo Ministério da Defesa (TELEBRÁS, 2023). A missão do sistema espacial que incorpora o SGDC-1 é o fornecimento de comunicações seguras para o governo e organizações militares brasileiras e de comunicações de banda larga para as regiões nacionais com pouco ou nenhum acesso a esse tipo de comunicação promovendo maior integração nacional. Na Figura 3 é apresentada uma vista do SGDC-1.

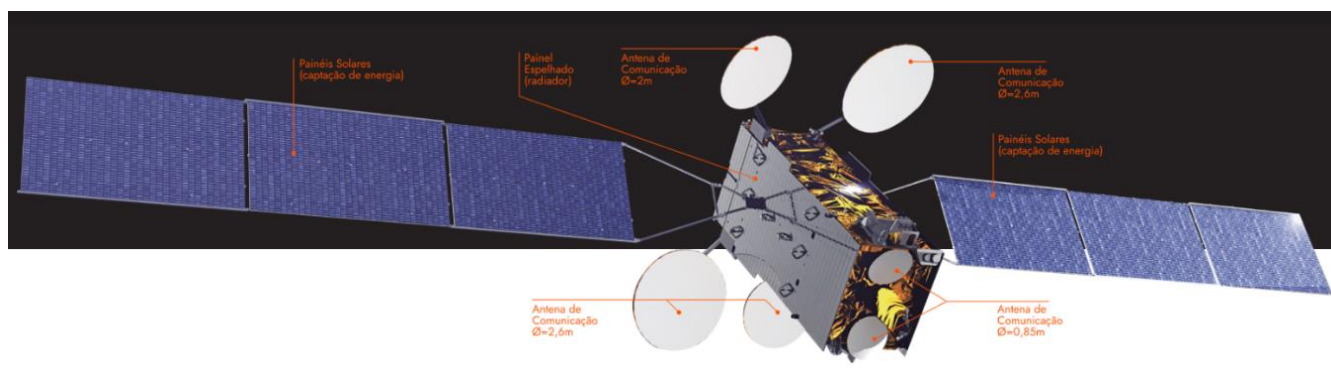


Figura 3 - Vista do SGDC-1.

Fonte: <https://visionaespacial.com/programa-sgdc/> .

O satélite foi construído pela empresa francesa Thales Alenia Space e lançado em maio de 2017, ocupando a posição 75° W na órbita geoestacionária. O SGDC-1 possui 50 transponders e 67 feixes na banda Ka, para comunicação em banda larga, e 5 transponders na banda X, para uso exclusivo nas comunicações militares. A envergadura do satélite é de 37 m e sua massa aproximadamente 5.800 kg (VISIONA, 2023). Baseado nessas informações, constata-se que o SGDC -1 é um satélite do tipo SGP operando em órbita GEO.

O artefato espacial Juno constitui o segmento espacial do sistema cuja missão é o levantamento de dados científicos sobre o planeta Júpiter, sua atmosfera e os seus satélites naturais (JPL, 2023). Juno entrou na sua órbita em torno de Júpiter em julho de 2016, aproximadamente 5 anos após o seu lançamento, e é um exemplo de satélite de um corpo celeste que não a Terra. O satélite entrou na fase estendida da sua missão, prevista para terminar em setembro de 2025. A Figura 4 é uma montagem artística de uma foto do Juno e uma foto de Júpiter feita pelo próprio satélite.



Figura 4 - Montagem com fotos do satélite Juno e do planeta Júpiter.

Fonte: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/juno>.

Com massa de 3.625 kg no início da missão e envelope de 20,0 m x 4,6 m, o satélite Juno é classificado como do tipo SGP.

A Operação Cruzeiro da Força Aérea Brasileira (FAB) (FAB, 2023) possui um exemplo de segmento espacial composto por um artefato espacial suborbital, como ilustrado na Figura 5.

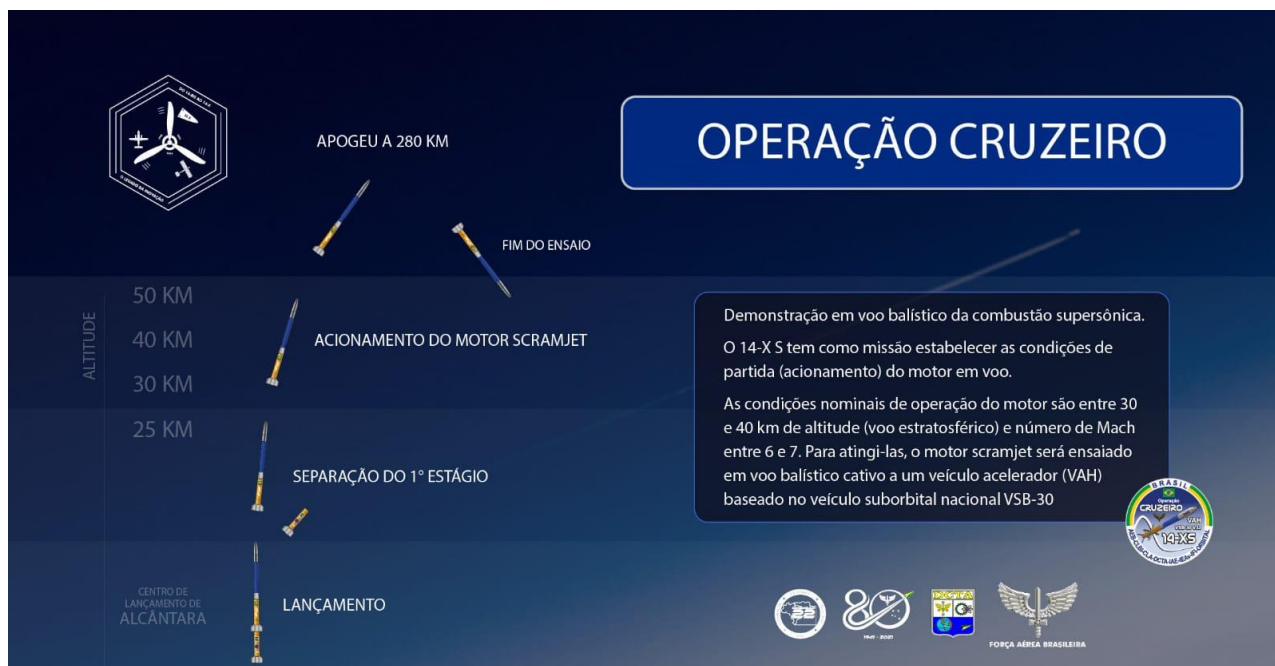


Figura 5 - Apresentação da Operação Cruzeiro da FAB.

Fonte: FAB (2023).

O objetivo da operação (demonstração de uma etapa do funcionamento do motor hipersônico em desenvolvimento) foi alcançado por meio da carga útil da missão, o demonstrador da tecnologia hipersônica 14-X S (parte azul do foguete da Figura 5). O funcionamento da carga útil e a transmissão dos dados do experimento para o solo requereram que ela fosse mantida acoplada ao segundo estágio do lançador que continha as baterias e outros equipamentos necessários (ver Seção 2.2).

A Operação Cruzeiro também é um exemplo de sistema espacial composto pelos segmentos espacial e lançamento (i.e., sem segmento solo) conforme a definição de sistemas espaciais da ECSS vista no presente documento.

2.2 Segmento lançamento

O segmento lançamento é a parte do sistema espacial que é usada para transportar o(s) elemento(s) do segmento espacial para o espaço e é composto, por sua vez, por um ou mais elementos.

O segmento lançamento é composto pelo lançador integrado e pelas instalações necessárias para a fabricação, teste e entrega dos elementos do lançador.

De acordo com esta definição de composição, percebe-se que o segmento lançamento de uma missão espacial envolve, além do veículo lançador propriamente dito, um conjunto amplo e diversificado de instalações podendo, formalmente, incluir instalações em diversas regiões

de um país ou em vários países. O segmento de lançamento da Operação Astrolábio (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA, 2023) é um exemplo de distribuição das instalações do segmento por dois países. O foguete lançador HANBIT-TLV da empresa INNOSPACE foi fabricado na Coreia do Sul e as operações de integração dos elementos do lançador e do lançador com a carga útil brasileira (SISNAV) foram realizadas no CLA – Centro de Lançamento de Alcântara, no Maranhão.

O VAH – Veículo Acelerador Hipersônico constitui um exemplo de veículo lançador suborbital e foi utilizado no lançamento da carga útil 14-X S da Operação Cruzeiro, vista na Seção 2.1. Na Figura 6, é apresentada uma versão antiga (2011) do VAH, mas que mostra claramente a integração do veículo lançador de dois estágios com a carga útil por meio de um módulo de acoplamento. Nesta figura, a carga útil é o Veículo Hipersônico 14-X, ainda em desenvolvimento, e não o demonstrador 14-X S.



Figura 6 - Veículo Acelerador Hipersônico (versão de 2011).

Fonte: Instituto de Estudos Avançados (IEAv).

Não foram encontradas referências bibliográficas com as dimensões do veículo VAH. Todavia, como esse veículo foi baseado no foguete de sondagem VSB-30 (FAB, 2023), pode-se estimar sua altura e diâmetro em aproximadamente 12,6 m e 0,6 m, respectivamente.

Na Figura 7, é mostrado um momento do lançamento, em 14/12/2021, da carga útil 14-X S (parte em azul do foguete) por meio do VAH (parte em laranja do foguete). O cone branco abriga os acessórios para a recuperação da carga útil (paraquedas e sinalizador). Durante o voo, a carga útil permaneceu acoplada ao segundo estágio do VAH de cuja bateria ela recebeu a energia necessária para o seu funcionamento. O segundo estágio também abrigou o sistema de telemetria e telecomando para monitoramento e controle do veículo e carga útil.



Figura 7 - Lançamento da carga útil 14-X S com o lançador VAH em 14/12/202.

Fonte: <https://agazetaneWS.com.br/noticia/nacional/173781/conheca-o-projeto-14-x-de-tecnologia-hipersonica-desenvolvido-pela-fab.>

O foguete indiano PSLV-C51, utilizado no lançamento do satélite brasileiro Amazonia 1 em 28/02/2021, é um exemplo de veículo lançador orbital. Na Figura 8, é mostrada uma foto desse veículo durante o lançamento do satélite.



Figura 8 - Lançamento do satélite Amazonia 1 com o lançador PSLV-C51 em 28/02/2021.

Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/PSLV-C51>.

O PSLV-C51 é um veículo com quatro estágios, altura aproximada de 38,9 m e diâmetro dos estágios variando entre 2,8 m e 1,34 m.

As dimensões dos dois veículos lançadores acima são bastante diferentes em função da altitude em que eles podem lançar uma carga útil (apogeu de 280 km vs órbita polar com altitude de 600 km) e da massa da carga útil que eles podem transportar (400 kg vs. 1.750 kg).

Os voos dos veículos lançadores das cargas úteis suborbitais, recuperáveis ou não, são planejados para que os elementos dos veículos e as cargas úteis retornem à superfície terrestre em regiões desabitadas (normalmente em regiões marítimas sem embarcações), de forma a evitar danos humanos e materiais. Como os voos reais podem ser diferentes dos planejados, há a necessidade de que os veículos lançadores sejam rastreados e, eventualmente, destruídos caso estejam em uma trajetória que possa causar danos humanos e/ou materiais. A decisão sobre a destruição é tomada enquanto a carga útil ainda está acoplada ao lançador ou a algum estágio dele. A mesma necessidade de rastreamento e eventual destruição também existe no caso de lançadores transportando cargas úteis orbitais terrestres ou destinadas ao espaço exterior.

Para atender a essa demanda de rastreamento, a infraestrutura de solo do segmento lançamento dessas missões inclui um radar com características (frequência, potência, agilidade etc.) adequadas. Um exemplo desse tipo de equipamento é o Radar de Trajetografia Banda C (OMNISYS, 2023).

O atendimento da eventual demanda de destruição do veículo lançador (e da sua carga útil) requer a instalação de equipamentos a bordo do veículo e no solo.

O equipamento embarcado é denominado de Sistema de Terminação de Voo (STV) e inclui um Receptor de Terminação de Voo (RTV), para receber o comando de terminação do solo, um dispositivo de armação segura e um detonador. A composição e operação do STV são regulamentadas nos Estados Unidos, e também em boa parte do mundo, incluindo-se o Brasil, pelo documento 319 do RCC – Range Commanders Council (RCC, 2014). O receptor opera na banda de frequências de UHF (400 – 450 MHz).

O equipamento de solo é uma estação de terminação de voo que inclui antena diretiva, transmissor de RF de alta potência e codificador dos comandos a serem enviados para o artefato espacial, também de acordo com a referência (RCC, 2014).

O lançamento de veículos lançadores requer condições meteorológicas adequadas. Assim, a infraestrutura de solo do segmento lançamento das missões espaciais também inclui uma estação meteorológica com o pessoal técnico, instrumentos e ferramentas de software apropriadas para avaliar as condições meteorológicas e subsidiar a decisão do prosseguimento ou suspensão do lançamento.

A comunicação entre o veículo lançador e o solo ocorre através das estações de telemetria (TM) que recebem as telemetrias do veículo e também da carga útil no caso das missões suborbitais. Essas estações podem possuir também a capacidade de rastreamento (tracking) do

veículo lançador e geração das informações para a determinação da sua real trajetória. Além disso, algumas missões podem requerer a capacidade de envio de telecomandos (TC) para o veículo lançador (incluindo-se, eventualmente, comandos para a sua destruição). Muitas missões não requerem essa capacidade de transmissão porque seus veículos, particularmente os lançadores de cargas suborbitais, executam comandos gravados e sequenciados no tempo por um sequenciador de eventos embarcado.

Dessa forma, as estações de comunicação do segmento lançamento podem ser classificadas em quatro categorias: TM – *Telemetry* (Telemetria), T&T – *Telemetry and Tracking* (Telemetria e Rastreamento), T&C – *Telemetry and Command* (Telemetria e Comando) e TT&C – *Telemetry, Tracking and Command* (Telemetria, Rastreamento e Telecomando).

Os dados do veículo lançador, do lançamento e das cargas úteis suborbitais devem ser gravados e enviados tempestivamente para a organização responsável pela missão, o que exige equipamentos de armazenamento de dados adequados e acesso à infraestrutura de comunicação.

A infraestrutura do segmento de lançamento delineada acima é normalmente instalada no centro ou sítio de lançamento (*launch site*) e não se confunde com a infraestrutura do segmento solo abordada na Seção 2.4 (ECSS, 2008, p. 11). Reitera-se que, como visto no início da seção, o segmento lançamento inclui instalações e infraestruturas além das englobadas pelo centro de lançamento.

As atribuições do segmento lançamento das missões suborbitais se encerram com o término da missão e eventual recuperação da carga útil.

No caso das missões orbitais terrestres as atribuições do segmento lançamento se encerram com a entrada do artefato espacial na sua órbita de transferência e subsequente separação do artefato e veículo lançador. Essa fase operacional da missão é chamada de LEOP – *Launch and Early Orbit Phase* e inclui as verificações do funcionamento do artefato e as manobras para colocá-lo em sua órbita final (ECSS, 2009a, p. 26).

As atribuições do segmento lançamento das missões com envio de artefatos para o espaço exterior (missões interplanetárias) também terminam com a entrada do artefato espacial na sua órbita (terrestre) de transferência, seguida da separação do artefato e veículo lançador. Após a separação, diferentemente das missões orbitais, as missões interplanetárias entram na fase operacional denominada *cruiser*. Nessa fase, são feitas as verificações do funcionamento do artefato espacial e é realizado o seu voo até o objeto celeste de destino (NASA, 2023b).

2.2.1 Centro de Lançamento da Barreira do Inferno

O Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) é uma organização da Força Aérea Brasileira localizada no município de Parnamirim, RN (FAB, 2023a).

Por ser uma organização militar, há poucas referências bibliográficas sobre o CLBI de acesso público, particularmente aquelas referências com informações técnicas sobre as capacidades do Centro, sua infraestrutura e organização. A entrevista informal de funcionários como fonte de informações não é viável no caso das organizações militares uma vez que há uma orientação implícita, e às vezes explícita, para o encaminhamento de consultas externas às organizações para os seus dirigentes por meio de ofícios. A abordagem oficial foi considerada inexecutável para o presente trabalho devido ao período de tempo necessário e à falta de controle da divulgação das informações que vierem a ser registradas no relatório a ser elaborado. Dessa forma, as informações de interesse apresentadas são aquelas disponíveis nas referências bibliográficas de acesso público encontradas.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE) a missão do CLBI é:

[O CLBI] tem por finalidade executar e prestar apoio às atividades de lançamento e rastreamento de engenhos aeroespaciais e de coleta e processamento de dados de suas cargas úteis, bem como executar os testes, experimentos, pesquisa básica ou aplicada e outras atividades de desenvolvimento tecnológico de interesse da Aeronáutica, relacionados com a Política da Aeronáutica para Pesquisa e Desenvolvimento e com a Política Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais (IBGE, 2023).

O CLBI foi fundado em outubro de 1965, tornando-se a primeira base de lançamento de foguetes da América do Sul. O primeiro lançamento ocorreu em dezembro de 1965 utilizando o foguete de sondagem norte americano Nike Apache. Ao longo dos anos foram realizados mais de 400 lançamentos com destaque para os foguetes dos projetos Exametnet e Ozônio, resultados de uma parceria entre o INPE a NASA. O primeiro projeto, voltado para o estudo da atmosfera nas altitudes de 30 km a 60 km, realizou 207 lançamentos no período 1966 – 1978. O segundo, para estudo da camada de ozônio, realizou 81 lançamentos no período 1978 – 1990 (WIKIPEDIA, 2023b).

A infraestrutura do CLBI foi fundamental para o desenvolvimento dos primeiros foguetes de sondagem brasileiros, desenvolvidos no programa SONDA. O primeiro foguete SONDA I foi lançado em dezembro de 1965 e o último em 1977, após uma série de 226 lançamentos. Seguiu-se o desenvolvimento dos foguetes SONDA II, III e IV sendo que o último lançamento da série SONDA IV ocorreu em março de 1989 (WIKIPEDIA, 2023c; GOUVEIA, 2003). O

adensamento urbano no entorno do CLBI contribuiu para que o lançamento dos foguetes de maior porte, em desenvolvimento após o encerramento da família SONDA, passasse a ser realizado do Centro de Lançamento de Alcântara, criado em 1983.

As atividades atuais do CLBI incluem (WIKIPEDIA, 2023b):

- a) Suporte ao rastreamento dos veículos satelizadores e de grande apogeu lançados do Centro de Lançamento de Alcântara;
- b) Suporte ao rastreamento do veículo lançador orbital Ariane decorrente de acordo com a *European Space Agency* (ESA);
- c) Continuação dos testes e experimentos de interesse da Força Aérea Brasileira;
- d) Disponibilização dos meios operacionais em benefício dos experimentos de interesse da Marinha e do Exército brasileiro;
- e) Venda de serviços de lançamento e rastreamento de foguetes suborbitais para organizações nacionais e estrangeiras, colocando os meios operacionais a disposição da comunidade científica internacional para a realização de operações espaciais.

As atividades do item (a) são apoiadas pelas ações de inclusão do CLBI como componente do CEA – Centro Espacial de Alcântara (FAB, 2023b) viabilizando a modernização e manutenção da infraestrutura do Centro. As ações de melhoria da infraestrutura também são viabilizadas pelo acordo com a ESA mencionado acima como apoio à realização das atividades do item (b).

Segundo Basseto (2023), em 2023 a FAB lançou 10 foguetes de treinamento do tipo SBAT-70 no CLBI (Operação Natal XLV), como parte de uma campanha de verificação da operacionalidade das equipes, equipamentos e infraestrutura do Centro após a realização de uma série de revitalizações e adequações dos seus meios. A Figura 9 é uma vista atual (2023) da sala de controle do CLBI.



Figura 9 - Vista atual (2023) da sala de controle do CLBI.

Fonte: <https://aeroin.net/forca-aerea-brasileira-lancou-10-foguetes-sbat-70-no-centro-de-lancamento-da-barreira-do-inferno/>.

2.2.2 Centro de Lançamento de Alcântara

O Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) é uma organização da Força Aérea Brasileira localizada no município de Alcântara, MA (FAB, 2023c).

Pelas mesmas razões expostas no início da seção anterior, as informações de interesse apresentadas nesta seção são baseadas apenas nas referências bibliográficas de acesso público encontradas.

A implantação do CLA visou atender a necessidade de um centro de lançamento adequado para veículos do porte do VLS-1 da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB) e maiores, e também de um centro com possibilidade de expansão.

O Grupo para Implantação do Centro de Lançamento de Alcântara (GICLA) foi criado em 1982 com a incumbência de gerenciar todas as atividades necessárias para a implementação desse centro.

A primeira operação do CLA, Operação Pioneira, ocorreu no período de 11 a 15 de dezembro de 1989 com o lançamento de 15 foguetes SBAT-70 e 2 SBAT-12.

O complexo de instalações do Centro contempla as atividades de integração, preparação e controle de satélites e de veículos, testes de pré-lançamento, e de lançamento e rastreamento.

No setor de comando e controle situam-se os conjuntos terminais de todos os sistemas de forma integrada e sincronizada. O prédio principal – Centro Técnico (CT) – com uma área aproximada de 10.000 m² distribuídos em três pavimentos é o “coração” de todo o conjunto de estações.

O prédio CT abriga o centro de controle das operações e de tratamento de dados, computadores com sistemas integrados que efetuam em tempo real a aquisição das coordenadas dos veículos lançados e do ponto provável de impacto.

No prédio principal também se situa a sala de segurança terrestre e de voo, cuja responsabilidade é o acompanhamento da trajetória balística e o comando de teledestruição na eventualidade de desvio da trajetória do veículo, garantindo a preservação de vidas e bens por meio do direcionamento do impacto para zonas previamente delimitadas e seguras.

As atividades de integração de sistemas contam com as estações de telemedidas e meteorológica, radares de proximidade (Radar Adour) e de precisão (Radar Atlas), Centro de Tratamento de Dados de Localização (CTDL).

O CLA possui um setor com as instalações para a preparação e lançamento de veículos espaciais, prédio de controle avançado (casamata), três tipos de plataformas de lançamento (para veículos do tipo sondagem, lançador de satélites de pequeno porte do tipo do VLS-1 e de uso universal para foguetes de até 10 toneladas).

Na Figura 10, é mostrado o centro de controle do CLA após a Operação Cruzeiro apresentada na Seção 2.1.



Figura 10 - Sala de controle do CLA após a Operação Cruzeiro.

Fonte: <https://forcaaerea.com.br/fab-realiza-primeiro-teste-de-voo-do-motor-aeronautico-hipersonico-14-x/>.

2.3 Segmento apoio

Conforme a ECSS (ECSS, 2012, p. 39), o segmento apoio é constituído pela infraestrutura e serviços genéricos utilizados no apoio ao desenvolvimento e à operação dos elementos do sistema espacial. Os itens podem ser parte de outros segmentos durante o seu desenvolvimento e posteriormente tornarem-se parte do segmento apoio quando utilizados.

2.4 Segmento solo

Como indicado na Figura 1, as funções do segmento solo (bem como as dos demais segmentos) são realizadas através de sistemas e subsistemas com funções específicas. Esses, por sua vez, são constituídos fisicamente pelos elementos e equipamentos (ou unidades) do segmento solo.

Os sistemas de solo de nível lógico mais elevado são, tipicamente, os seguintes (ECSS, 2008, p. 20):

- Sistema de operação da missão;
- Sistema de operação da carga útil;

- Sistema de estações terrenas;
- Sistema de comunicações terrestres.

Os sistemas acima podem ser distribuídos em vários centros e divididos em outros sistemas e subsistemas dependendo da arquitetura escolhida para o segmento solo de uma missão específica.

Na Figura 11 é representada graficamente a composição do segmento solo descrita acima.

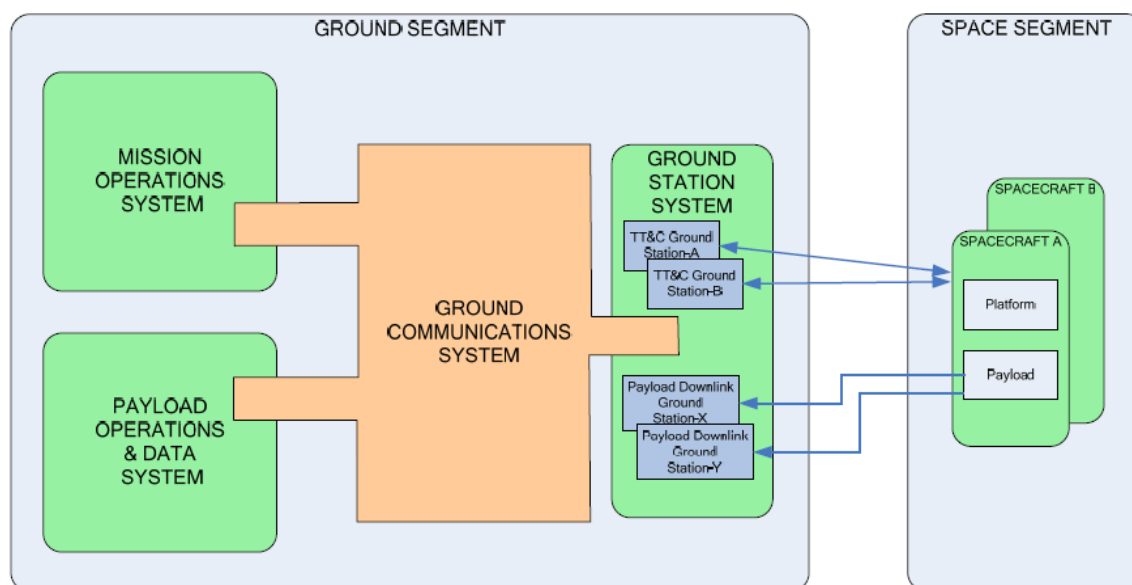


Figura 11 - Composição do segmento solo.

Fonte: ECSS (2008, p. 21).

Baseando-se, ainda, na ECSS (2008), são descritas a seguir as principais funções a serem executadas pelos sistemas componentes do segmento.

O sistema de operação da missão tem, tipicamente, as seguintes funções:

- Análise de missão;
- Preparação da operação;
- Simulações;
- Planejamento e programação da missão;
- Monitoramento e controle;
- Dinâmica do voo;
- Gerenciamento e manutenção do *software* embarcado nos artefatos espaciais;
- Arquivamento de dados;
- Entrega de dados do(s) produto(s);

- Gerenciamento de configuração (segmento espacial, segmento solo, informações da missão);
- Análise e relatório de desempenho;
- Serviços para os usuários;
- Manutenção do sistema.

As funções típicas do sistema de operação da carga útil são:

- Análise da operação da carga útil;
- Planejamento e programação da operação da carga útil;
- Preparação da operação da carga útil;
- Simulações;
- Planejamento e programação da operação da carga útil;
- Controle da operação da carga útil;
- Processamento dos dados da carga útil;
- Arquivamento dos dados da carga útil;
- Entrega de dados do(s) produto(s);
- Serviços para os usuários;
- Entrega dos dados dos produtos;
- Análise e relatório de desempenho;
- Desenvolvimento e ajuste verificação e validação de algoritmos;
- Manutenção do sistema.

O sistema de estações terrenas provê a ligação física (enlace de comunicação) entre os segmentos espacial e solo. De maneira geral, esse sistema exerce as seguintes funções:

- Recepção, armazenamento e distribuição das telemetrias;
- Transmissão dos telecomandos;
- Aquisição de dados de rastreamento, *ranging*, Doppler e meteorológicos;
- Monitoramento e controle da estação;
- Gerenciamento do tempo;
- Gerenciamento e programação da rede;
- Distribuição de dados;
- Manutenção do sistema.

As estações terrenas que integram esse sistema podem ser divididas em duas grandes categorias: estações de controle (T&C – *Telemetry and Command* ou TT&C – *Telemetry, Tracking & Command*) e estações de dados.

As estações de controle viabilizam o monitoramento e o controle dos artefatos espaciais por meio do envio de telecomandos (TC), recepção de telemetrias (TM) e determinação dos parâmetros para o seu rastreamento (posição relativa à estação e desvio Doppler).

As estações de dados utilizam o enlace de comunicação com o artefato espacial para a recepção de dados da sua carga útil.

As estações TT&C permitem a transmissão (TX) e a recepção (RX) de sinais e podem ser classificadas como estação do tipo TRX (i.e., transmissora e receptora). As estações de dados são normalmente do tipo RX e só permitem a recepção dos sinais provenientes da carga útil do artefato espacial. Cada missão específica define os tipos (TX, RX e TRX) requeridos para as duas categorias de estação. Note-se que na Figura 11 são identificadas as duas grandes categorias de estação e as suas capacidades de recepção e transmissão por meio de setas unidirecionais e bidirecionais nas conexões com o segmento espacial.

O sistema de comunicações terrestres é responsável pela interligação dos sistemas componentes do segmento solo por meio da infraestrutura de comunicações terrestres.

Normalmente as funções desse sistema são:

- distribuição de dados;
- comunicação de voz e vídeo;
- manutenção do sistema.

2.4.1 Redes de estações terrenas

Nos enlaces de comunicação esquematizados na Figura 11, os sinais dos artefatos espaciais são transmitidos diretamente para as estações terrenas e os sinais destas são transmitidos diretamente para o artefato espacial. Por esse motivo, esse tipo de enlace é denominado DTE (Direct-to-Earth).

Como a comunicação entre o segmento espacial e as estações terrenas utiliza, normalmente, sinais com frequências muito altas, os enlaces DTE requerem que o artefato espacial esteja na linha de visada da estação terrena. Essa visada só ocorre em intervalos de tempo determinados os quais dependem da trajetória do artefato espacial e da localização geográfica

da estação terrena. A única exceção são os satélites GEO que permanecem todo o tempo na linha de visada de uma estação terrena localizada de forma apropriada.

Quando a intermitência na comunicação entre o segmento espacial e o segmento solo não é aceitável ou deve ser minimizada, uma solução possível é o aumento da quantidade de estações terrenas distribuídas geograficamente de forma adequada considerando-se as trajetórias dos artefatos espaciais. Esse conjunto de estações é comumente denominado de rede de estações terrenas. Deve-se enfatizar que os termos “sistema de estações terrenas” e “rede de estações terrenas” não se confundem. O primeiro termo está relacionado com a visão funcional do segmento solo e o segundo termo com a visão física do segmento. Essas duas visões, como mencionado anteriormente, estão indicadas na Figura 1.

As redes de estações terrenas são novamente abordadas na Seção 3.

2.4.2 Satélites retransmissores

Outra solução para o problema da intermitência na comunicação entre o segmento espacial e o segmento solo devido à falta de visada entre o artefato espacial e a estação terrena é o emprego de satélites retransmissores ou repetidores (relay satellites). Esta técnica é ilustrada conceitualmente na Figura 12.

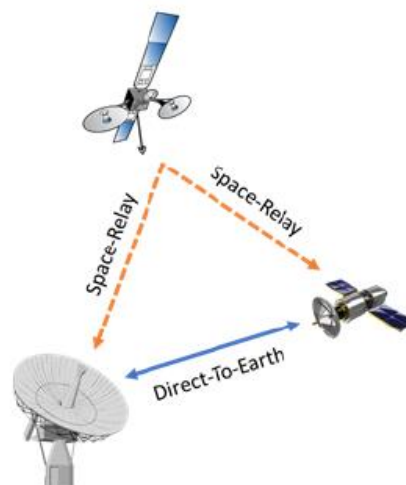


Figura 12 - Ilustração do conceito de satélite retransmissor.

Fonte: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/soa2020_final8_0.pdf (p.221).

Na Figura 12, o artefato espacial não está na linha de visada da estação terrena, mas está na linha de visada do satélite retransmissor e este, por sua vez, está na linha de visada da estação terrena. Dessa forma, o artefato espacial pode enviar o seu sinal para o satélite retransmissor que o retransmite para a estação terrena.

A quantidade e a distribuição dos satélites retransmissores dependem do grau de intermitência na comunicação aceitável e da trajetória dos artefatos espaciais. Normalmente, essa solução requer uma constelação de satélites retransmissores, com ou sem enlaces intersatélites, e uma ou mais estações terrenas.

O eventual emprego de satélites retransmissores em uma missão espacial específica deve fazer parte do planejamento inicial da missão porque tem impacto em todos os seus segmentos e em todas as suas fases.

Apesar de funcionalmente os satélites retransmissores estarem relacionados ao segmento solo, para coerência da terminologia eles são listados, quando utilizados em missões específicas, como componentes do segmento espacial dessas missões.

Um exemplo de rede de satélites retransmissores é a rede TDRS – *Tracking and Data Relay Satellites* da NASA (NASA, 2023a). Essa rede é composta atualmente por dez satélites em órbita geostacionária cobrindo as regiões dos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico, como ilustrado na Figura 13.

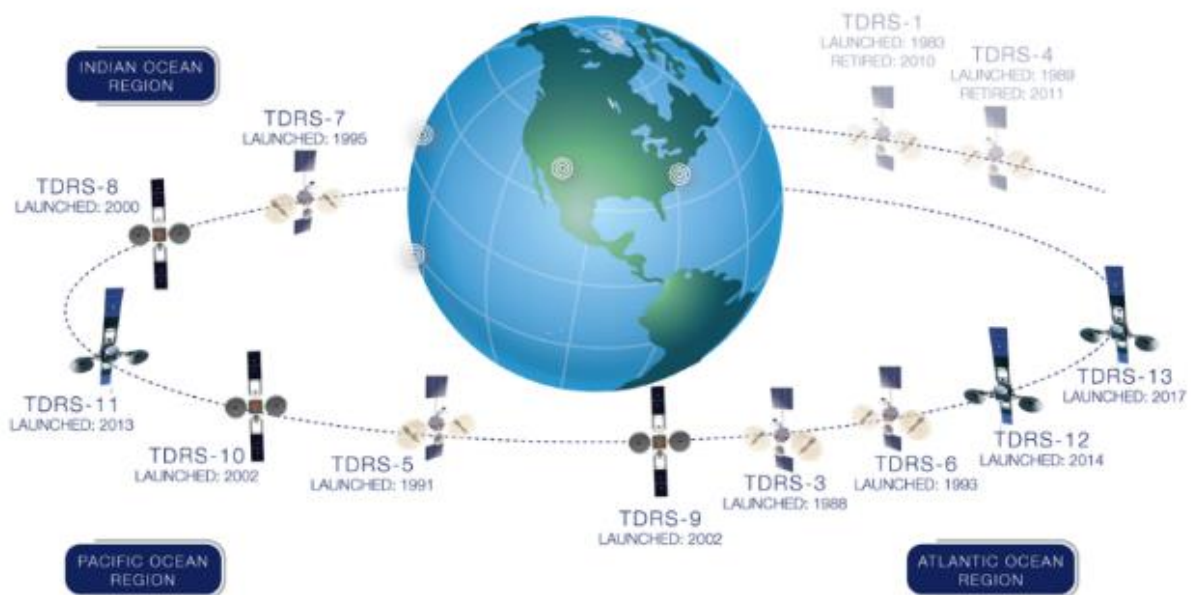


Figura 13 - Ilustração da rede de satélites retransmissores TDRS da NASA.

Fonte: <https://www.nasa.gov/missions/tdrs/tracking-and-data-relay-satellite-tdrs-fleet-characteristics/>.

Os satélites da TDRS são do tipo SGP (massa ~2.100 kg a ~3.800 kg), pertencentes a três gerações tecnológicas, têm tempo de vida de ~10 anos e utilizam as bandas de frequências S, Ku e Ka para proverem comunicação entre os artefatos espaciais de várias missões da NASA e as estações terrenas localizadas nos Estados Unidos (White Sands), Europa (Madri) e na ilha de Guam. A TDRS não possui enlaces intersatélites.

2.4.3 Exemplo de arquitetura simplificada do segmento solo (e usuários)

Todo o exposto sobre o segmento solo até esse ponto descreve somente as suas partes funcional (sistemas, subsistemas etc.) e física (elementos, equipamentos, unidades etc.), não tendo sido abordada a questão dos recursos humanos necessários.

A norma *Space engineering – Ground systems and operations* (ECSS, 2008, p. 19) estabelece que as “organizações de operação” (*operations organizations*) compreendem os recursos humanos que assumem as tarefas de preparação e operação da missão.

Alguns exemplos dos recursos humanos participantes das organizações são: gerentes de operação, operadores de artefatos espaciais (astronautas, engenheiros de operação, analistas de artefatos espaciais, controladores de artefatos espaciais), operadores de carga útil, planejadores de missão, engenheiros de dinâmica de voo, operadores dos sistemas de solo, pessoal de exploração da missão (especialistas científicos, elementos de ligação com a comunidade de usuários finais, pessoal de apoio à geração dos produtos da missão etc.), engenheiros de manutenção dos sistemas de solo.

A ECSS também estabelece a “entidade” como a combinação de uma organização de operação e os sistemas de solo associados (ECSS, 2008, p. 19). Um exemplo de entidade é uma estação terrena e suas equipes de operação e de manutenção. Os centros de operação também são exemplos de entidade e alguns deles são descritos na arquitetura simplificada do segmento solo apresentada abaixo.

As referências (DAVIES, 1992), (NEGRON, 1992), (WHITWORTH, 1992) e (NASA, 2023) também apresentam uma discussão das atribuições, características fundamentais e estruturação do segmento solo das missões espaciais.

Observando as normas ECSS e com base nas referências acima, especialmente na NASA (2023, p. 268), foi elaborado o exemplo de arquitetura simplificada do segmento solo (e do segmento usuários) das missões espaciais apresentado na Figura 14. Essa arquitetura pode ser vista como um detalhamento da estrutura bastante genérica do segmento solo constante na Figura 1, mas ao mesmo tempo é suficientemente genérica para ser aplicável ao segmento solo de diversas missões espaciais menos complexas. A arquitetura apresentada é aplicável principalmente à fase dessas missões em que os artefatos do segmento espacial estão em órbita terrestre ou em voo no espaço exterior.

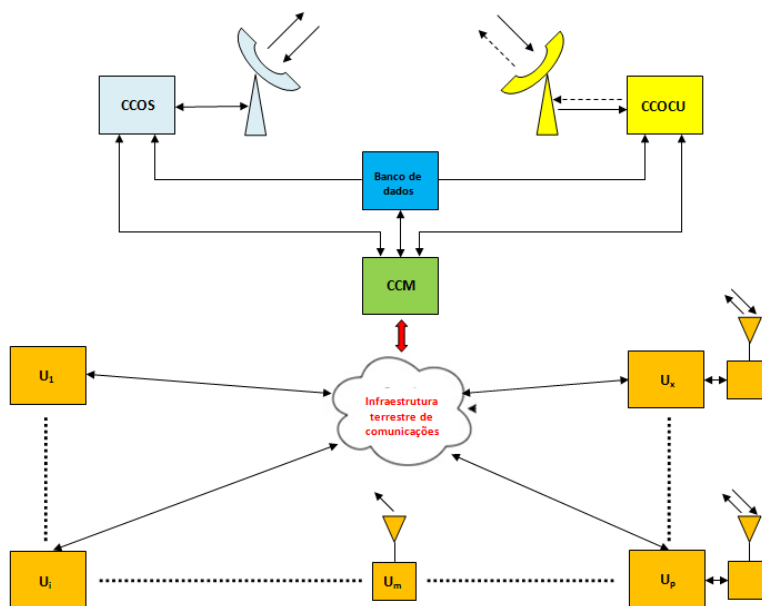


Figura 14 - Exemplo de arquitetura simplificada do segmento solo.

Fonte: CGEE (2023).

O componente central da arquitetura da Figura 14 é o Centro de Controle de Missão (CCM) que é o centro de operação responsável geral pela missão espacial (segmento espacial e segmento solo), desde o lançamento dos artefatos espaciais do segmento espacial até o encerramento da missão. Ele é composto por dois outros grandes componentes que neste trabalho foram denominados de Centro de Operações da Missão (COM) e Centro de Operações Científicas (COC). O COC envolve o pessoal, equipamentos e ferramentas necessários para todas as tarefas relativas à carga útil como, por exemplo, análise de desempenho, configuração, dados & telemetrias & comandos (gerenciamento, aprovação, qualidade e armazenamento), comunicação com os usuários, suporte a eles e atendimento das suas demandas. Se a carga útil não for científica e for, por exemplo, de comunicações, o COC poderia ser denominado de Centro de Operações de Comunicações. O COM compreende o pessoal, equipamentos e ferramentas necessários para todas as demais tarefas do CCM como, por exemplo, supervisão da missão, coordenação do controle da plataforma dos artefatos espaciais, telemetrias & comandos da plataforma e da carga útil (gerenciamento, aprovação, qualidade e armazenamento) e controle das comunicações com o artefato espacial. O CCM utiliza a infraestrutura terrestre de comunicações para a sua comunicação com o segmento usuários da missão. Logo, nessa arquitetura, o CCM realiza as funções do sistema de operação da missão e do sistema de operação da carga útil vistos no início da Seção 2.4.

A instalação física do CCM requer espaço físico e conveniências (energia elétrica, ar condicionado, instalações sanitárias etc.) adequados para abrigar o pessoal da operação do centro, mobiliário e equipamentos.

Os equipamentos consistem, essencialmente, em computadores, monitores, interfaces de comunicação e softwares aplicativos para a execução de algumas das tarefas dos quatro sistemas do segmento solo delineadas no início da Seção 2.4. A NASA (2023) discute brevemente alguns dos aplicativos necessários nos centros de missão.

O Centro de Controle de Operações da Plataforma (CCOP) engloba o pessoal, equipamentos, incluindo a estação terrena de controle (TT&C), e ferramentas necessários para o rastreamento do artefato espacial, monitoramento e controle da atitude da sua plataforma e, geralmente, monitoramento e controle da carga útil. A atuação sobre a carga útil pelo CCOP não exclui a possibilidade de que o monitoramento de algumas das suas telemetrias e o envio de alguns de seus comandos sejam atribuições do CCOCU, descrito a seguir. Dentre as tarefas do CCOP estão a coordenação com o COM/CCM da comunicação com o artefato espacial, determinação da sua trajetória e previsão da sua visibilidade pela estação terrena, envio dos comandos para o artefato espacial e monitoramento das suas telemetrias. Funcionalmente, o CCOP atua como um subsistema do sistema de operação da missão e do sistema de estações terrenas vistos no início da Seção 2.4.

De forma análoga ao CCM, a instalação do CCOP requer espaço físico e conveniências adequados para abrigar o pessoal da operação do centro, mobiliário e equipamentos.

Dentre os equipamentos necessários destaca-se a estação terrena de controle (TT&C). Os demais equipamentos consistem, essencialmente, em computadores, monitores, interfaces de comunicação e softwares aplicativos para a execução de algumas das tarefas do sistema de operação da missão e do sistema de estações terrenas exemplificadas no início da Seção 2.4. Em NASA (2023) são comentados brevemente alguns aplicativos necessários nos centros de controle de operação das plataformas dos artefatos espaciais.

A arquitetura do segmento solo da Figura 14 também inclui o Centro de Controle de Operação da Carga Útil (CCOCU) que possui o pessoal, equipamentos, incluindo a estação terrena de dados, e ferramentas necessários para o monitoramento do estado e desempenho da carga útil e controle da sua configuração. Note-se que o desempenho e configuração da carga útil dependem, normalmente, do estado e desempenho da plataforma do artefato espacial. As condições de outros subsistemas da plataforma como, por exemplo, energia, controle térmico e controle de atitude afetam as condições de operação e configuração da carga útil. Dessa

forma, deve haver uma coordenação das informações gerais do artefato espacial entre as equipes do CCOCU e CCOP. Dentre as tarefas do CCOCU estão a coordenação com o COC/CCM do estado e configuração da carga útil e da eventual comunicação com ela (no caso de estação terrena de dados do tipo TRX). Analogamente ao CCOP, o CCOCU atua funcionalmente como um subsistema do sistema de operação da carga útil e do sistema de estações terrenas vistos no início da Seção 2.4

Como nos demais centros da Figura 14, a instalação do CCOCU requer espaço físico e conveniências adequados para abrigar o pessoal da operação do centro, mobiliário e equipamentos.

Dentre os equipamentos necessários destaca-se a estação terrena de dados. Os demais equipamentos consistem, essencialmente, em computadores, monitores, interfaces de comunicação e softwares aplicativos para a execução das tarefas do sistema de operação da carga útil e do sistema de estações terrenas exemplificadas no início da Seção 2.4. A NASA (2023) comenta brevemente alguns aplicativos necessários nos centros de controle de operação da carga útil.

A função do banco de dados é armazenar os dados, telemetrias e comandos da missão ao longo de seu tempo de vida e distribuir as informações armazenadas para os integrantes do segmento solo, conforme necessário. A entrada de informações no banco é feita pelo CCM, que também controla o acesso dos demais integrantes do segmento solo ao banco para a recuperação de informações.

O banco de dados pode utilizar equipamentos localizados na proximidade do CCM, localizados remotamente, armazenamento em nuvem ou uma combinação dessas formas de armazenamento.

Na Figura 14, assumiu-se que o CCOP e o CCOCU estão fisicamente próximos do CCM de forma que a troca de informações entre eles se dá por meio de trechos curtos (dezenas de metros a poucos quilômetros) de cabos ópticos ou metálicos. Quando o arranjo geográfico envolver distâncias maiores, a comunicação entre os centros ocorrerá por meio da infraestrutura terrestre de comunicações.

Note-se que a arquitetura do segmento solo da Figura 14 é compatível com os seguintes arranjos alternativos:

- instalação remota do CCOP ou da estação terrena de controle (parte do CCOP);
- instalação remota do CCOCU ou da estação terrena de dados (parte do CCOCU);

- contratação das funções da estação terrena de controle como serviço de terceiros remotos;
- contratação das funções da estação terrena de dados como serviço de terceiros remotos;
- integração de outros CCOP (remotos) ao CCM;
- inclusão de outras estações terrenas de dados (remotas) ao CCOCU.

Em função das características e complexidade da missão e da complexidade e custo aceitáveis para o segmento solo, os diversos centros podem operar de forma assistida ou automática.

A infraestrutura terrestre de comunicações é necessária para a integração dos componentes do segmento solo e realiza as funções do sistema de comunicações terrestres visto no início da Seção 2.4, mas não faz parte física dele.

Essa infraestrutura tem como característica a sua utilização por grande quantidade e variedade de tipos de usuários, isto é, não é de uso exclusivo dos usuários das missões espaciais. A infraestrutura terrestre emprega, normalmente, diversas tecnologias como, por exemplo, cabos metálicos e ópticos, satélites de comunicações, enlaces de micro-ondas, redes celulares e internet. Pode ser pública ou privada ou, mais comumente, uma combinação de ambos os tipos.

O CCM deve contratar os serviços de infraestrutura terrestre de comunicações necessários para a missão espacial de um ou mais fornecedores.

Dependendo da missão específica, os seus usuários podem estar distribuídos em uma determinada região geográfica ou no território nacional, ou ainda distribuídos globalmente. Como ilustrado na Figura 14, a utilização do sistema espacial pelos usuários pode ocorrer através da sua comunicação direta com a carga útil, ou comunicação com o CCM por meio da infraestrutura terrestre de comunicações, ou ainda através de uma combinação dessas formas.

Certamente, os equipamentos a serem utilizados no segmento usuários do sistema espacial são muito dependentes da missão específica. Em algumas missões de comunicações, por exemplo, os usuários acessam somente a carga útil por meio de suas estações ou terminais de dados e não acessam o CCM. Em muitas missões de sensoriamento remoto, por outro lado, é comum os usuários receberem os dados de interesse do Centro de Controle da Missão, através da infraestrutura terrestre de comunicações, e não acessarem a carga útil diretamente.

Também há missões em que os usuários acessam os serviços do sistema espacial de forma combinada como, por exemplo, no serviço SBD – *Short Burst Data* da constelação Iridium. No SBD, os usuários possuem terminais remotos de dados que se comunicam bidirecionalmente com as cargas úteis e acessam o gateway da constelação, via correio eletrônico, para receber as informações dos terminais remotos e enviar informações para eles.

2.4.4 Segmento solo do programa CBERS

Como proposto na Figura 14, o segmento solo das missões espaciais menos complexas possui três centros operacionais importantes que são o CCM, CCOP e CCOCU.

O COCRC – Centro de Rastreamento e Controle de Satélites do INPE (INPE, 2023a) executa as funções do CCOP da Figura 14 para o programa CBERS e para outras missões espaciais. Ele não executa as funções do CCM e do CCOCU (exceto pela recepção de dados de carga útil de alguns satélites como comentado abaixo).

O Centro do INPE, sediado em São José dos Campos, SP, possui duas estações terrenas de controle (TT&C) localizadas em Alcântara, MA, e Cuiabá, MT. Na sede em São José dos Campos também fica localizado outro componente do COCRC, o CCS – Centro de Controle de Satélites. O CCS abriga a maior parte do pessoal do COCRC e os equipamentos e ferramentas de software para executar as funções previstas para o CCOP da Figura 14.

As estações terrenas de controle de Cuiabá e Alcântara também exercem a função de estação terrena de dados para a carga útil de coleta de dados em banda S dos satélites SCD-1, SCD-2 e dos satélites do programa CBERS. Todavia, o processamento dos dados de carga útil e as demais funções do CCOCU da Figura 14 não são executados pelo COCRC.

Na Figura 15, são apresentadas algumas imagens ilustrativas das instalações do Centro de Rastreamento e Controle de Satélites do INPE.

A Estação Terrena de Cuiabá possui nove antenas, denominadas CB01 a CB09, com capacidade de operação nas bandas VHF, UHF, L, S e X. Algumas dessas antenas operam em uma única banda e outras em duas bandas. As demais características dessas antenas, como faixa de frequências específica, G/T, polarização etc., são também distintas.

Para operação como estação terrena de dados do programa CBERS, cujos satélites transmitem na banda X, a Estação de Cuiabá utiliza as antenas CB01 e CB03. Essas antenas possuem, respectivamente, diâmetros de 10 m e 11,28 m, e ganhos de 55,5 dBi e 57,5 dBi.

O Centro de Controle de Missão do CBERS, como responsável final pela missão (CCM/COM da Figura 14), está localizado no INPE de São José dos Campos, SP. O Centro de Missão, responsável pelas imagens e programação das câmeras e outros aspectos da carga útil (CCM/COC da Figura 14) está localizado no INPE de Cachoeira Paulista, SP. O centro CCOP está dividido entre Cuiabá e Alcântara e o CCOCU está localizado em Cuiabá (CBERS, 2023).

Na descrição acima não se considerou a infraestrutura chinesa para a participação no controle e recepção de dados dos satélites CBERS. Ressalte-se que o controle dos satélites não ocorre concomitantemente pelos lados brasileiro e chinês, mas em períodos distintos e não superpostos.



(a) CCS – Centro de Controle de Satélites – São José dos Campos, SP.



(b) Antena da estação terrena de Cuiabá, MT.



(c) Estação terrena de Alcântara, MA.

Figura 15 - Centro de Rastreamento e Controle de Satélites (COCRC) do INPE.

Fonte: <http://www.inpe.br/crc/>.

2.4.5 Segmento solo do Amazonia 1

Na Figura 16, são ilustrados os principais elementos do segmento solo da missão Amazonia 1 (INPE, 2023c).

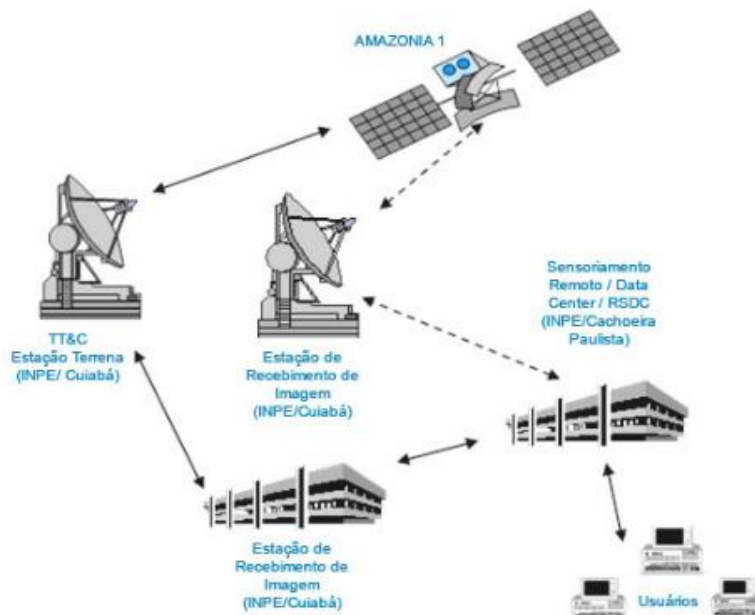


Figura 16 - Segmento solo da missão Amazonia 1.

Fonte: <http://www.inpe.br/amazonia1/amazonia.php>.

Como estação terrena de controle, a Estação Terrena de Cuiabá (ETC) utiliza as antenas CB02, CB04 e CB09 em banda S. Como estação terrena de dados, a ETC utiliza as antenas CB01 e CB09 para a recepção dos dados em banda X. Ver a Seção 2.4.4 para a descrição das antenas.

Baseando-se na Seção 2.4.3 e inspecionando-se a Figura 16, conclui-se que os centros operacionais da estrutura simplificada do segmento solo da Figura 14 estão alocados da seguinte forma: Cachoeira Paulista: CCM/COG; Cuiabá: CCOCU e CCOP. A Figura 16 e a referência (INPE, 2023c) não contêm informações suficientes para esclarecer a atuação do CCM/COM da Figura 14 nem a atuação do Centro de Controle de Satélite da estrutura do próprio INPE para o seu COCRC.

2.4.6 Segmento solo do programa SGDC

O segmento solo do SGDC-1 é composto por dois centros de controle, denominados Centros de Operações Espaciais (COPE) Principal (-P) e Secundário (-S), três Estações de Acesso (EA) (*gateway*) e doze Estações de Monitoramento e Controle (EMC). Os COPEs também atuam como estações de acesso.

O COPE-P e o COPE-S são localizados, respectivamente, em Brasília e Rio de Janeiro. As EAs são localizadas nas cidades de Campo Grande, MS, Florianópolis, SC e Salvador, BA.

As estações de monitoramento e controle são responsáveis pelo monitoramento dos parâmetros do satélite para que eles sejam integrados com as informações do COPE-P e COPE-S para prover o controle e a telemetria de todo o sistema.

As EMCs serão instaladas nos seguintes estados e cidades: Rondônia, Acre, Piauí, Roraima, Campo Grande, Santa Catarina, Paraíba, Brasília, São Paulo, Bahia, Espírito Santo e Rio de Janeiro.

Como as comunicações militares são estruturadas de forma diferente das comunicações civis/comerciais não foi feito o paralelo do segmento solo do SGDC-1 com a estrutura simplificada do segmento solo da Figura 14.

Na Figura 17, a seguir, é mostrada uma vista do COPE-S no Rio de Janeiro.



Figura 17 - Centro de Operações Espaciais Secundário – Rio de Janeiro.

Fonte: <https://www.telebras.com.br/telebras-sat/conheca-o-cope/>.

2.5 Segmento usuários

As missões espaciais suborbitais têm, normalmente, poucos usuários porque o volume e a diversidade dos equipamentos que compõem a carga útil dos seus artefatos espaciais são pequenos. Como visto na Seção 2.2, a estação de comunicações do centro de lançamento recebe e grava as telemetrias da carga útil juntamente com as telemetrias do veículo lançador. Após o término do voo, as telemetrias gravadas são processadas e são disponibilizadas para os usuários tanto as informações sobre a carga útil como as informações relevantes sobre o

voo. Em uma missão de microgravidade, por exemplo, as informações do voo sobre o período de tempo em que o experimento embarcado ficou em ambiente de microgravidade são fundamentais. A distribuição das informações para os usuários é feita por meio da rede terrestre de comunicações à qual o centro de lançamento está conectado.

Os usuários das missões orbitais e das missões com artefatos para o espaço exterior foram tratados na Seção 2.4.3. Resumidamente, dependendo da missão específica, os usuários podem acessar as informações da carga útil por meio da rede terrestre de comunicações, diretamente, por meio de terminais de comunicação adequados, ou por meio de uma combinação das formas anteriores.

2.6 Implementação dos sistemas espaciais

Os sistemas espaciais são complexos e têm alto custo de implementação e operação.

No início da era espacial os patrocinadores (*sponsors*) dos programas de implementação desses sistemas eram governos nacionais devido ao volume de recursos necessários, razões de estratégia geopolítica e políticas de incentivo ao desenvolvimento científico e econômico.

Nessas primeiras décadas os patrocinadores (com os recursos humanos e materiais à sua disposição) assumiam toda a implementação dos quatro segmentos dos sistemas, e tornavam-se proprietários da infraestrutura criada.

Atualmente há formas alternativas de implementação dos sistemas espaciais como se descreve sumariamente a seguir.

O segmento espacial é o ponto central da missão a ser executada pelo sistema a ser construído. Com o passar dos anos muitas missões (sensoriamento, coleta de dados, comunicações etc.) foram se padronizando em alguns aspectos, de forma que é possível comprar no mercado internacional o serviço de desenvolvimento e produção dos artefatos espaciais de interesse. O ponto de partida pode ser requisitos de missão, requisitos de sistema etc., dependendo apenas da capacidade e interesse do patrocinador de fornecer as soluções das etapas anteriores à compra das demais. Essa abordagem pode resolver desde o problema de falta de capacidade técnica/experiência do patrocinador até problemas de custo, risco, prazo, acesso a tecnologias etc.

O segmento lançamento envolve operações muito especializadas e infraestrutura de alto custo, com longo prazo para operacionalização, mas reutilizável, em boa parte, em muitas

missões. Assim, naturalmente, esse segmento se tornou um item que é adquirido dos fornecedores especializados para utilização no sistema que se deseja implementar.

As características de alto custo e longo prazo de operacionalização do segmento solo são similares às do segmento lançamento. O segmento solo também é multimissão, o que pode ser um fator de redução do seu custo de operação e manutenção. As formas mais radicais de redução de custo desse segmento passam pela contratação de serviços de fornecedores especializados na forma de “estação terrena como um serviço” (*ground station as a service*) ou mesmo “segmento solo como um serviço” (*ground segment as a service*). Pode-se dizer que o segmento solo, seguindo o acontecido com o segmento lançamento, tem oferecido ao mercado diversos serviços e diversos modelos de oferta desses serviços.

Em resumo, na implementação dos sistemas espaciais, pode-se utilizar recursos humanos e ativos próprios, aluguel de ativos, compra de serviços de terceiros, ou uma combinação dessas possibilidades, em vários graus.

3. ESTAÇÕES TERRENAS

Neste trabalho, para facilitar o entendimento das necessidades de comunicação entre o solo, o veículo lançador e o artefato espacial, as missões espaciais são subdivididas em três tipos: suborbitais, orbitais (terrestres) e interplanetárias.

3.1 Necessidade de comunicação das missões espaciais

Como visto na Seção 2.2, as missões suborbitais têm curta duração e a comunicação do solo com a carga útil e seu veículo lançador, desde o instante anterior ao lançamento até o término do voo da carga útil, ocorre por meio de uma estação de rádio localizada no sítio de lançamento e denominada de estação de telemetria.

A proximidade entre a estação de telemetria e a rampa de lançamento é fundamental para a comunicação em linha de visada com o veículo lançador (e carga útil) desde a altitude zero (veículo na rampa) até o apogeu. No voo descendente, a linha de visada entre a estação e a carga útil é perdida abaixo de certa altitude interrompendo a comunicação.

Nas missões orbitais, como visto na Seção 2.2, a função do veículo lançador é colocar a carga útil na órbita de transferência adequada. Apesar da altitude dessa órbita, a comunicação do veículo com a estação de telemetria do centro de lançamento será perdida quando a linha do círculo de visibilidade da estação for ultrapassada. Note-se que, normalmente, o raio do círculo de visibilidade é menor que o raio do círculo do horizonte verdadeiro da estação devido à existência de obstáculos, naturais ou não, na linha de visada entre a estação e o veículo em voo. De qualquer forma, a comunicação será interrompida a partir de algum momento e o centro de lançamento precisará utilizar outras estações de telemetria, com localização geográfica apropriada para a trajetória do veículo, para manter a comunicação. Na realidade, o centro de lançamento estabelece por meio de acordos internacionais uma rede de estações de telemetria ao redor da Terra para apoio aos seus lançamentos na fase LEOP (*Launch and Early Orbit Phase*). Um exemplo desse tipo de acordo é a atividade exercida pelo Centro de Lançamento da Barreira do Inferno na fase LEOP dos lançamentos do veículo Ariane como visto na Seção 2.2.1. A necessidade de comunicação do centro de lançamento com o veículo lançador se encerra com a separação do veículo e a sua carga útil.

A partir da separação, a responsabilidade da comunicação com a carga útil do lançador (isto é, com o segmento espacial da missão) é do sistema de estações terrenas do segmento solo, como visto na Seção 2.4. As características das estações do segmento solo permitem que

elas se comuniquem com o artefato espacial a partir do momento em que ele entre na sua órbita de transferência, mesmo que ainda acoplado à parte do veículo lançador. Assim, as comunicações na *subfase Early Orbit* podem ser realizadas tanto pelas estações de telemetria do centro de lançamento como pelas estações terrenas do segmento solo. Todavia, como afirmado acima, a responsabilidade das estações de telemetria pela comunicação se encerra com a separação do último elemento do veículo lançador. O sistema de estações terrenas também é utilizado para as comunicações com o segmento espacial quando o artefato já está na sua órbita final e tem início a fase operacional da missão espacial.

A demanda de comunicação com o solo das missões interplanetárias é bastante similar à das missões orbitais. Assim, na fase LEOP são utilizadas as estações de telemetria do centro de lançamento e da sua rede de apoio e é feita a transição de responsabilidade pela comunicação para o sistema de estações terrenas. Na fase de “cruzeiro” e demais fases da missão espacial (NASA, 2023b), a demanda de comunicação é atendida pelo sistema de estações terrenas do segmento solo. A diferença entre as necessidades de comunicação das missões orbitais e interplanetárias reside nas características elétricas e mecânicas das estações terrenas. As grandes distâncias dos artefatos espaciais das missões interplanetárias têm impacto na potência dos sinais recebidos na Terra e na potência dos sinais enviados para o espaço, na precisão de apontamento das antenas entre outros requisitos das estações.

Sumarizando a discussão acima, pode-se concluir que a demanda de comunicação entre o solo, veículo lançador e artefatos espaciais ao longo de toda a duração das missões espaciais é atendida por duas categorias de estações de rádio: as estações de telemetria, pertencentes ao segmento lançamento e vistas na Seção 2.2, e as estações terrenas, pertencentes ao segmento solo e abordadas na Seção 2.4.

Nas próximas seções, as características das estações terrenas são abordadas de forma mais extensa.

3.2 Serviços do segmento solo das missões espaciais

A NASA propõe que os serviços executados pelo segmento solo de uma missão espacial podem ser enquadrados em quatro categorias principais (NASA, 2023, p. 271):

- a) integração da missão: inclui o desenvolvimento dos acordos de serviço, interfaces, documentação, suporte às revisões, etc.;
- b) planejamento e cronograma da missão: inclui a realização das análises de enlace e carregamento, suporte às solicitações de serviço, geração e implementação dos cronogramas operacionais;

- c) transferência de dados do usuário da missão: inclui principalmente o envio de comandos para o artefato espacial e a recepção das telemetrias enviadas por ele;
- d) posição, navegação e tempo: inclui a navegação do artefato espacial.

Somente as duas últimas categorias de serviço estão diretamente relacionadas com as estações terrenas e são objeto do presente trabalho.

Nas próximas seções, são abordados temas que auxiliam a definição das principais características das estações terrenas, suas condições de operação e correlação desses itens com o tipo de missão.

3.3 *Deep space x near space*

A *International Telecommunications Union* (ITU) define deep space como a região do espaço localizada a distâncias iguais ou maiores que 2.000.000 km da Terra (ITU, 2020, p. 23). Note-se que essa definição não esclarece se a distância é medida a partir do centro ou da superfície da Terra, apesar de essa distância ser de cerca de 6,4 km, ou seja, pequena em relação aos 2.000.000 km. Como consequência da definição, *near space* é a região do espaço que se estende da Terra até a distância de 2.000.000 km. Em algumas publicações, a região *near space* é também denominada *near Earth*.

A definição é útil para a identificação das classes de estações terrenas adequadas para integrar o segmento solo das missões espaciais com artefatos localizados nessas duas regiões.

3.4 *Classificação das estações terrenas quanto à mobilidade*

A definição de “estação terrena” vista na Seção 2.4, baseada somente nas suas funcionalidades, é muito genérica e por isso ela abrange tipos bastante distintos de estação no que se refere a, por exemplo, dimensões e peso da sua antena e de outros equipamentos, infraestrutura necessária para instalação e operação como guindastes, fonte de energia e comunicações terrestres, complexidade da forma de instalação e alinhamento das partes, grau de automatização e pessoal necessário para operação. Esses fatores têm impacto nos meios necessários para o transporte e manuseio das partes da estação, no local e no tempo de instalação da estação, e nos recursos humanos necessários para a sua instalação e operação.

No presente trabalho, as estações terrenas são classificadas em fixas, portáteis e móveis observando-se para isto alguns critérios do tipo exemplificado acima e sumarizados na Tabela

3. Em alguns sistemas espaciais as estações portáteis e móveis são chamadas de terminal do usuário.

Na Figura 18, são mostrados diversos tipos de antena do fabricante alemão WTW para aplicação em estações terrenas fixas, portáteis e móveis (transporte em automóvel).



Figura 18 - Família de antenas do fabricante WTW para aplicações em estações terrenas.

Fonte: WTW, Data Sheet Series WTW-S-31-P e WTW-S-26.

A classificação quanto à mobilidade, junto com outras classificações, auxilia na identificação do tipo específico de estação terrena adequado para uma dada missão espacial.

Tabela 3 - Família de antenas do fabricante WTW para aplicações em estações terrenas.

QUESITO	TIPO DE ESTAÇÃO		
	FIXA	PORTÁTIL	MÓVEL
Dimensões e peso das partes da estação	Uma ou mais partes grandes e/ou pesadas requerendo equipamento pesado para manuseio.	Partes com dimensões e pesos que permitem seu manuseio por um ou dois operadores.	Partes com dimensões e pesos bastante reduzidos que permitem seu manuseio, com facilidade, por um operador.
Meios de transporte das partes	Uma ou mais partes requerem caminhão ou veículo de carga grande	Uma ou mais partes requerem caminhonete, veículo de carga pequeno ou automóvel.	Automóvel, transporte pessoal.
Local de instalação	Área grande e específica para a estação e infraestrutura (ar condicionado, casa de força etc.). Pode requerer comunicações terrestres de alto desempenho, rede de energia trifásica / alta potência.	Área pequena e não específica. Pode requerer apenas a infraestrutura comum de energia elétrica e comunicações.	Não requer área para instalação nem infraestrutura de energia e comunicações.
Infraestrutura para instalação	Requer usualmente fundação para o pedestal da antena; pode requerer obras civis para instalação de ar condicionado, cabine de força etc. Requer: guindaste ou similar para manuseio de pelo menos uma parte de grande tamanho e/ou peso; equipamentos especiais para alinhamento da antena.	Pode requerer fundação para o pedestal da antena, mas mais simples que o da estação fixa. Requer abrigo apenas para os equipamentos da estação. Condicionamento de ar e de energia não necessário. Não requer equipamento para manuseio de partes. Procedimento de alinhamento da antena mais simples que o da estação fixa.	Não necessária.
Pessoal para instalação	Equipe de instalação especializada e dedicada, vários membros.	Equipe de instalação especializada e dedicada, talvez com um único membro.	Não necessário.
Tempo de instalação *	Comissionamento: ~ 2 semanas – 3 meses.	Comissionamento: ~ 1 dia – 2 semanas.	Comissionamento: imediato.
Infraestrutura para operação	Pode requerer comunicações terrestres de alto desempenho, rede de energia trifásica / alta potência.	Pode requerer apenas a infraestrutura comum de energia elétrica e comunicações.	Não necessária.
Pessoal para operação	Equipe de operadores.	Operador único ou o próprio usuário.	Usuário.
Operação em movimento	Não.	Não.	Sim.

* – Tempo estimado e indicativo dos períodos relativos.

Fonte: CGEE (2023).

3.5 Uso do espectro eletromagnético pelo segmento solo

Como consequência do exposto na Seção 2.4, os componentes do segmento solo que podem fazer uso do espectro eletromagnético para o desempenho de suas funções são o sistema de comunicações terrestres e o sistema de estações terrenas.

O sistema de comunicações terrestres envolve, pela sua própria definição, somente enlaces terrestres de comunicações os quais podem usar tanto tecnologias de comunicação sem fio como de comunicação cabeada. Todavia, os requisitos desse sistema bem como a regulamentação da sua operação foram considerados fora do escopo desse trabalho e não são abordados.

Por outro lado, as estações terrenas de controle e de dados que compõem o sistema de estações terrenas fazem parte do objeto do presente estudo e suas características e requisitos principais, inclusive o uso do espectro eletromagnético para o estabelecimento dos enlaces de comunicação com os artefatos espaciais, são abordados nas próximas páginas.

O uso do espectro eletromagnético para a comunicação com artefatos espaciais é regulamentado globalmente pela ITU utilizando a classificação dessas comunicações em “serviços”, conforme a lista constante da Tabela 4. (ITU, 2020, p. 8 – 12).

Tabela 4 - Serviços de radiocomunicação envolvendo artefatos espaciais conforme a ITU.

ITEM	SERVIÇO	SIGLA ¹	DESCRIÇÃO
1	<i>Fixed Satellite Service</i>	FSS	Serviço de radiocomunicação entre estações terrenas em posições determinadas e fixas por meio de satélites.
2	<i>Mobile Satellite Service</i>	MSS	Serviço de radiocomunicação entre: estações terrenas móveis ² e uma ou mais estações espaciais, ou entre as estações espaciais do serviço; estações terrenas móveis por meio de uma ou mais estações espaciais.
3	<i>Broadcasting Satellite Service</i>	BSS	Serviço de radiocomunicação no qual os sinais transmitidos ou retransmitidos por estações espaciais são destinados ao público em geral.
4	<i>Radiodetermination Satellite Service</i>	RDSS	Serviço de radiocomunicação destinado à radio determinação por meio de uma ou mais estações espaciais.
5	<i>Radionavigation Satellite Service</i>	RNSS	Serviço de radio determinação por satélite destinado a radio navegação.
6	<i>Radiolocation Satellite Service</i>	RLSS	Serviço de radio determinação por satélite destinado a radio localização.
7	<i>Earth Exploration Satellite Service</i>	EESS	Serviço de radiocomunicação entre estações terrenas e uma ou mais estações espaciais no qual: informações relacionadas com as características da Terra e de seus fenômenos naturais, incluindo dados relativos ao estado do meio ambiente, são obtidas por meio de sensores ativos ou passivos a bordo de satélites terrestres; informações similares são obtidas de plataformas terrestres ou a bordo de aeronaves; essas informações podem ser distribuídas para estações terrenas que façam parte do sistema em consideração; possa incluir a interrogação de plataformas.
8	<i>Meteorological Satellite Service</i>	EESS-Meteo	Serviço de Exploração da Terra por Satélite destinado a fins meteorológicos.
9	<i>Standard Frequency and Time Signal Satellite Service</i>	FTSS	Serviço de radiocomunicação utilizando estações espaciais ou satélites terrestres para as mesmas finalidades do Serviço de Frequência Padrão e Sinal de Tempo.
10	<i>Amateur Satellite Service</i>	ASS	Serviço de radiocomunicação utilizando estações espaciais em satélites terrestres para as mesmas finalidades do Serviço de Radioamador.
11	<i>Inter-Satellite Service</i>	ISS	Serviço de radiocomunicação que provê enlaces entre satélites artificiais.
12	<i>Space Operation Service</i>	SOS	Serviço de radiocomunicação voltado exclusivamente para a operação dos artefatos espaciais, em particular para o rastreamento, telemetria e telecomando.
13	<i>Space Research Service</i>	SRS	Serviço de radiocomunicação no qual veículos espaciais ou outros objetos no espaço são utilizados para pesquisa científica ou tecnológica.
<p>Nota(s): 1 – Siglas do autor; 2 – Estações terrenas móveis podem estar no solo (<i>Land Mobile Satellite Service</i>), a bordo de navios (<i>Maritime Mobile Satellite Service</i>) ou a bordo de aviões (<i>Aeronautical Mobile Satellite Service</i>).</p>			

Fonte: Baseada em ITU (2020, p. 8-12).

No Brasil, a comunicação com artefatos espaciais, particularmente com satélites, é regulamentada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) que segue a regulamentação da ITU como signatária de acordos internacionais com essa organização. A regulamentação da ANATEL para comunicações com satélites está disponível no *website* da organização (ANATEL, 2023).

A regulamentação da ANATEL sobre satélites não faz distinção do seu tamanho conforme a classificação da Tabela 2, fixando-se somente no tipo de serviço realizado conforme a Tabela 4. Contudo, a regulamentação contém algumas considerações distintas quanto a satélites geoestacionários (GEO) e não-geoestacionários (VLEO, LEO e MEO) da Tabela 1.

O serviço SMGS (Serviço Móvel Global por Satélite) da ANATEL não se encaixa exatamente nas definições de serviços da Tabela 4 e é definido como:

Serviço Móvel Global por Satélites Não-Geoestacionários (SMGS): serviço público-restrito móvel por satélite, de âmbito interior e internacional, que utiliza como suporte Serviço de Transporte de Sinais de Telecomunicações por Satélites Não-Geoestacionários cujas estações de acesso são interligadas a redes terrestres, fixas ou móveis (ANATEL, 2023a).

A operação de todos os tipos de cargas úteis embarcadas em satélites e outros artefatos espaciais deve se enquadrar em um ou mais dos serviços previstos na Tabela 4, com exceção do serviço *Space Operation Service* (SOS), que é relacionado com a operação dos artefatos espaciais ou das plataformas (bus) dos satélites. A operação dos artefatos e plataformas também pode, eventualmente, utilizar o serviço *Inter-Satellite Service* (ISS) para comunicação entre os artefatos.

Verifica-se, portanto, que as estações terrenas de dados devem operar nas frequências reservadas aos serviços da Tabela 4, excluindo-se os serviços SOS e ISS. Da mesma forma, as estações terrenas de controle devem operar nas frequências reservadas ao serviço SOS.

A pesquisa das frações do espectro eletromagnético disponibilizadas para cada serviço deve ser feita na regulamentação brasileira. Por esse motivo, a Tabela 5 define as siglas em Português para os serviços da Tabela 4 considerados de interesse. A disponibilidade de faixas de frequências para os serviços da Tabela 5 e para o serviço SMGS pode ser obtida através da análise do documento “Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil – Edição 2023” (ANATEL, 2020b) e de seus documentos de referência e aplicáveis. O resultado dessa análise para as frequências de 100 MHz a 40 GHz é apresentado no Apêndice A.

Conforme a regulamentação da ANATEL, a operação das estações terrenas transmissoras (i.e., estações do tipo TX ou TRX conforme a Seção 2.4) requer o seu licenciamento junto à agência.

Tabela 5 - Serviços de radiocomunicação espacial para consulta da regulamentação nacional.

ITEM	SERVIÇO	SIGLA ¹	UTILIZAÇÃO	
			MISSÃO	OPERAÇÃO
1	Fixo por Satélite	SFS	X	
2	Móvel por Satélite	SMS	X	
3	Rádiodifusão por Satélite	SRS	X	
4	Pesquisa Espacial	SPE	X	
5	Operação Espacial	SOE		X
6	Exploração da Terra por Satélite	SETS	X	
7	Meteorologia por Satélite	SETS–Meteo	X	
8	Enlace entre Satélites	SES	X	X
Nota(s): 1 – Siglas do autor.				

Fonte: CGEE (2023).

3.6 Estações terrenas de controle

A função das estações terrenas de controle foi vista na Seção 2.4. Elas podem ter a função T&C ou TT&C.

A estação de controle pode ter as funções *autotracking* (autorrastreamento) e *tracking* (rastreamento).

A função *autotracking* indica que a estação é capaz de utilizar o sinal de RF emitido pelo artefato espacial para manter a sua antena apontada para ele apesar do movimento do artefato. Além disso, a função *autotracking* indica que a antena da estação pode exportar suas informações de elevação e azimute para outros sistemas para indicar a posição angular do artefato que ela rastreia.

Quando a estação de controle tem a função *tracking* isto indica que ela tem meios para medir a distância do artefato até a antena (*ranging*) e, eventualmente, medir a taxa temporal de variação da distância (*ranging rate*). Há várias técnicas para a medida do *ranging* e do *ranging rate* e essa é uma das características da estação terrena que precisam ser conhecidas para a verificação da sua compatibilidade com o equipamento embarcado no artefato espacial.

Dentre as quatro combinações possíveis envolvendo a presença ou ausência das funções *autotracking* e *tracking*, a combinação presença de *tracking* e ausência de *autotracking* não é viável, ou pelo menos não é de interesse prático.

Assim, as estações T&C não têm rastreamento, mas podem ter autorastreamento. Se, eventualmente, também não tiverem autorastreamento, é preciso que um sistema externo às estações informe a cada instante a direção (azimute e elevação) para a qual a antena deve ser apontada. Para tanto, é necessário o conhecimento ou presunção da trajetória do artefato.

As estações TT&C possuem as funções *autotracking* e *tracking*.

É útil um diagrama de blocos funcionais simplificado da estação, com as suas especificações correspondentes, para a comparação de desempenho de diferentes estações sem que seja necessário entrar em especificações detalhadas, às vezes não disponíveis. Essas especificações também permitem a primeira análise da adequação da estação terrena com o segmento espacial.

Considerando-se, inicialmente, a cadeia de recepção (RX) da estação, o primeiro bloco é constituído pela antena + LNA (*Low Noise Amplifier*). Alguns parâmetros importantes relacionados a ele são: G/T, faixa de frequências de operação, polarização, velocidade angular em azimute e elevação, precisão do apontamento.

O segundo bloco é constituído pelo *Frequency Down-Converter* + Conexão (com primeiro bloco). O principal parâmetro associado é a faixa de frequências na saída do bloco.

O terceiro bloco é o receptor. Os principais parâmetros são: faixa de frequências de entrada, tipos de modulação, taxa dos dados de saída (assumindo-se informação digital).

Considerando-se, agora, a cadeia de transmissão (TX) da estação, o primeiro bloco é constituído pela antena + HPA (*High Power Amplifier*). Alguns parâmetros importantes relacionados a ele são: EIRP, faixa de frequências de operação e polarização.

O segundo bloco é constituído pelo *Frequency Up-Converter* + Conexão (com primeiro bloco). O principal parâmetro associado é a faixa de frequências na entrada do bloco.

O terceiro bloco é constituído pelo transmissor. Os principais parâmetros são: faixa de frequências de saída, tipos de modulação, taxa dos dados de entrada (assumindo-se informação digital).

3.7 Estações terrenas de dados

No caso das estações terrenas de dados há maior interesse na utilização de frequências altas nas ondas portadoras de rádio que viabilizem a transmissão de sinais com grande largura de banda e, portanto, com grande volume de informações. Assim, além de se explorar portadoras de rádio com frequências cada vez mais altas, há também um esforço de viabilização de estações terrenas utilizando ondas portadoras ópticas.

3.7.1 Estações de dados de RF

O tipo das estações terrenas de dados, uma das suas características fundamentais, foi visto na Seção 2.4. Elas são do tipo receptor ou RX.

As estações terrenas de dados podem ter ou não a função *autotracking* com as mesmas funcionalidades e implicações vistas na seção anterior.

Os diagramas de blocos funcionais e parâmetros associados para as cadeias RX, e eventual cadeia TX, também são os mesmos vistos na seção anterior.

3.7.2 Estações de dados ópticas

Os sistemas de comunicação de interesse nessa aplicação são os sistemas ópticos no espaço livre ou, do Inglês, *Free Space Optical* (FSO), distinguindo-se dos sistemas de transmissão por fibras ópticas.

Da mesma forma que em um sistema de RF, o sinal óptico é modulado pela informação e enviado através do espaço ou da atmosfera. A atmosfera é opaca para determinadas faixas de frequência dos sinais ópticos e de RF, o que requer que se utilizem as janelas de visibilidade. No caso óptico, há janelas na região da luz visível e do infravermelho próximo. A luz visível é raramente usada devido ao problema de segurança dos olhos das pessoas próximas aos terminais ópticos. Dois comprimentos de onda na janela do infravermelho próximo utilizados: 1.064 nm ou 1.550 nm.

O uso de frequências mais altas permite larguras de banda maiores, mas os comprimentos de onda mais curtos resultam em feixes mais estreitos que requerem apontamento.

Em um sistema de comunicação óptica para o segmento espacial, o transmissor óptico seria embarcado no artefato e a estação terrena de dados seria o receptor óptico, de forma que maior volume de dados pudesse ser enviado para o solo.

O receptor possui uma abertura que consiste em uma superfície espelhada com qualidade óptica para focar a energia óptica recebida em um dispositivo receptor. A abertura tem que

ser protegida de mau tempo e o receptor deve ser instalado em uma região com ambiente favorável (livre de poeira, nevoeiro etc.).

Na Figura 19, é ilustrada uma estação terrena óptica do fabricante *General Atomics Synopta* (GA-SYNOPTA, 2023) juntamente com as taxas de transmissão passíveis de serem obtidas. Os diversos modelos de estação têm telescópios com diâmetro de abertura de 0,25 m a 1,0 m.

Link Type	Typical Data Rate Range	
	Uplink	Downlink
with LEO satellite	Beacon, low data rate (for TM/TC)	> 5 Gbit/s
with GEO satellite	> 2 Gbit/s	> 2 Gbit/s
Feeder Link to GEO satellite	> 20 Gbit/s, scalable up to Tbit/s	> 10 Gbit/s, scalable up to Tbit/s




Figura 19 - Desempenho da estação terrena óptica da GA-Synopta.

Fonte: <https://ga-synopta.ch/products/optical-ground-stations>.

3.8 Redes de estações terrenas

Como visto na Seção 2.4.1, algumas missões espaciais podem utilizar redes de estações terrenas como forma de aumentar o tempo de comunicação com o artefato espacial. Nesta seção são mencionados alguns exemplos de redes.

O primeiro exemplo é a *Near Space Network* (NSN) da NASA (NASA, 2023, p. 273). É uma rede global que inclui estações da própria NASA e de alguns dos seus parceiros comerciais totalizando 17 estações. A rede inclui estações de controle e de dados, opera nas bandas S, X e Ka e suas características permitem participar de missões espaciais não só próximas da Terra (VLEO, LEO, MEO, GEO), mas também na região near space (até 2.000.000 km de distância da Terra). A distribuição geográfica das estações da rede é ilustrada na Figura 20.



Figura 20 - Distribuição geográfica das estações da rede NSN da NASA.

Fonte: NASA (2023, p. 274).

O outro exemplo de redes de estações terrenas também é da NASA. Trata-se da rede de estações *Deep Space Network* (DSN) (NASA, 2023, p. 277).

Essa rede permite comunicações de dados, telemetria e telecomando e operação de rastreamento de missões espaciais com artefatos em distâncias lunares, nos pontos de Lagrange Sol-Terra, em órbitas terrestres altamente elípticas, em missões para o Sol, planetas do Sistema Solar e além.

É importante registrar que atualmente não há estações terrenas comerciais ou de agências governamentais que possam substituir as estações da DSN em missões na *deep space*.

Há muitas outras redes globais de estações terrenas, comerciais e pertencentes a órgãos governamentais.

Uma comparação interessante a ser feita é sobre o uso de redes de estações terrenas em substituição à rede de satélites repetidores (Seção 2.4.2) ou vice-versa.

As redes de estações terrenas requerem o conhecimento da posição do artefato espacial para que uma de suas antenas aponte para ele. Isso pode ser um problema na fase LEOP da missão porque essa posição não é bem conhecida e o artefato pode não estar na sua atitude mais adequada para estabelecer comunicação. Se nessa situação for usada uma rede global

de satélites repetidores, o artefato sempre estará na linha de visada de um dos satélites repetidores minimizando o problema de desconhecimento da posição.

Por outro lado, o uso de satélites repetidores requer que o artefato espacial tenha embarcado um modem apropriado para a comunicação com os satélites o que tem que ser previsto e implementado desde a fase de desenvolvimento e fabricação do artefato.

Há, certamente, outros aspectos a considerar a favor de uma ou outra abordagem considerando-se os aspectos específicos de cada missão.

3.9 *Ground Station as a Service*

Baseado na descrição do segmento solo e do sistema de estações terrenas da Seção 2.4, pode-se concluir que, no geral, as estações terrenas possuem alto custo de aquisição, operação e manutenção decorrentes dos custos de itens como, por exemplo, terreno para as instalações, equipamentos (antenas, receptores, transmissores, computadores e softwares etc.), prédio e infraestrutura predial (instalações elétrica e ar condicionado, manutenção predial), treinamento e manutenção do pessoal de operação, treinamento e manutenção da equipe de manutenção.

Certamente, há redução de custos das estações quando ocorre um ou mais fatores como, por exemplo, redução das funcionalidades da estação (exemplo: estação somente RX ou TX, rastreamento do artefato espacial não requerido, comunicação nas faixas de frequência mais baixas, uso de antenas de baixo ganho, taxas de dados baixas ou modulações simples do sinal de RF etc.), maior tolerância na precisão do apontamento da antena, redução do tamanho da antena, utilização de equipamentos de processamento de sinais digital disponíveis no mercado de massa, baixo período de operação ou automatização acarretando a redução da equipe de operadores, requisitos de treinamento dos operadores menos exigentes, tolerância às falhas da estação devido à baixa criticidade da missão.

Uma solução alternativa para a implementação das estações terrenas quando os custos envolvidos são altos é a utilização de estações de terceiros, na forma de serviços prestados por outras organizações em um tipo de transação comercial que o mercado espacial denominou de *Ground Station as a Service* (GSaaS) (HIDALGO, 2023; AWS, 2023; CURTIS, 2023; NASA, 2023, p. 280).

Uma definição de GSaaS é:

Estação terrena como serviço (GSaaS) é um serviço gerenciado que permite aos clientes comunicar, baixar e processar dados de seus satélites/artefatos espaciais com base no

pagamento conforme o uso, sem precisar que eles construam suas próprias estações terrenas de satélite. Esses serviços geralmente são escaláveis e usam serviços de nuvem de ponta como intermediários para os dados dos clientes (NASA, 2023, p. 280).

Como exemplo de GSaaS em concordância com a definição acima, descreve-se a seguir o serviço da AWS (*Amazon Web Services*) com base nas referências (AWS, 2023) e (NASA, 2023, p. 280).

O serviço *AWS Ground Station*:

- fornece uma rede global de estações terrenas;
- permite registrar satélites e programar acessos a eles;
- comanda, controla e baixa dados usando a *AWS Ground Station* durante os intervalos de tempo programados;
- recebe os dados dos satélites no serviço Amazon VPC;
- processa os dados na *Amazon Cloud* e distribui os dados processados com a *AWS Global Infrastructure*.

O fluxo acima é ilustrado na Figura 21.

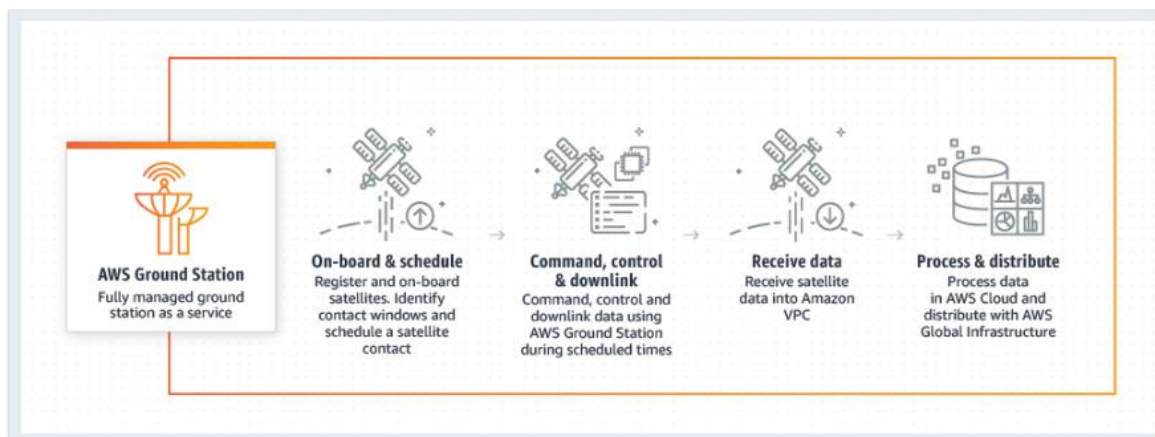


Figura 21 – Funcionamento do serviço *AWS Ground Station*.

Fonte: <https://aws.amazon.com/pt/ground-station/getting-started/>.

Na Figura 22, é apresentada a arquitetura de alto nível do serviço da AWS contendo alguns detalhes adicionais em relação ao fluxo da Figura 21.

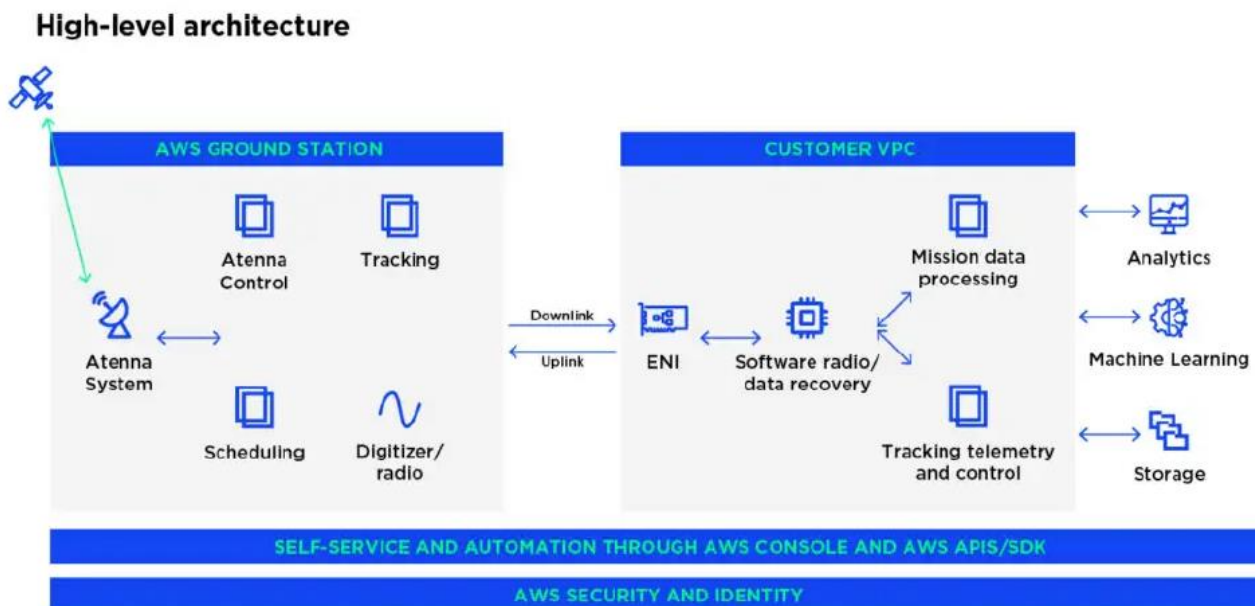


Figura 22 - Arquitetura de alto nível do serviço AWS *Ground Station*.
 Fonte: Curtis (2023).

Na Figura 22, é mostrada, no lado direito, a agregação ao AWS *Ground Station* de serviços adicionais da AWS para análise dos dados, inteligência artificial e armazenamento dos dados. Os dados dos fluxos *downlink* e *uplink* na Figura 22 também podem ser enviados diretamente para o usuário sem passar pelo processamento do serviço *customer VPC* (AWS, 2023a). Observe-se que esses fluxos são sinais digitais apesar dos nomes sugerirem sinais analógicos de RF.

Na Figura 23, são mostradas as localizações das antenas do AWS *Ground Station* em 2021.



Figura 23 - Localização das antenas do serviço AWS *Ground Station*.
 Fonte: <https://aws.amazon.com/pt/ground-station/locations/>.

As bandas de frequência dos enlaces com os satélites são (NASA, 2023, p. 281):

- Enlace de subida na banda S: 2.025 – 2.120 MHz;
- Enlace de descida na banda S : 2.200 – 2.300 MHz, G/T: 16 dB/K;
- Enlace de descida na banda X: 7.750 – 8.400 MHz, G/T: 30,5 dB/K.

As órbitas dos satélites a serem rastreados pelas antenas do *AWS Ground Station* podem ser LEO ou MEO.

O pagamento do serviço *AWS Ground Station* é feito na base “por minuto”, isto é, o usuário paga somente pelo período programado e sem compromisso de uso a longo prazo.

Curtis (2023) identifica dois modelos para o serviço GSaaS:

- a) redes de estações terrenas dedicadas como serviço;
- b) agregadores de capacidade de estações terrenas.

No primeiro modelo, empresas ou organizações que possuem sua própria rede de estações terrenas ao redor do mundo alugam a capacidade disponível nas suas estações.

No segundo modelo, empresas ou organizações oferecem o tempo livre de estações terrenas espalhadas pelo mundo e que foram instaladas e deixadas como legado por agências ou operadores industriais.

Na visão deste trabalho, o segundo modelo também comporta a situação em que a empresa ou organização oferece o tempo livre de uma ou poucas estações, ao invés de uma rede global, cabendo ao contratante do serviço contatar tantas empresas ou organizações quanto as que forem necessárias para formar a rede de estações com a cobertura desejada.

Alguns provedores do serviço GSaaS podem oferecer soluções tecnologicamente bem mais simples que a utilizada no *AWS Ground Station* sumarizado acima. Um exemplo dessa situação é a estação terrena para nanosatélites da GAUSS (GAUSS, 2023) que, na visão deste trabalho, oferece o serviço de estação terrena alinhado com o segundo modelo de negócio. Outro exemplo similar é a estação terrena do INPE/Natal da Seção 3.10.3.

Além do modelo do serviço, também é importante definir quais serviços do segmento solo vistos na Seção 3.2, com as suas subdivisões, serão ou não obtidos via GSaaS.

No Apêndice B, é apresentada uma lista não exaustiva de fornecedores do serviço GSaaS com alguns parâmetros básicos. As referências fornecidas permitem a pesquisa mais detalhada do serviço ofertado.

3.10 Estações terrenas nacionais

Nesta seção são apresentadas de forma sumária as estações terrenas nacionais descritas na literatura técnica de acesso público.

3.10.1 Estação terrena INPE/Cuiabá

A estação terrena do INPE em Cuiabá, MS (ETC) possui o pessoal e a infraestrutura para atuar como estação terrena de controle, com a função TT&C em banda S, e estação terrena de dados para algumas cargas úteis específicas.

A instalação, como descrito anteriormente, possui nove antenas, denominadas de CB01 a CB09, de tipos diversos como refletor parabólico e Yagi, diversas dimensões, polarizações, ganhos, velocidades de movimentação etc., operando nas bandas de frequências VHF, UHF, L, S e X. Os diâmetros dos refletores parabólicos variam de 1,5 m a 11,28 m. Os ganhos das antenas, nas suas respectivas frequências de operação, variam de 11,5 dBi a 57,5 dBi.

Alguns programas cujos satélites são rastreados ou tem seus dados baixados são Amazonia 1, AQUA, CBERS, COSMIC, FENGYUNG, LANDSAT, MECB (SCD-1 e SCD-2), METOP-B, NOAA, NPP, TERRA e diversos CubeSats. A ETC utiliza enlaces em fibra óptica para conexão com a rede de fibra óptica RNT e enlaces privados para a conexão com o COCRC. Na Figura 24 é mostrada uma vista das antenas CB01 (instalada em 1982), diâmetro 10 m, e CB09 (instalada em 2019), diâmetro 11,28 m.

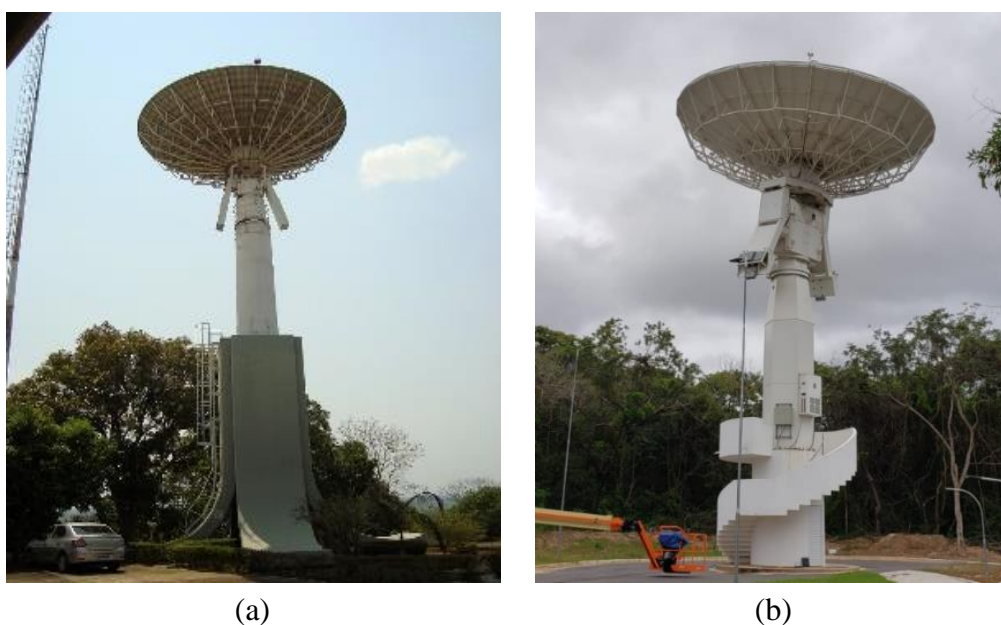


Figura 24 - Antenas (a) CB01, (b) CB09 da estação terrena INPE/Cuiabá.

Fonte: INPE/Cuiabá.

3.10.2 Estação terrena INPE/Alcântara

A estação terrena do INPE em Alcântara, MA (ETA) possui o pessoal e infraestrutura para atuar como estação terrena de controle, com a função TT&C em banda S, e estação terrena de dados para as cargas úteis Argos de coleta de dados em banda S (SCD-1,2, CBERS).

A instalação possui duas antenas sendo que a principal é a antena com refletor parabólico de diâmetro 11,28 m. A fotografia dessa antena é a mostrada na Figura 15 (c).

A ETA utiliza enlaces privados para a conexão com o COCRC e VPN para as demais conexões.

3.10.3 Estação terrena INPE/Natal

A Estação Multimissão de Natal (EMMN) é uma estação terrena de dados, telemetria e comando (dados e T&C) em desenvolvimento pela Coordenação Espacial do Nordeste (COENE) do INPE (INPE/COENE, 2022).

Localizada na cidade de Natal, RN, a estação terrena EMMN operará nas bandas de frequências VHF (144 – 149 MHz), UHF (395 – 405 MHz e 432 – 440 MHz) e S (2.100 – 2.300 MHz) para recepção de dados e telemetria de satélites em órbita baixa e transmissão de comandos para eles. A estação utiliza receptores e transmissores com a tecnologia Rádio Definido por *Software* o que permite a implementação de diversos tipos de modulação, protocolos de comunicação e taxas de bits. Alguns esquemas de modulação e protocolos já implementados são, respectivamente, FSK / AFSK / BPSK / GMSK / G3RUH e AX.25. As taxas de bits disponíveis são 1.200, 2.400, 4.800 e 9.600 bps (INPE/COENE, 2020).

Ainda segundo a referência (INPE/COENE, 2020) “a Estação realiza rastreamentos autônomos de vários satélites segundo um agendamento prévio e obedecendo a uma escala de prioridades. Uma concepção de rede em estrutura cliente-servidor permite aos usuários da estação inserir e receber dados remotamente”. Essa concepção de rede é ilustrada na Figura 25.

Na Figura 26, são mostradas algumas vistas da estação EMMN.

Não foi possível atualizar o status do desenvolvimento e funcionamento da EMMN após 01/2022 quando as informações apresentadas nesta seção foram coletadas.

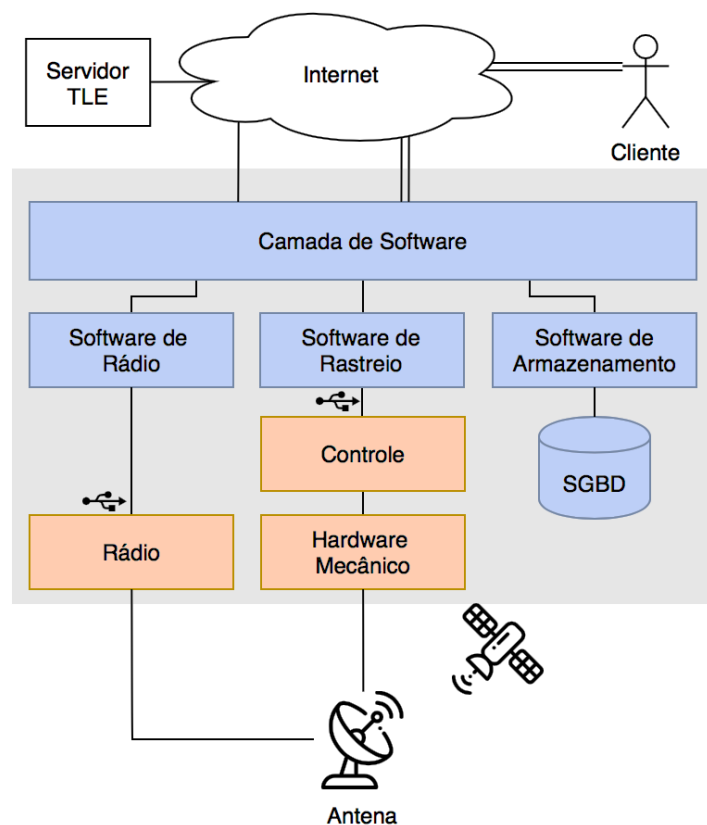


Figura 25 - Estrutura cliente-servidor da rede de acesso à EMMN.
 Fonte: INPE/COENE (2020).



Figura 26 - Vistas parciais da Estação Multimissão de Natal.
 Fonte: <https://www.facebook.com/ccslifrn/posts/3064341033677706/>.

3.10.4 Estação terrena INPE/Santa Maria

A estação terrena da Coordenação Espacial Sul (COESU) (anteriormente CRS – Centro Regional Sul) do INPE em Santa Maria, RS, foi instalada para atender as demandas de comunicação e controle dos nanossatélites do programa NANOSATC-BR (1 & 2) e de outros nanossatélites brasileiros.

Essa estação, denominada de ET (INPE-CRS) no programa NANOSATC-BR, foi planejada para operação coordenada com a estação terrena do ITA.

Os equipamentos instalados foram os fornecidos pela empresa ISIS no seu GS Kit, configurados para recepção de telemetrias e transmissão de comandos nas faixas de frequências 144 – 146 MHz (VHF) e 430 – 450 MHz (UHF) e recepção de dados na faixa 2.400 – 2.402 MHz (banda S).

A instalação das antenas para as bandas VHF, UHF e S no telhado do prédio sede do COESU (no campus da Universidade Federal de Santa Maria) é ilustrada na Figura 27.



Figura 27 - Vista das antenas da estação terrena do INPE/Santa Maria.

Fonte: http://www.inpe.br/sul/nanosat/estacoes/estacao_santa_maria.php.

3.10.5 Estação terrena do ITA

A estação terrena do ITA corresponde à estação terrena denominada de ET (INPE-ITA) no âmbito do programa de nanossatélites NANOSATC-BR (INPE, 2023).

Os equipamentos instalados e a sua configuração são os mesmos descritos na seção anterior.

Na Figura 28, é ilustrada a instalação das antenas da estação no telhado do prédio sede do curso de engenharia eletrônica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica em São José dos Campos, SP.

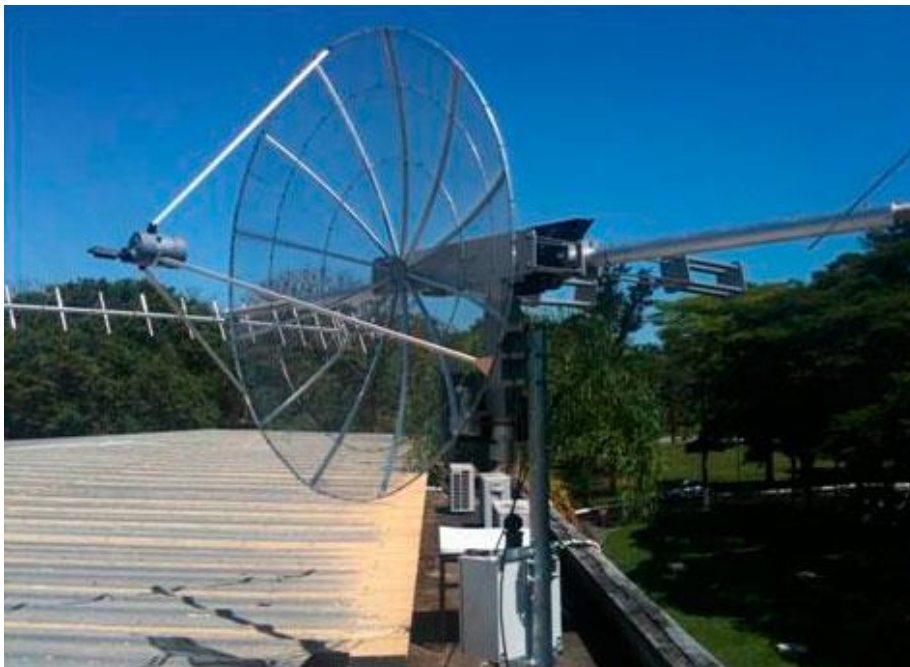


Figura 28 - Vista das antenas da estação terrena do ITA.

Fonte: http://www.inpe.br/sul/nanosat/estacoes/estacao_sjc.php.

3.10.6 Estação terrena da UFSC

A estação terrena da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) é operada pelo laboratório de pesquisa espacial denominado *SpaceLab* (UFSC, 2023).

Não há maiores detalhes disponíveis no website do laboratório sobre o segmento solo, mas ele inclui a estação terrena (*ground station*) e o centro de operações. O segmento é destinado a missões com CubeSats e tem capacidade para receber telemetrias e enviar comandos nas bandas de VHF e UHF. Há um plano para automatizar a estação e prover acesso para usuários externos (UFSC, 2023a).

3.10.7 Rede Integrada Brasileira de Rastreamento de Satélites

A Rede Integrada Brasileira de Rastreamento de Satélites (RIBRAS) será um sistema educacional com finalidades educacionais e científicas financiado pela Agência Espacial Brasileira e apoiado pelo SETEC/MEC (CENTRO DE REFERÊNCIA EM SISTEMAS EMBARCADOS E AEROESPACIAIS, 2023).

O sistema RIBRAS funcionará integrado pela internet e as suas estações de rastreamento poderão operar em modo manual ou automático. Cada estação terá dois sistemas independentes operando em VHF/UHF e banda S. As antenas de cada sistema serão montadas em duas torres, como ilustrado na Figura 29.

O sistema RIBRAS terá estações instaladas nos seguintes Institutos Federais (IF) e Universidades Federais: IFF, IFMT, IFBA, IFMA, IFRR, IFAC, UFABC, UFMG, UFSC e UnB.

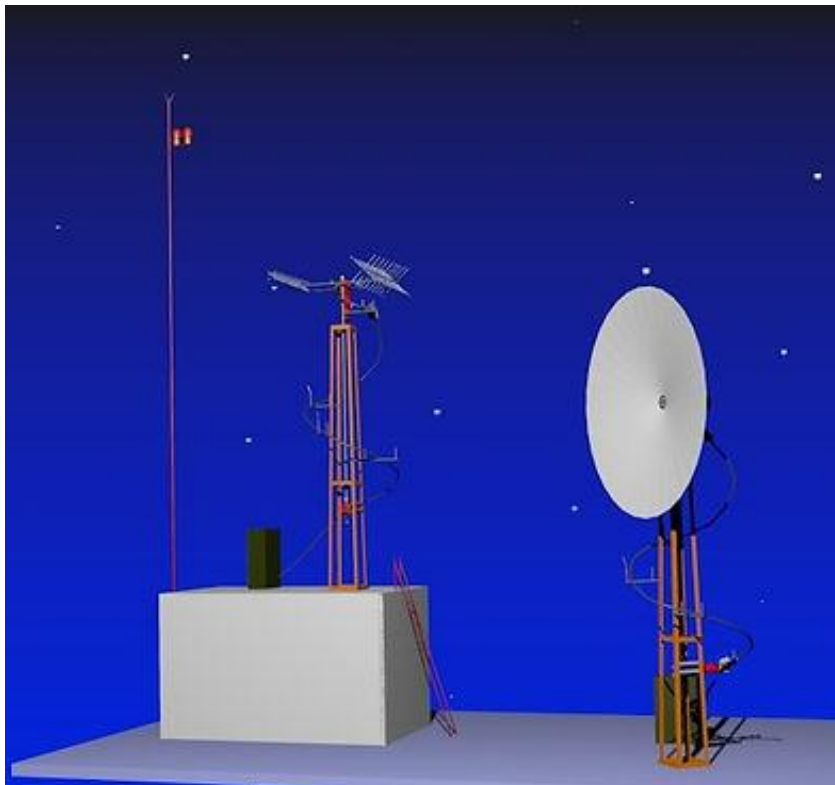


Figura 29 - Montagem das antenas VHF/UHF e banda S das estações da RIBRAS.

Fonte: <https://crseaiiff.wixsite.com/site/ribras>.

4. NOVAS DEMANDAS E TECNOLOGIAS RELACIONADAS ÀS ESTAÇÕES TERRENAS

As estações terrenas são componentes imprescindíveis dos sistemas espaciais porque permitem a comunicação entre a sua infraestrutura de solo e o segmento espacial, recebendo deste as informações de interesse, de acordo com a missão, e enviando para ele comandos com finalidades diversas.

Tradicionalmente, as estações terrenas tinham alto custo de instalação, manutenção e operação e atendiam uma pequena quantidade de missões espaciais, comparativamente ao número atual de missões. Esse número aumentou acentuadamente com a redução do custo e tamanho dos satélites e, especialmente, com o desenvolvimento dos CubeSats.

Na Figura 30, é mostrada a quantidade de artefatos espaciais (satélites, sondas, aeronaves tripuladas, outros) lançados anualmente no período de 1957 a 2022 (UNITED NATIONS OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS, 2023) com o lançamento de 2.478 artefatos em 2022.

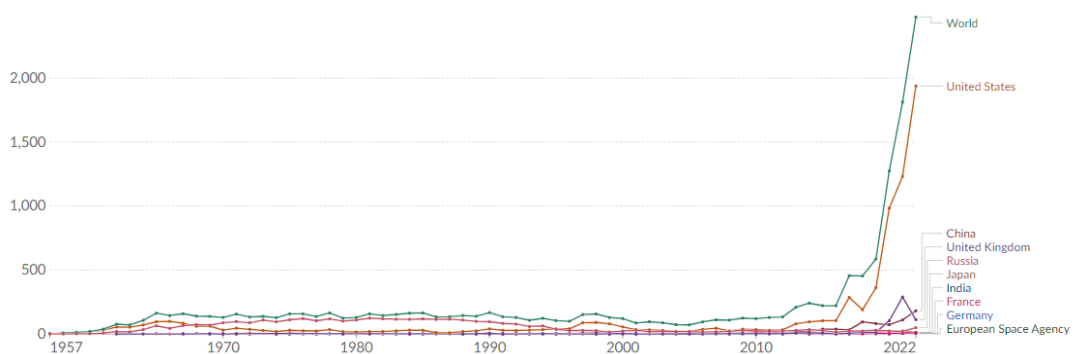


Figura 30 - Artefatos espaciais lançados anualmente.
Fonte: *United Nations Office for Outer Space Affairs*.

Dentre os artefatos lançados, uma boa parte é de satélites que ainda permanecem em suas órbitas terrestres, como mostrado na Figura 31, e precisam de comunicação com o solo.

Increase in Operating Satellites

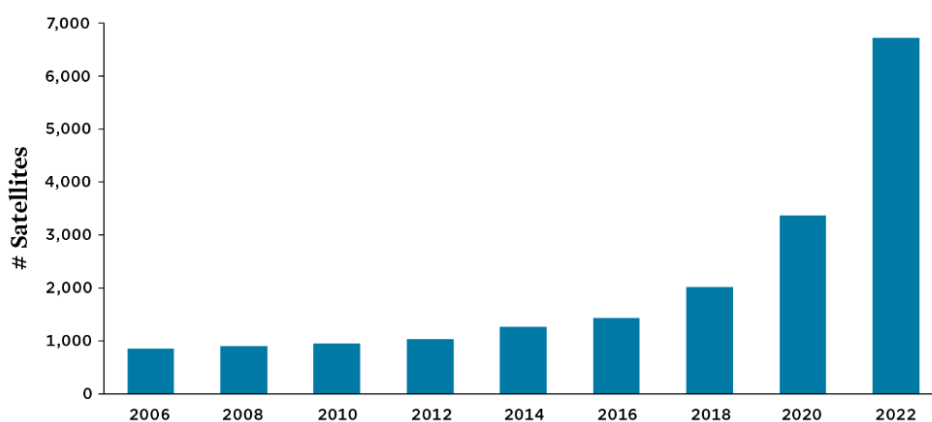


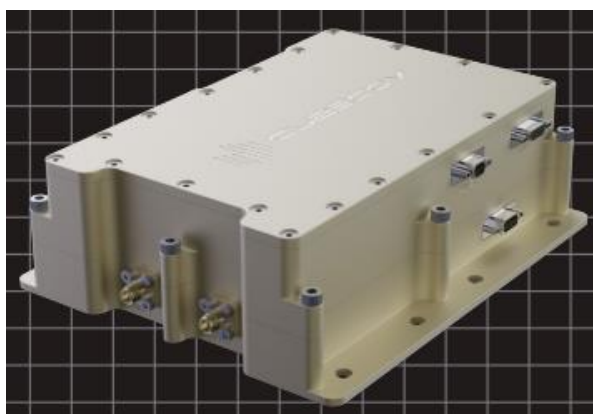
Figura 31 - Total de satélites em órbita a cada ano.
Fonte: *Union of Concerned Scientists* (2023).

Para integrar os novos sistemas espaciais, as estações terrenas devem atender novas e exigentes demandas tais como redução dos custos, maior distribuição geográfica, operação com satélites em órbita baixa, com 84% dos satélites em órbita em maio de 2023 (KONGSBERG/NANOAVIONICS, 2023), maior automação das suas operações, maior integração com as redes terrestres de comunicações e interface com novas tecnologias embarcadas nos satélites como, por exemplo, o uso de frequências mais altas, como as da banda Ka (25,5 - 27,0 GHz) e dos enlaces ópticos, e taxas de dados acima de 1 Gbps.

Uma tendência tecnológica dos transmissores de dados dos satélites de pequeno e médio porte e dos *CubeSats* é o uso da norma DVB-S2. Na Figura 32, é apresentada uma vista dos transmissores para a banda X das empresas *Endurosat* e *Cubecom* para aplicação, respectivamente, em *CubeSats* e microssatélites.



(Endurosat)



(Cubecom)

Figura 32 - Transmissores na banda X conformes à norma DVB-S2.

Fonte: Endurosat (2023) e Cubecom (2023).

A norma DVB-S2 (EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE, 2014) e as suas antecessoras têm sido amplamente utilizadas nos serviços de comunicação utilizando satélites geoestacionários, como o FSS (*Fixed Satellite Service*) e o BSS (*Broadcast Satellite Service*) desde 1994, mas, a partir de 2015, a sua aplicação em outros serviços espaciais, como o EESS (*Earth Exploration Satellite Service*) e o SRS (*Space Research Service*), ganhou importância (FERNANDEZ, M.A., et al, 2015; MILLERIOUX, J.P., et al, 2016; KANEKO, T., et al., 2019).

O avanço dos componentes de processamento digital para uso espacial permitiu embarcar em satélites e em outros artefatos espaciais de pequeno e médio porte equipamentos com a tecnologia de Rádio Definido por *Software* (SDR – *Software Defined Radio*) capazes de realizar o processamento de sinais requerido para a implementação da norma DVB-S2. Uma

das vantagens da aplicação dessa norma é a otimização da taxa de transmissão de dados para diversas condições de relação sinal/ruído dos enlaces de rádio possibilitando, por exemplo, taxa de dados de até 1,3 Gbps na banda X (KANEKO, T., et al, 2019) e acima de 2 Gbps na banda Ka, ou a redução da potência de transmissão (2 dB para modulação QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*, por exemplo).

Outra vantagem da aplicação da norma é a utilização da sua funcionalidade VCM (*Variable Code and Modulation*) para otimizar a capacidade de transferência de dados dos satélites em órbitas baixas durante a sua passagem pelas estações terrenas. Nessas órbitas, a distância entre o satélite e a estação terrena varia bastante durante a passagem, causando uma grande variação da relação sinal/ruído do enlace. Em uma órbita com altitude de 450 km, por exemplo, a relação sinal/ruído diminui aproximadamente 12 dB conforme o satélite se desloca do zênite até o horizonte da estação terrena. Dimensionando-se o enlace para a condição de pior caso da relação sinal/ruído, sua capacidade de transferência de dados fica subutilizada quando o satélite está mais próximo da estação.

A DVB-S2 permite que a modulação e a codificação de erro do transmissor embarcado sejam modificadas ao longo da passagem do satélite pela estação otimizando a taxa de dados do transmissor para trechos distintos da passagem. Essa abordagem permite aumento de até 60% no volume de dados transferidos para a estação.

Outra funcionalidade da DVB-S2 de interesse para aplicação em satélites de pequeno e médio porte é a ACM (*Adaptative Code and Modulation*). A ACM utiliza a funcionalidade VCM, juntamente com a informação em tempo real sobre as condições atmosféricas no local da estação terrena, para modificar em tempo real a modulação e a codificação de erro do sinal do transmissor embarcado com o objetivo de otimizar a capacidade do enlace para aquelas condições. O satélite recebe as informações do solo por meio de um enlace de subida (solo-espço) denominado canal de retorno. A funcionalidade ACM é bastante útil nos satélites com transmissão em frequências altas (acima da banda X como, por exemplo, Ku e Ka) e órbitas baixas, porque a operação desses satélites requer estações terrenas distribuídas geograficamente e que podem estar, em cada momento, sob condições atmosféricas bastante diferentes.

Outras vantagens da aplicação da norma DVB-S2 em missões espaciais com satélites de pequeno e médio porte podem ser exploradas dependendo das características e requisitos específicos dessas missões. Como exemplo, foi estudado o emprego da norma para a melhoria da qualidade das imagens recebidas de satélites de sensoriamento remoto por meio

da mitigação da interferência de sinais de rádio terrestres nas estações terrenas (ARAÚJO, Rodolfo A.S., 2023).

As estações terrenas devem ser compatíveis com os sinais DVB-S2 recebidos do segmento espacial das novas missões e, atualmente, diversos operadores de estações oferecem essa compatibilidade. A NASA, por exemplo, tem adaptado suas redes de estações TT&C (*Telemetry, Tracking and Command*) e de dados para incluir interface conforme com a norma DVB-S2 (NASAW, 2023; WONG et al., 2018).

Como os receptores e transmissores (modems), DVB-S2 foram desenvolvidos para o mercado de massa da comunicação digital por satélites (FSS e BSS) e o seu custo é baixo em comparação com os equipamentos similares utilizados nas estações terrenas para os serviços EESS e SRS. Essa redução de custo ocorre mesmo quando são necessários serviços de engenharia não recorrentes para modificação/adequação dos equipamentos. O custo menor dos equipamentos DVB-S2 das estações terrenas representa vantagem adicional da aplicação da norma DVB-S2 no segmento espacial das novas missões.

Algumas das demandas das estações terrenas para as novas missões espaciais como, por exemplo, redes globais de estações e redução de custos, são atendidas na abordagem “estações terrenas como um serviço” (GSaaS), na qual organizações comerciais e governamentais, utilizando infraestrutura própria, rastreiam os satélites de seus clientes, recebem os dados de bordo desses satélites e enviam para eles os comandos dos clientes. Os clientes pagam pelo serviço com base no tempo de uso da infraestrutura. Alguns exemplos de fornecedores comerciais do GSaaS são a AGS (*Amazon Web Services Ground System*), a Viasat e a *Space Leaf*.

Diversos fornecedores do GSaaS, para viabilizarem o pacote de serviços oferecido, possuem estações terrenas com tecnologias muito diferentes das estações tradicionais incluindo, entre outros itens, o extenso uso da tecnologia SDR e do processamento digital de sinais em banda base. Essas soluções tecnológicas serão abordadas oportunamente.

Para estabelecer a comunicação entre os segmentos espacial e solo das missões espaciais as estações terrenas recebem sinais de radiofrequência dos artefatos espaciais com as informações de bordo de interesse e transmitem sinais de radiofrequência para os artefatos com os comandos do solo para finalidades diversas.

Apresenta-se, a seguir, uma descrição sumária das estações terrenas com as principais características e funcionalidades e as tendências tecnológicas para a implementação dos seus componentes de forma a atender as novas demandas das missões espaciais.

Na Figura 33, é mostrado um diagrama de blocos funcionais simplificado da cadeia de recepção das estações terrenas e a Tabela 6 lista as principais características desses blocos.

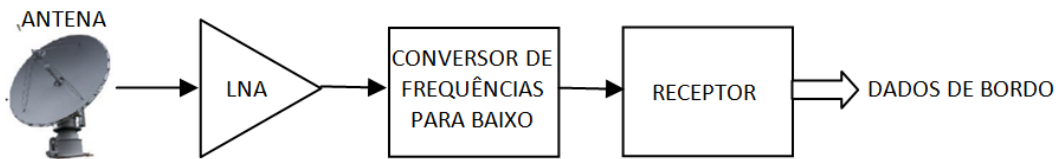


Figura 33 - Diagrama de blocos funcionais simplificado da cadeia de recepção das ETs.

Fonte: CGEE (2023).

Tabela 6 - Principais características da cadeia de recepção das ETs.

CARACTERÍSTICA	Antena + LNA	Conversor de Frequências para Baixo (CFB)	Receptor
Frequência de recepção	X		
G/T (Ganho / Temperatura de ruído do sistema)	X		
Diagrama de irradiação e lóbulos secundários	X		
Polarização	X		
Velocidade e aceleração angular em azimute e elevação	X		
Erro de apontamento	X		
Autorrastreamento	X	X	
Frequência de FI		X	X
Largura de banda de FI		X	X
Tipo de modulação			X
Taxa de dados da informação			X

Fonte: CGEE (2023).

4.1 Bloco Antena + LNA

O bloco funcional Antena + LNA inclui também o hardware elétrico e mecânico necessário para o suporte físico, movimentação e apontamento da antena para o artefato espacial de interesse.

A primeira característica deste bloco é a banda de frequências de operação. É nessa faixa de frequências que ocorre a recepção dos sinais dos artefatos espaciais e as frequências

reservadas para isto são regulamentadas internacionalmente pela ITU e, no Brasil, pela ANATEL em função do tipo da missão espacial.

Outra característica, a relação ganho/temperatura de ruído (G/T), é um parâmetro fundamental e uma figura de mérito do sistema de recepção e indica a sua capacidade de captar o sinal de radiofrequência com potência acima da potência do ruído do sistema. G é o ganho da antena da estação terrena e T é a temperatura de ruído do sistema de recepção, dada pela soma da temperatura de ruído da antena e da temperatura de ruído dos circuitos de recepção (amplificador de baixo ruído, conversor de frequências, receptor e elementos de interconexão). O valor requerido de G/T da estação terrena é função do tipo da modulação do sinal de radiofrequência recebido e, se a modulação for digital, da taxa de erro de bit desejada.

O ganho de uma antena é dado pela expressão $G = \eta \cdot (4\pi A f^2 / c^2)$ (Ha, T.T., 1990), em que G é adimensional, A é a área da abertura da antena em m^2 , f é a frequência do sinal recebido em Hz, c é a velocidade da luz em m/s e η é a eficiência da abertura da antena ($\eta < 1$).

Conclui-se da expressão acima que o aumento do ganho de uma antena requer o aumento da sua área de abertura o que, em última instância, requer o aumento das suas dimensões físicas. Também se conclui que o ganho de uma antena aumenta quando ela é operada em frequências mais altas.

O desempenho da antena CB01 da Estação Terrena Cuiabá do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em Cuiabá, MT, pode ser usado como exemplo da dependência funcional acima. Essa antena, com refletor parabólico de 10 m de diâmetro ($A = \pi D^2 / 4$; A é a área e D é o diâmetro), opera nas bandas de frequências S (2.200 – 2.300 MHz) e X (8.000 – 8.400 MHz). O ganho da antena nas bandas S e X é, respectivamente, 44,5 dBi e 55,5 dBi.

Outro parâmetro importante da antena da estação é o seu diagrama de irradiação. Ele indica a direção do lóbulo principal da antena, isto é, da região do espaço que contém a maior parte da energia recebida pela antena, e também as direções dos lóbulos secundários, ou seja, as demais regiões do espaço das quais a antena também recebe energia. O diagrama também indica o nível da irradiação recebida nessas direções secundárias comparativamente ao nível na direção principal, o que é denominado de amplitude ou nível dos lóbulos secundários.

A direção e o nível dos lóbulos secundários podem tornar a estação mais suscetível às interferências das fontes de sinais de rádio espaciais e terrestres e aumentar a temperatura de ruído da antena.

A temperatura de ruído do amplificador de baixo ruído (LNA – *Low Noise Amplifier*) é a principal parcela da temperatura de ruído dos circuitos de recepção. Normalmente, o ganho do LNA é suficientemente alto para que a contribuição do conversor de frequência e dos demais blocos da Figura 33 seja muito pequena.

O valor mínimo da temperatura de ruído do LNA é limitado pela tecnologia do componente ativo utilizado (normalmente um tipo de transistor). Quando o valor mínimo não é suficientemente baixo, a técnica utilizada é a de resfriamento do LNA operando-o em temperaturas físicas baixas, normalmente criogênicas. Como exemplo de aplicação da técnica pode ser citado o LNA modelo CITLF4 da empresa Cosmic Microwave Technology (COSMIC MICROWAVE TECHNOLOGY, 2023). Esse amplificador utiliza transistores SiGe e possui temperatura de ruído e ganho de potência na banda S de, respectivamente, 80 K e 30 dB, quando operado em temperatura ambiente (27 °C). Quando operado na temperatura de -261 °C, a temperatura de ruído e o ganho de potência do LNA são, respectivamente, 7 K e 35 dB.

O valor de G/T da estação terrena em uma dada frequência varia com o apontamento da antena porque a sua temperatura de ruído depende da região do céu coberta pelo seu lóbulo principal e das regiões do céu e da Terra cobertas pelos seus lóbulos secundários.

Como exemplo do desempenho de equipamentos reais, a estação terrena da empresa SatLab (SATLAB, 2023) possui uma antena com refletor parabólico com diâmetro de 2,4 m e circuitos de recepção que resultam em G/T de 9 dB/K na banda S. A estação de telemedidas do Centro de Lançamento de Alcântara possui uma antena com refletor parabólico com 10 m de diâmetro e circuitos de recepção cujo G/T, na mesma banda de frequências, é 18,5 dB/K.

Outra característica associada ao bloco Antena + LNA é a polarização da antena. Ela deve estar casada com a polarização dos campos eletromagnéticos do sinal a ser recebido e é, normalmente, linear (V – Vertical ou H – Horizontal) ou circular (CE – Circular a Esquerda ou CD – Circular a Direita). A comunicação com alguns artefatos espaciais requer que a estação terrena opere simultaneamente com duas polarizações (V + H ou CE + CD).

Para rastrear os artefatos espaciais a antena precisa ser movimentada nos seus dois eixos (azimute e elevação), com velocidade de rotação e aceleração adequadas à velocidade do artefato a ser rastreado. A movimentação da antena é feita por meio da aplicação de sinais de controle de azimute e elevação nos circuitos de alimentação dos motores de cada eixo e hardware mecânico associado. Os sinais de controle são gerados por um computador, não incluído na Figura 4.4, a partir da trajetória conhecida do artefato espacial. Alternativamente,

se a estação terrena tiver a função de autorrastreamento (*autotracking*) esses sinais de controle são gerados pelo circuito de controle dos motores que integra o bloco Antena + LNA. Exemplos de valores de velocidade de rotação são a velocidade de 6°/s da antena da estação terrena da ISISPACE (ISISPACE, 2023) para CubeSats e satélites de pequeno porte e a velocidade de 10°/s (mínima) das antenas da rede *Near Space Network* (NSN) da NASA (NASA, 2023).

A função de autorrastreamento supracitada permite que a estação terrena utilize o próprio sinal de rádio recebido do artefato para gerar os sinais de controle necessários para manter a antena apontada para ele ao longo do seu deslocamento. Para tanto, a antena da estação também deve ter as características adequadas para a técnica de rastreamento requerida como, por exemplo, monopulso ou *conical scanning*. De qualquer forma, a antena e parte dos circuitos de recepção geram um sinal de erro de apontamento que é utilizado pelo circuito de controle para gerar os sinais de controle supramencionados.

Outra característica importante associada ao bloco Antena + LNA é o erro de apontamento da antena. Se o eixo da antena (a direção do ganho máximo) não está apontado para o artefato espacial o ganho da antena na direção da comunicação é menor que o esperado, com conseqüente redução da potência do sinal recebido e degradação do desempenho do enlace. No cálculo de enlaces, essa diminuição do ganho em relação ao máximo esperado é chamada de perda de apontamento da antena.

O erro de apontamento tolerável é determinado com base na perda de apontamento tolerável. Essa perda, por sua vez, é determinada pela análise das margens do enlace e o diagrama de irradiação da antena, característica abordada acima, indica a variação angular (erro de apontamento) decorrente. Há sugestão na literatura (Ha, T.T., 1990) que o erro de apontamento seja menor que aproximadamente 33% da largura do feixe de meia potência da antena. A perda de apontamento associada dependerá do contorno geométrico específico do feixe, mas estima-se que em muitos casos ela será menor que 1,5°dB. Se for utilizada uma técnica de autorrastreamento o erro de apontamento pode ser reduzido para menos que 5% da largura do feixe de meia potência (Ha, T.T., 1990).

A antena da estação SatLab em banda S tem 4,5° de largura do feixe de meia-potência e erro de apontamento < 1° (SATLAB, 2023). A estação em banda S da ISISPACE tem duas versões de antena com refletor parabólico: uma com diâmetro de 1,9 m e largura do feixe de 5,1° e outra com diâmetro de 3,0 m e largura do feixe de 3,2°. A empresa indica o erro no posicionamento angular dos rotores de 0,2°, mas não esclarece o erro angular final no

apontamento da antena (ISISPACE, 2023). A NASA (NASA, 2023) não fornece as larguras dos feixes das antenas em banda S, mas indica o erro de apontamento de $0,03^\circ$.

A largura do feixe de meia potência diminui com o aumento da frequência de operação e com o aumento da área da abertura (tamanho) da antena. Logo, antenas que requerem maiores valores do ganho e operam em frequências mais altas terão menor largura do feixe e exigirão menor erro de apontamento.

Como exemplo dessa situação considere-se o caso de uma antena com refletor parabólico de 20 m de diâmetro operando na frequência de 14,25 GHz (banda Ku) (Ha, T.T., 1990). O ganho dessa antena é 66,8 dB e a largura do feixe de meia potência é $0,062^\circ$. Com base na recomendação apresentada acima, o erro de apontamento dessa antena não deve exceder aproximadamente $0,02^\circ$.

A NASA indica que as estações da sua rede NSN que operam na banda Ka (25,5 – 27,0 GHz) têm erro de apontamento de $0,01^\circ$ com autorrastreamento e $0,05^\circ$ com rastreamento programado (baseado nos dados de efemérides dos satélites) (NASA, 2023).

Além das principais características do bloco Antena + LNA sumarizadas acima, deve-se ter em mente que esse bloco deve ser instalado em localidades sem obstáculos, naturais ou construídos, que possam bloquear a linha de visada entre a antena e o artefato espacial ao longo da sua passagem pelo céu. As localidades também devem estar livres da interferência dos sinais de rádio oriundos de fontes como, por exemplo, enlaces terrestres de micro-ondas e estações rádio base celular. Na prática, essas condições são atendidas apenas parcialmente.

A implementação do bloco para as bandas de frequências VHF, UHF, L, S, X, Ku, Ka e superiores utiliza, normalmente, antenas tradicionais como Yagi, helicoidais e refletores parabólicos. A implementação nas bandas S e superiores recai mais frequentemente no uso de antenas com refletores parabólicos. O LNA utiliza transistores como elemento ativo, de diferentes tecnologias em função da frequência de operação. Eventualmente, a redução da temperatura de ruído pode requerer o resfriamento do LNA.

A principal evolução tecnológica desse bloco foi a expansão das redes de antenas planares (*phased arrays*), com ou sem controle eletrônico da fase, que podem substituir com vantagens as antenas tradicionais, fixas ou com varredura mecânica, em diversos cenários. Exemplos de substituição vantajosa são o uso das redes planares nos terminais portáteis de usuários de alguns sistemas satelitais e nos sistemas portáteis de acompanhamento de foguetes que requerem alta velocidade do apontamento. Todavia, de maneira geral, as vantagens e

desvantagens das duas tecnologias de antena devem ser analisadas para cada aplicação específica, considerando-se os fatores relevantes para a aplicação.

O bloco Antena + LNA requerido em algumas missões espaciais com características como, por exemplo, alto valor de G/T, operação em bandas de frequência mais altas (X, Ku, Ka e superiores) e baixo erro de apontamento é um elemento do segmento solo com alto custo de aquisição, instalação e manutenção, além do custo de operação. Se a missão envolve artefatos em órbita LEO e MEO e é necessária a sua cobertura contínua ou quase contínua, então o bloco Antena + LNA deve ser espalhado globalmente constituindo uma rede. Obviamente, a exigência de uma rede global agrava significativamente a questão dos custos. Tradicionalmente, governos ou agências nacionais enfrentaram esse desafio assumindo os custos do estabelecimento de uma rede global e a rede *Near Space Network* da NASA (NASA, 2023) é um exemplo dessa solução.

Quando a demanda de cobertura global e contínua/quase contínua deve ser atendida por um curto período de tempo, como no caso da fase LEOP (*Launch and Early Orbit Phase*) das missões espaciais, a solução tradicional adotada é o estabelecimento de acordos internacionais entre governos/agências/empresas de diversos países possibilitando a criação de uma rede global temporária.

O número crescente de missões espaciais com satélites em órbita LEO e MEO requer a cobertura global durante toda a missão, mas a questão do alto custo permanece um desafio ou mesmo um impedimento para a realização da missão.

A nova solução para esse problema é a “estação terrena como serviço” (GSaaS) na qual o bloco Antena + LNA faz parte da infraestrutura de terceiros (organizações governamentais e comerciais) e o custo do uso desse elemento para a missão é calculado com base no tempo de uso da infraestrutura. A rede global dos elementos necessários para a missão específica pode ser contratada de um ou mais fornecedores do serviço GSaaS.

O sinal de saída do bloco Antena + LNA é do tipo analógico de RF e precisa de processamento adicional para que possa ser distribuído em uma rede global, como descrito abaixo.

4.2 Bloco conversor de frequências para baixo

O segundo bloco funcional da Figura 33 é o conversor de frequências para baixo (CFB). O seu papel é gerar o sinal de FI (Frequência Intermediária) com o mesmo espectro passa-faixa do sinal de saída do LNA, mas centrado em frequência mais baixa. Por esse motivo o envio

do sinal de FI para o bloco Receptor por meio de uma linha de transmissão sofre perdas de transmissão menores. A redução de frequência também pode ter o objetivo de viabilizar a interligação do CFB e o Receptor por meio de uma fibra óptica (RF over fiber) o que é uma solução interessante quando a distância entre os dois blocos é relativamente grande e introduziria perdas excessivas no caso do uso de cabo metálico.

Eventualmente o bloco CFB pode estar ausente e o sinal de RF na saída do LNA é enviado diretamente para o bloco Receptor. Este pode ser o caso, por exemplo, de sinais de RF com frequência não muito alta como nas bandas VHF, UHF e L, ou até mesmo banda S se a distância entre o CFB e o receptor for relativamente pequena.

O CFB deve estar localizado fisicamente próximo ao bloco Antena + LNA e é, normalmente, instalado no suporte mecânico da Antena e próximo ao LNA.

A implementação do CFB utiliza tecnologias tradicionais de circuitos de RF e micro-ondas.

Nos serviços de GSaaS de alguns fornecedores o sinal de FI pode ser disponibilizado para os clientes e para isto o sinal analógico de FI é digitalizado passando a ser identificado como “sinal de FI digital”.

Um exemplo de geração do sinal de FI digital é o sistema *SpectralNet* da empresa Kratos que, basicamente, digitaliza o sinal analógico de FI e o coloca em formato de pacotes compatíveis com a transmissão por redes IP (*Internet Protocol*) (KRATOS, 2023). O processo é ilustrado na Figura 34

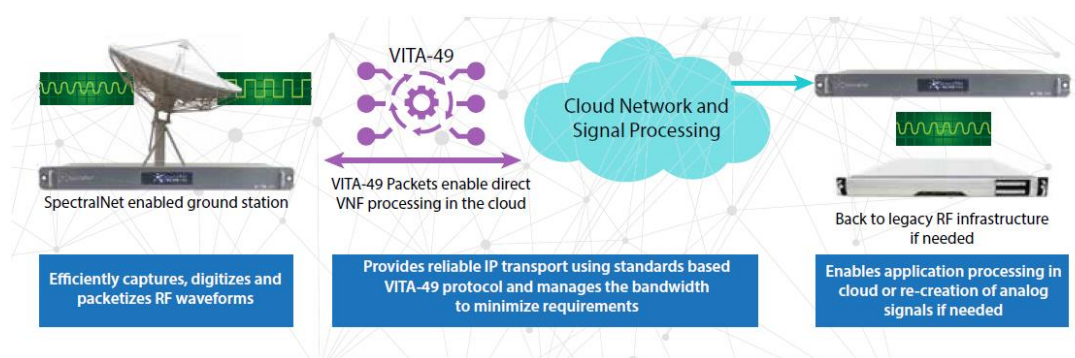


Figura 34 - Geração do sinal de FI digital e transmissão por rede IP.

Fonte: KRATOS (2023).

Inspecionando-se a Figura 34, observa-se no seu lado esquerdo o processo de digitalização e transformação em pacotes do sinal analógico de FI. A parte central da Figura 34 destaca o uso do protocolo VITA-49 (VITA, 2023) que permite a interoperabilidade com os componentes dos sistemas de Rádio Definido por Software de diferentes fornecedores e a transmissão para

a nuvem. O lado direito da Figura 34 mostra que os dados da nuvem podem ser acessados e processados para retornar o sinal ao formato analógico original e processamento posterior pelo cliente. Alternativamente, o sinal FI digital também pode ser processado por ferramentas de software disponibilizadas na nuvem.

O *SpectralNet* requer rede IP com velocidade de 400 – 800 Mbps para a transmissão de um sinal de FI com largura de banda de 40 MHz, isto é, um fator de 10 a 20 vezes a banda de RF capturada.

O serviço de GSaaS da Amazon (AWS, 2023) tem uma estrutura similar à delineada na Figura 34.

4.3 Bloco Receptor

O bloco receptor tem a função de processar o sinal de RF ou FI recebido e recuperar as informações de bordo do artefato espacial, em banda base. O processamento inclui a demodulação do sinal de RF/FI e, no caso das informações digitais, a aplicação dos algoritmos de correção de erros.

As informações de bordo na saída do receptor estão, normalmente, encriptadas para sigilo da informação e são decodificadas somente no destino final.

A implementação do bloco Receptor evoluiu da solução puramente em hardware para a atual solução de Rádio Definido por *Software* (SDR) utilizada mundialmente, inclusive nas estações terrenas brasileiras como as do INPE, Centro de Lançamento da Barreira do Inferno e Centro de Lançamento de Alcântara.

Um exemplo de receptor SDR largamente utilizado nas estações é o *Cortex* da empresa Safran (SAFRAN, 2023)

A Kratos disponibiliza o receptor virtual (i.e., implementado somente em software) “DS-334 *Quantum Radio*” para sinais de banda estreita (< 54 MHz) que pode operar no servidor local do cliente ou na nuvem (KRATOS, 2023). A empresa também disponibiliza o receptor por software *Open Space Quantum RX* para recepção de sinais banda larga (< 500 MHz) que pode operar no servidor local do cliente (KRATOS, 2023).

O uso de receptores SDR nas estações terrenas as torna flexíveis para a recepção de sinais de rádio gerados de acordo com diversos padrões, proprietários das missões ou não. Como exemplo, o uso de sinais modulados conforme a norma DVB-S2 tem aumentado nos serviços

espaciais de exploração da Terra (EESS) e de pesquisa espacial (SRS) e o seu processamento é facilmente realizado pelos receptores SDR do mercado.

O bloco receptor da Figura 33 também pode ser implementado através do serviço GSaaS de alguns fornecedores como a Kratos e a Amazon vistos acima. Os fornecedores de GSaaS podem utilizar receptores próprios, SDR ou virtualizados, para gerar as informações de bordo de interesse dos clientes.

A operação das estações terrenas para a recepção das informações de bordo não foi mencionada no sumário acima. Ela pode ser realizada pela equipe da missão ou utilizar o serviço de fornecedores de segmento solo como serviço. Esse serviço é a ampliação do conceito de “estação terrena como serviço” para incluir todas as operações da infraestrutura do segmento solo necessárias para o rastreamento dos artefatos do segmento espacial e obtenção das informações de bordo. Desta forma, atualmente na literatura, o serviço GSaaS é visto como “segmento solo como serviço” podendo, eventualmente, ficar restrito às funções e serviços das estações terrenas nos casos específicos de alguns fornecedores.

4.4 Cadeia de transmissão

Na Figura 35, é mostrado um diagrama de blocos funcionais simplificado da cadeia de transmissão das estações terrenas e na Tabela 7 estão listadas as principais características desses blocos.

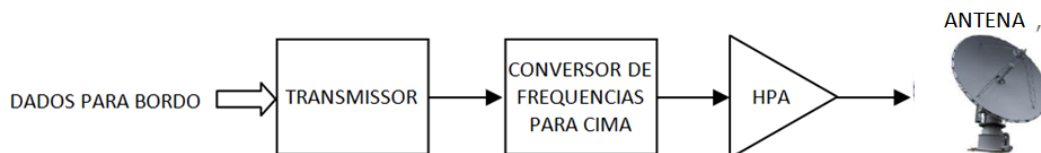


Figura 35 - Diagrama de blocos funcionais simplificado da cadeia de recepção das ETs.
Fonte: CGEE (2023).

Tabela 7 - Principais características da cadeia de transmissão das ETs.

CARACTERÍSTICA	Antena + HPA	Conversor de Frequências para Cima (CFC)	Transmissor
Frequência de transmissão	X		
EIRP	X		
Diagrama de irradiação e lóbulos secundários	X		

CARACTERÍSTICA	Antena + HPA	Conversor de Frequências para Cima (CFC)	Transmissor
Polarização	X		
Velocidade e aceleração angular em azimute e elevação	X		
Erro de apontamento	X		
Frequência de FI		X	X
Largura de banda de FI		X	X
Tipo de modulação			X
Taxa de dados da informação			X

Fonte: CGEE (2023).

Comparando-se as figuras anteriores verifica-se que a cadeia de transmissão realiza o processamento inverso do sinal de radiofrequência recebido do segmento espacial. Dessa forma, boa parte da discussão de desempenho e características dos blocos e alguns dos seus elementos feita para a cadeia de recepção também se aplica à cadeia de transmissão.

A principal distinção a ser feita nesta abordagem sumária refere-se à figura de mérito da estação terrena transmissora que é a EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*), associada ao bloco Antena + HPA da Figura 35.

A EIRP é o resultado do produto do ganho da antena transmissora e a potência de saída do amplificador de potência (HPA) e indica a potência efetiva do sinal de radiofrequência que a estação é capaz de enviar em uma direção particular.

Há missões espaciais cujos artefatos requerem que os sinais do solo sejam transmitidos com alta potência para que sejam recebidos a bordo com a relação sinal/ruído necessária. A estação terrena atende essa demanda realizando o valor de EIRP requerido por meio da combinação do ganho da antena e da potência de saída do HPA que for mais adequada. Na abordagem mais frequente, procura-se aumentar o ganho da antena e reduzir a potência do HPA objetivando maior confiabilidade, redução do volume e melhoria da eficiência de energia deste equipamento. De qualquer forma, há limites práticos e tecnológicos tanto para o ganho das antenas como para a potência dos HPAs e eventualmente determinados valores de EIRP não serão exequíveis.

Alguns exemplos de cadeias transmissoras e suas características são apresentadas a seguir.

A estação SatLab citada anteriormente (SATLAB, 2023) possui antena de 2,4 m de diâmetro e circuitos de transmissão que resultam na EIRP de 36 dBW na banda S.

A estação ISISPACE (ISISPACE, 2023) tem cadeia transmissora somente nas bandas VHF e UHF. A EIRP, ganho da antena e potência do HPA em VHF são, respectivamente, 32,3 dBW, 12,3 dBi e 100 W (20°dBW). Na banda de UHF, essas mesmas grandezas têm os valores de, respectivamente, 36,3 dBW, 15,5 dBi e 120 W (20,8 dBW).

As estações da rede NSN da NASA têm EIRP na faixa 51 dBW a 81 dBW na banda S (NASA, 2023).

A antena CB02 da Estação Terrena de Cuiabá do INPE tem diâmetro de 11,28 m, ganho de 41,5 dBi e EIRP de 62 dBW na banda S.

As cadeias de recepção e de transmissão mostradas nas Figuras 33 e 35 utilizam, normalmente, a mesma antena. Um dispositivo de RF permite conectar ambas as cadeias no terminal comum da antena e minimizar a interferência entre ambas. Observe-se que as frequências utilizadas para a recepção e transmissão dos sinais são diferentes, conforme as regulamentações da ITU e da ANATEL.

A implementação dos blocos da Figura 33 utiliza as mesmas tecnologias dos blocos correspondentes na Figura 35, com exceção de alguns HPA de potência muito alta que utilizam tecnologia de válvulas de RF/micro-ondas.

Também são aplicáveis as mesmas soluções de GSaaS vistas para a cadeia de recepção.

5. TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS DO SEGMENTO SOLO

Os avanços tecnológicos que vêm ocorrendo no segmento solo dos sistemas espaciais têm várias motivações, dentre as quais a busca de soluções para as novas demandas do segmento, algumas delas destacadas na Seção 4. Questões como o alto custo das estações terrenas e a necessidade do aumento da sua quantidade e distribuição têm impulsionado o desenvolvimento da solução abordada na Seção 5.1 que disponibiliza esses equipamentos na forma de serviços em oposição à abordagem tradicional da sua aquisição.

A demanda por maior largura de banda nas comunicações do segmento solo com o segmento espacial está sendo incrementalmente atendida com o emprego de frequências de rádio cada vez mais altas o que requer avanços tecnológicos nos componentes dos segmentos espacial e solo. Todavia, também se desenvolve a substituição dos sinais de rádio por sinais ópticos o que provocará um salto na ordem de grandeza das larguras de banda realizáveis, como apresentado na Seção 5.3.

A Northern Sky Research (2020) entende que é preciso um esforço na direção da completa virtualização da rede terrestre por ser o desenvolvimento capaz de prover o segmento solo com a capacidade, flexibilidade e custos necessários para atender as novas demandas do segmento espacial. A virtualização do segmento solo e os desenvolvimentos em curso são abordados na Seção 5.2.

5.1 Segmento solo e estação terrena como um serviço

Nesta seção é enfatizada a primeira parte da definição do serviço, isto é, que a estação terrena não é um ativo da missão espacial, não sendo relevante, no primeiro momento, o tipo da tecnologia empregada na estação. A definição do GSaaS resulta, portanto, bastante ampla comportando estações simples e complexas do ponto de vista da sua construção/implementação e estações com tecnologia mais antiga ou no estado da arte.

Mesmo com essa visão mais simples do serviço, o GSaaS pode atender três demandas importantes do segmento solo da missão: a) redução dos custos das estações (neste caso de aquisição, instalação e manutenção); b) aumento da capacidade de comunicação de uma estação em uma localização geográfica específica; c) aumento da distribuição geográfica das estações terrenas (chegando, eventualmente, a uma rede global).

Se a tecnologia das estações do fornecedor do serviço GSaaS incluir ferramentas que facilitem a atuação do operador, incluindo eventualmente a automatização de algumas das suas tarefas, haverá também uma redução do custo operacional.

A descrição sumária do funcionamento do serviço GSaaS é a seguinte: o fornecedor do serviço possui uma ou mais estações terrenas localizadas em diversas localizações geográficas cujos diagramas de blocos funcionais simplificados para as cadeias de recepção e transmissão são aqueles apresentados nas Figuras 33 e 35. Os dados (digitais) recebidos pela estação durante a passagem do artefato espacial pelo seu campo de visada são encaminhados para o Centro de Controle da Missão (CCM) por meio da rede de comunicações terrestres da missão. No outro sentido do fluxo de informações, os dados oriundos do CCM são enviados para a estação terrena por meio da rede de comunicações e então transmitidos para o artefato espacial. O provedor do serviço normalmente disponibiliza uma interface Web na qual o operador do CCM pode realizar tarefas como, por exemplo, verificar as janelas de disponibilidade das estações terrenas e programar o rastreamento do satélite na passagem pelas estações. As características da rede terrestre devem ser compatíveis com a latência e volume de dados requeridos nas comunicações da missão.

O uso da estação terrena está ligado à execução de apenas duas das quatro categorias de serviços que devem ser realizados pelo segmento solo. Os outros serviços necessitam, além do pessoal, de ferramentas de simulação, planejamento, interfaceamento com os usuários etc.

Alguns fornecedores como, por exemplo, a NASA (2023, p. 271), oferecem toda a gama de serviços do segmento solo por meio de segmento solo como serviço.

Para simplificação e unificação da terminologia, a sigla GSaaS (definida na página 46) é utilizada como indicativa do serviço *Ground Segment as a Service*, mais amplo, deixando para a sua descrição a discriminação e o detalhamento dos serviços efetivamente ofertados. Essa abordagem está alinhada com a bibliografia referenciada no trabalho.

O serviço GSaaS pode ser visto mais como uma inovação do “modelo de negócio” do segmento solo do que uma inovação tecnológica, embora a ampla exploração dos benefícios e das potencialidades do “modelo” requeira, efetivamente, inovações tecnológicas, algumas das quais são apresentadas na Seção 5.2.

Na Figura 37, é ilustrado o serviço de GSaaS do GAUSS (GAUSS, 2023). A estação, tecnologicamente simples, localizada em Roma, opera com enlaces de subida e descida (T&C) nas bandas VHF e UHF e com enlace de descida (Dados ou Dados+TM) na banda S.

Utiliza receptores e transmissores convencionais ou na tecnologia SDR e TNC (*Terminal Node Controller*). A comunicação dos usuários com a estação é feita por meio de TCP/IP.

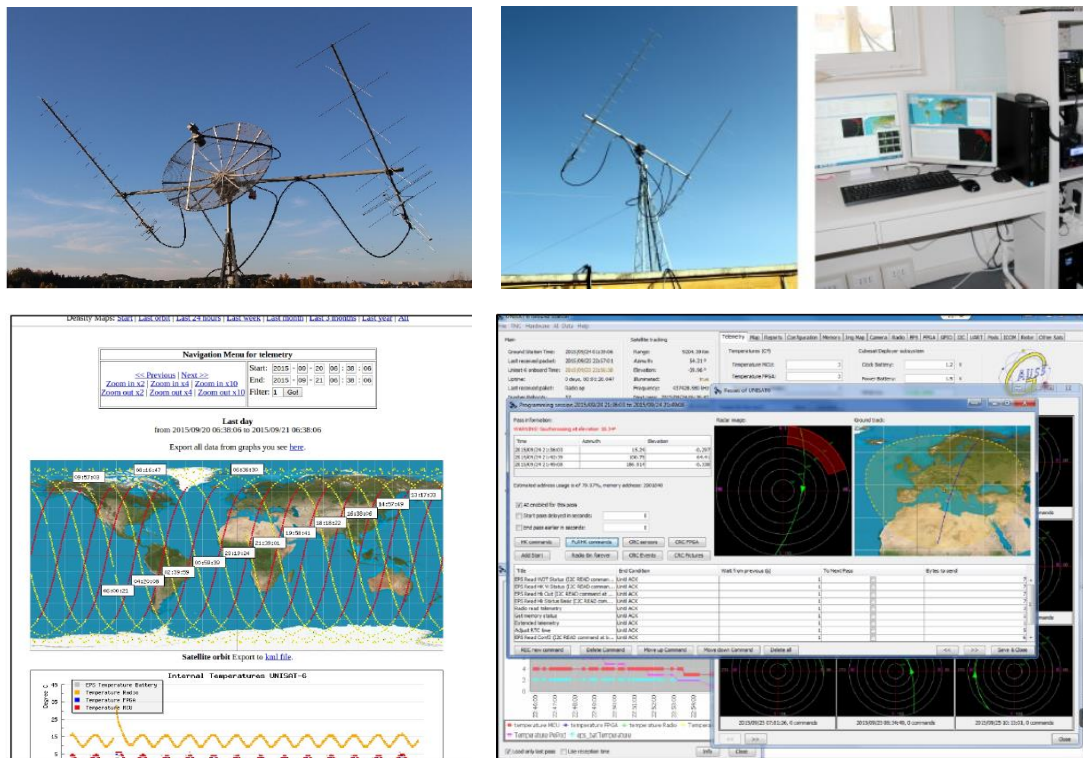


Figura 36 - Ilustração do Serviço de GSaaS do GAUSS.

Fonte: <https://www.gaussteam.com/services/ground-station>

Deve-se observar que há muitos anos as atividades do segmento solo de diversas missões espaciais têm sido terceirizadas para empresas especializadas como a SSC (*Swedish Space Corporation*) e a KSAT (*Kongsberg Satellite Services*). Os serviços fornecidos por essas empresas são amplos, de alta garantia, mas em contrapartida exigem contratos de vários anos e o seu custo é alto.

Com o passar do tempo, e especialmente com o surgimento do *New Space*, as missões tornaram-se mais curtas, o tempo de desenvolvimento dos artefatos espaciais reduziu-se drasticamente e o orçamento dedicado ao segmento solo tornou-se muito menor (UPPAL, 2023).

O serviço GSaaS se distingue das terceirizações iniciais por oferecer maior flexibilidade, economia e simplicidade (UPPAL, 2023).

A crescente quantidade e variedade de artefatos espaciais requer maior flexibilidade do segmento solo em termos de bandas de frequência, localização, processamento, dimensões das antenas, modelo de negócio e dados (UPPAL, 2023) como apontado na Seção 4.

Conforme UPPAL (2023), “as interfaces e APIs (*Application Programming Interface*) são projetadas para facilitar o uso do serviço por diversos tipos de operadores como universidades, público em geral e empresas”.

As vantagens econômicas do serviço decorrem do fato que:

o GSaaS permite que os operadores de satélite mudem o seu CAPEX [despesa de capital] para OPEX [despesa operacional], permitindo-lhes não investir antecipadamente num segmento solo totalmente dedicado. Em vez disso, eles podem escolher o esquema de pagamento que melhor atende às suas necessidades, optando por “pague conforme usar” ou “assinatura em base mensal/anual” (UPPAL, 2023).

Em julho de 2020, a empresa AWS cobrava USD 3 – USD 10 por minuto o serviço GSaaS para sinais de banda estreita (< 54 MHz) e USD 10 – USD 25 por minuto o serviço para sinais de banda larga (> 54 MHz). Em dezembro de 2019 a empresa *RBC Signals* lançou um serviço para enlace de descida em banda X que custava USD 19,95 por passagem do satélite com uso mínimo mensal equivalente a USD 595 (UPPAL, 2023).

A empresa de consultoria NSR estimou que o mercado global do segmento solo terá um faturamento acumulado até 2028 de USD 145 bilhões e que seu faturamento anual até este ano será da ordem de USD 14,4 bilhões (UPPAL, 2023).

Estima-se que o mercado global de GSaaS atinja o pico do seu faturamento anual de USD 250 milhões em 2026 e depois caia para o valor de USD 200 milhões em torno de 2030 (UPPAL, 2023).

Há diversos tipos de fornecedores do serviço GSaaS. Alguns, por exemplo, são empresas tradicionais no mercado do segmento solo como a SSC e a KSAT citadas anteriormente, outros são empresas recém-criadas como a Leaf Space e a Atlas Space Operations e outros são originários do mercado de TI (Tecnologia da Informação) como a AWS e a Azure Orbital.

A Tabela Ap.A-1 apresenta uma lista de fornecedores do serviço GSaaS. A lista é uma versão atualizada da apresentada anteriormente no Apêndice B.

O mercado atual dos serviços GSaaS é dominado pelas empresas gigantes digitais Amazon, Microsoft e Tencent que exploram sua enorme capacidade de processamento e armazenamento para integrarem toda a infraestrutura do segmento solo na nuvem (UPPAL,

2023). É interessante pontuar que essas empresas empregam a infraestrutura física (antenas, RF *front end* e *back end*) própria, de terceiros (parceiros) ou da combinação dessas origens para receber os sinais de RF dos artefatos espaciais nos enlaces de descida e enviar os sinais de RF para os artefatos espaciais por meio dos enlaces de subida.

A relevância do serviço GSaaS para a fase atual de desenvolvimento dos sistemas espaciais é realçada na seguinte afirmação:

GSaaS is part of a broader trend of digitalization of space systems, growing from its origins in the space segment to now include the ground segment. In addition, the cloud ground station business may be considered a representative case of another trend in which there is an increasing demand for space-based data, as space systems become mere tools at the service of the Big Data market (UPPAL, 2023).

Apesar da simplicidade dos fundamentos do GSaaS, o serviço se encontra em franca evolução das tecnologias envolvidas e hoje se apresenta no mercado com diversas nuances. Algumas referências adicionais abordando esses aspectos, além dos websites dos fornecedores do Apêndice A, são (CARCAILLON, BANCQUART, 2020), (CURTIS, 2023), (HIDALGO, 2023).

5.2 Virtualização do segmento solo

Esta introdução da seção resume a visão da NSR (Northern Sky Research, 2020) sobre a necessidade e benefícios da virtualização do segmento solo das missões espaciais. O processo de virtualização já está em curso há alguns anos, mas a virtude da referência para este trabalho é a sua abordagem sistêmica do tema e a proposta de um modelo que serve de base para a compreensão das principais tecnologias que devem ser envolvidas e a extensão dos benefícios que podem ser potencialmente alcançados com esse processo.

As seções anteriores apresentaram o segmento solo de forma relativamente extensa. Para a discussão do tema, é suficiente dizer que a virtualização do segmento pode ser definida como a substituição dos processamentos em *hardware* ou em *hardware + software* por processos puramente em software. Certamente, algumas substituições não podem ser realizadas e os processos físicos precisam ser mantidos como se verá mais à frente.

Segundo a NSR a indústria de satélites está no meio de uma transformação que pode ser considerada a maior desde o início da era espacial, há cinquenta anos, e ser chamada de “corrida espacial do século 21”. As inovações que deram origem a essa onda de transformação começaram há alguns anos com a proliferação global das arquiteturas dos satélites de alta

capacidade (HTS – *High Throughput Satellites*) destinados a diversas aplicações. Em seguida vieram o aumento da densidade dos satélites de pequeno porte focados nas suas missões, arquiteturas de rede multi-órbitas e multi-bandas, cargas úteis de satélites definidas por software, propulsão elétrica e outras tecnologias que ajudam a compor o cenário de mudanças.

As inovações do segmento espacial encontraram avanços simultâneos também no segmento lançamento com os foguetes reutilizáveis, cargas úteis mais pesadas e o crescente número de satélites por lançamento.

A acelerada confluência de inovações tecnológicas e de aceitação do risco do segmento espacial contrasta claramente com os desenvolvimentos constantes, mas conservadores do segmento solo. Os sistemas de solo melhoraram consistentemente, com os avanços tecnológicos focados em alguns nichos motivados, frequentemente, pela necessidade de se obter melhorias de desempenho em *hardware* dedicados e *hardware* proprietários desenvolvidos para aplicações específicas. Exemplos dessas melhorias são os avanços sucessivos na área de modulação e codificação dos sinais dos satélites e o emprego do IP (*Internet Protocol*) como meio padrão de transporte em várias aplicações o que abriu oportunidades de servir nichos do mercado e de interfacear com os usuários em uma variedade de formas (principalmente nos serviços fixos de comunicação via satélite).

Contudo, segundo a NSR, face ao extensivo conjunto de inovações no segmento espacial, os desenvolvimentos do segmento solo focados no desempenho são necessários, mas não suficientes para lidar com os desafios e oportunidades previstos na intersecção vindoura entre os ativos espaciais e as comunicações 5G, empreendimentos, dados de observação da Terra e redes governamentais. A NSR acredita que a complexidade da rede de satélites atualmente em construção irá requerer esforços acelerados na direção da virtualização total do segmento solo.

A necessidade de mover-se rapidamente na direção de uma rede de solo virtualizada escalável e flexível é clara porque a rede de solo tradicional logo irá atingir a barreira de escalabilidade e flexibilidade e travar a indústria limitando o retorno das inovações espaciais.

A NSR identificou os seguintes desenvolvimentos tecnológicos como fatores chave para a virtualização das redes de solo:

- ***Virtual Network Functions*** (VNF): funções executadas no domínio analógico ou em *hardware* proprietário deverão ser virtualizadas para reduzir os custos do *hardware* e aumentar a flexibilidade;

- **Infrastructure as a Service (IaaS):** IaaS é fundamental para o futuro dos serviços gerenciados e para a integração com as telecomunicações (o IaaS é um modelo no qual uma terceira parte, atuando como fornecedor, hospeda e mantém a infraestrutura central, incluindo *hardware*, *software*, servidores, armazenamento em benefício dos usuários. Também inclui tipicamente a hospedagem de aplicações em um ambiente altamente escalável no qual os usuários pagam somente pela infraestrutura que eles usam);
- **Cloud platforms:** a adoção da computação em nuvem tornou-se rapidamente uma força motriz importante para os negócios na medida em que os aplicativos são movidos para fora dos centros de dados locais em uma tentativa de inovar, cortar custos e aumentar a agilidade;
- **Electronically Steered Antennas (ESA):** enquanto o uso de parabólicas permanecerá vital na infraestrutura dos teleportos e *gateways*, o desenvolvimento de novas ESA com preço e desempenho apropriados será chave para destravar o potencial completo das constelações não-geoestacionárias e acelerar a adoção nos mercados de mobilidade;
- **Digitalização da cadeia de RF:** a digitalização da conexão da antena com o *hardware* do teleporto (fluxo do sinal de FI) trará flexibilidade e redução de custo para a camada física ao desacoplar as funções tradicionais de amplificação e conversão da cadeia de RF do local real onde os sinais são processados digitalmente;
- **Soluções para a Integrated Enterprise:** 77% dos empreendimentos têm pelo menos uma aplicação ou uma parte da sua infraestrutura de computação na nuvem. Desta forma, interoperabilidade na nuvem com a tecnologia de satélites é fundamental;
- **Normas industriais:** a adoção de normas abertas é fundamental para a transição da indústria de nichos para convencional;
- **Análise de big data:** a capacidade de extrair *insights* de grandes quantidades de informações digitalizadas, transportadas através da rede, fornecerá plataformas com uma vantagem informacional para a evolução natural.

A NSR propôs a estrutura de alto nível da Figura 38 para desenvolver a infraestrutura de um segmento solo completamente virtual.

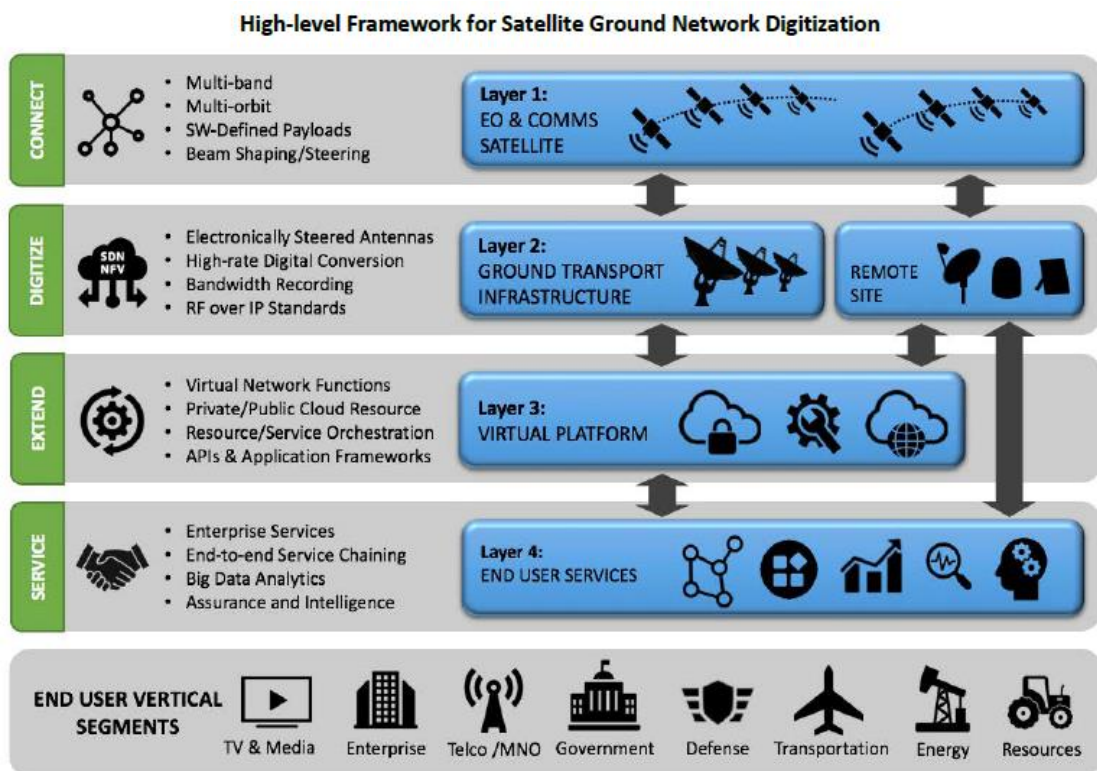


Figura 37 - Estrutura de alto nível para a digitalização do segmento solo.

Fonte: Northern Sky Research (2020).

As camadas da estrutura são:

- 1) **CONNECT**: envolve o uso primário de satélites para conectar dois ou mais pontos na Terra, no caso de satélites de comunicação, ou para passar alguma informação valiosa no caso de satélites de observação da Terra ou com missões do tipo satélite-Terra;
- 2) **DIGITIZE**: a NSR acredita na diretriz de digitalizar o sinal o mais “cedo” possível, isto é, o mais próximo possível da antena. A camada também envolve o transporte da informação de banda base no formato IP por meio de redes chaveadas ou roteadas;
- 3) **EXTEND**: as funções chave dessa camada são:
 - a) **Computação e armazenamento**: esses recursos são a infraestrutura subjacente ao segmento solo digital. A capacidade desta infraestrutura é importante para a implementação das VNF’s;
 - b) **Gerenciamento da rede e orquestração dos ativos**: plataforma abrangente para orquestração e automação das funções físicas e virtuais da rede, em tempo

real, permitindo a alocação dinâmica de recursos do conjunto de ativos tanto no segmento espacial como no segmento solo;

- c) **Nuvem pública e privada:** as redes digitais de solo podem estabelecer ambientes privados de nuvem para estender as capacidades e se conectar com serviços e funções disponíveis nos principais ambientes de nuvem públicos;
 - d) **API's, ferramentas de desenvolvimento e *plug-ins*:** a extensão das capacidades do segmento solo digital requer a habilidade de expor funções para integração com terceiros por meio de interfaces de *software* bem definidas;
 - e) **Estrutura de desenvolvimento:** o novo ambiente é mais aberto e cooperativo e capaz de atender a diversas necessidades e usos. É interessante, portanto, que sejam disponibilizados novos meios para a personalização dos serviços no nível da rede.
- 4) **SERVICE:** esta camada representa o *front end* para parceiros e usuários interagirem e aproveitar a plataforma digital terrestre.

Na Figura 39, são ilustrados, comparativamente, os segmentos solo convencional e virtualizado conforme as diretrizes da estrutura da Figura 38.

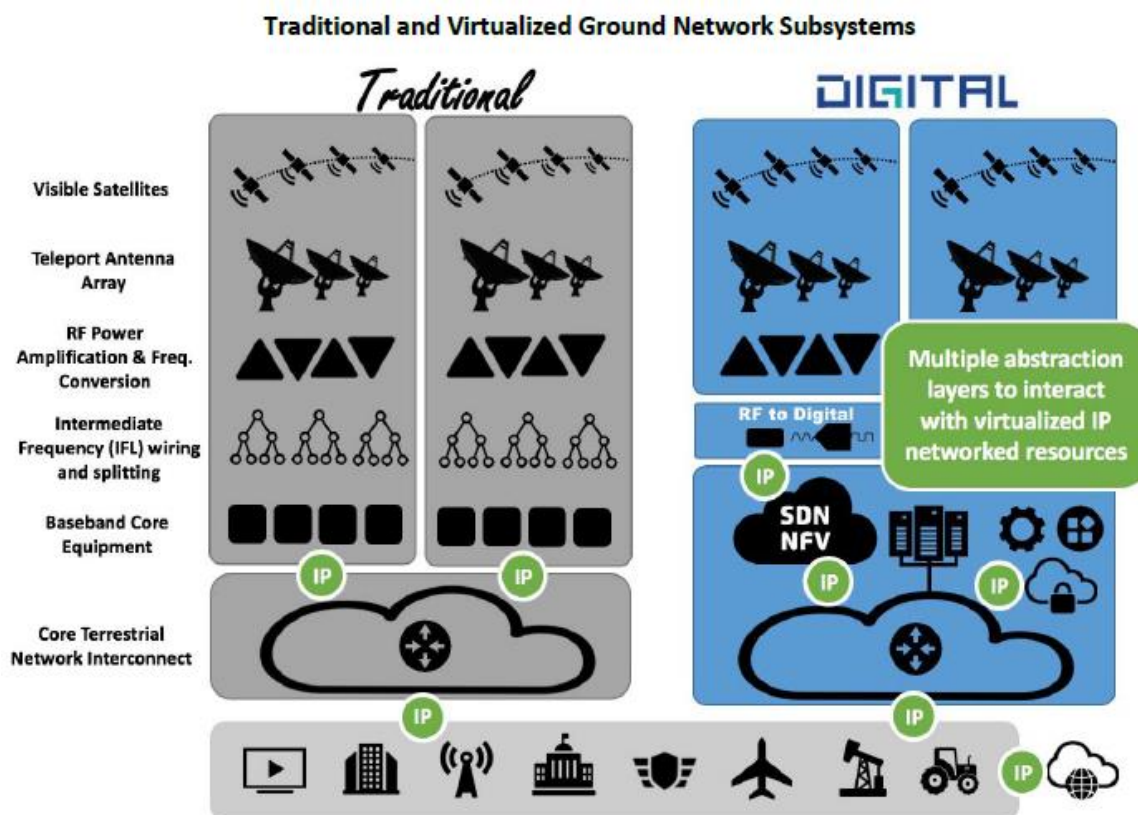


Figura 38 - Segmentos solo convencional e virtualizado.

Fonte: Northern Sky Research (2020).

Pode-se observar que a estação simples do GAUSS ofertada como serviço GSaaS se encaixa perfeitamente na estrutura do segmento solo convencional da Figura 39.

A NSR lista diversas soluções de segmento solo virtualizado já existentes e em desenvolvimento (Figura 40).

Sample List of Existing and In-Development Virtualized Solutions
<ul style="list-style-type: none">• Atlas Space Operations' The Freedom Ground Network with software-centric and cloud-based approach• AWS ground station-as-a-service• Bridgecomm: Developing a network of optical ground stations• Intelsat & SES "Azure Express Route" partnerships with Microsoft• Kongsberg Satellite Services (KSAT) K-lite solution for small-sat players• Kratos' Dynamic Digital Ground Solution• RBC Signals & Infostellar: Ground station aggregators. Cloud-based solution for optimizing ground segment asset utilization and virtualization (especially for EO)

Figura 39 - Exemplos de redes terrestres virtualizadas existentes e em desenvolvimento.

Fonte: Northern Sky Research (2020).

As próximas seções apresentam sumariamente exemplos de soluções de segmento solo virtualizado e de equipamentos e ferramentas para a virtualização.

5.3 AWS Ground Station

O serviço de GSaaS da AWS (AWS, 2023) é um exemplo de utilização de estações terrenas tecnologicamente mais complexas, em oposição à estação terrena simples do GAUSS visto acima, e também um exemplo de segmento solo virtualizado.

Esse serviço foi visto anteriormente, mas é trazido novamente para reanalísá-lo sob a óptica da virtualização do segmento solo.

Pode-se observar que a estrutura do segmento solo oferecida pela AWS se encaixa perfeitamente na estrutura do segmento virtualizado da Figura 39. Podem ser notadas algumas funções virtuais como, por exemplo, a *software radio data recovery*, correspondente ao receptor (e transmissor) da estação convencional, e o bloco de digitalização do sinal de FI, fundamental para a solução virtualizada do segmento. Também podem ser observadas

algumas ferramentas associadas à camada SERVICE da estrutura da Figura 38 como, por exemplo, as *analytics* e *machine learning*. Na Figura 21, estão descritas as grandes funções do serviço da AWS.

As características de RF da estação são:

- Enlace de subida na banda S: 2.025 – 2.120 MHz;
- Enlace de descida na banda S: 2.200 – 2.300 MHz, G/T: 16 dB/K;
- Enlace de descida na banda X: 7.750 – 8.400 MHz, G/T: 30,5 dB/K.

A estação executa a função TT&C na banda S, rastreia satélites em órbitas LEO e MEO e possui antenas com cobertura global.

5.3.1 Soluções tecnológicas da Kratos

A empresa Kratos desenvolve uma família de produtos denominada *OpenSpace* que implementa algumas das tecnologias necessárias para a virtualização do segmento solo.

Uma das tecnologias é a digitalização do sinal de FI da estação terrena, como ilustrado na Figura 35. Basicamente o equipamento (*SpectralNet*) digitaliza o sinal analógico de FI e o coloca em formato de pacotes compatíveis com a transmissão por redes IP (*Internet Protocol*) (KRATOS, 2023).

Inspecionando-se a Figura 35, observa-se no seu lado esquerdo o processo de digitalização do sinal analógico de FI. A parte central da figura destaca o uso do protocolo VITA-49 (VITA, 2023) que permite a interoperabilidade com os componentes dos sistemas de rádio definido por *software* de diferentes fornecedores e a transmissão para a nuvem. O lado direito da figura mostra que os dados da nuvem podem ser acessados e processados para retornar o sinal ao formato analógico original e processamento posterior pelo cliente. Alternativamente, o sinal FI digital também pode ser processado por ferramentas de *software* disponibilizadas na nuvem.

O *SpectralNet* requer rede IP com velocidade de 400 – 800 Mbps para a transmissão de um sinal de FI com largura de banda de 40 MHz, isto é, um fator de 10 a 20 vezes a banda de RF/FI capturada.

A Kratos oferece versões do *SpectralNet* para banda estreita (< 54 MHz) e banda larga (< 500 MHz).

Os produtos *OpenSpace* quantum são VNF's individuais que substituem o hardware tradicional. O produto *OpenSpace quantumRX* é um receptor virtual de banda larga (<500 MHz).

A Kratos oferece outros VNF's para a transmissão (TX) e gravação de dados (DRA).

5.3.2 Soluções tecnológicas da Safran

De maneira similar à empresa Kratos, a empresa Safran possui uma família de produtos para a virtualização do segmento solo denominada NuRon (SAFRAN, 2023a).

Como um exemplo dos produtos da família há o Cortex NuRon que é um modem (transmissor/receptor) virtual com a mesma função de processamento de RF do Cortex HDR, em tecnologia SDR.

A empresa precisa ser consultada para acesso mais completo às informações da família NuRon.

5.4 Estações terrenas ópticas

Os sistemas de comunicação de interesse nessa aplicação são os sistemas ópticos no espaço livre ou, do Inglês, *Free Space Optical* (FSO), distinguindo-se dos sistemas de transmissão por fibras ópticas.

Da mesma forma que em um sistema de RF, o sinal óptico é modulado pela informação e enviado através do espaço ou da atmosfera. A atmosfera é opaca para determinadas faixas de frequência dos sinais ópticos e de RF, o que requer que se utilizem as janelas de visibilidade. No caso óptico, há janelas na região da luz visível e do infravermelho próximo. A luz visível é raramente usada devido ao problema de segurança dos olhos das pessoas próximas aos terminais ópticos. Dois comprimentos de onda na janela do infravermelho próximo utilizados 1.064 nm ou 1.550 nm.

O uso de frequências mais altas permite larguras de banda maiores, mas os comprimentos de onda mais curtos resultam em feixes mais estreitos que requerem apontamento.

Em um sistema de comunicação óptica para o segmento espacial, o transmissor óptico seria embarcado no artefato e a estação terrena de dados seria o receptor óptico, de forma que maior volume de dados pudesse ser enviado para o solo.

O receptor possui uma abertura que consiste em uma superfície espelhada com qualidade óptica para focar a energia óptica recebida em um dispositivo receptor. A abertura tem que

ser protegida do mal tempo e o receptor deve ser instalado em uma região com ambiente favorável (livre de poeira, nevoeiro etc.).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no sistema de normas da *European Cooperation for Space Standardization* foi apresentada uma descrição da composição dos sistemas espaciais, que é o componente de nível lógico mais alto das missões espaciais.

Com essa decomposição foi possível analisar o componente “sistema de estações terrenas” com detalhamento suficiente para permitir o início de uma avaliação desse item da infraestrutura do setor espacial nacional para novas missões.

Embora as informações apresentadas tenham sido apenas introdutórias, destaca-se a percepção que as estações terrenas disponíveis para novas missões são essencialmente aquelas pertencentes ao governo federal (INPE), uma vez que as demais estações listadas são para missões de baixo custo que utilizam nanossatélites.

É claro, por outro lado, que somente uma análise comparativa dos requisitos de desempenho necessários para as novas missões e as especificações das estações atualmente disponíveis mostrará a adequação, ou não, dessa infraestrutura para as novas aplicações.

De um modo geral, estações terrenas sempre estiveram associadas a altos custos de implementação, manutenção e operação. E dificilmente atendiam muitas missões espaciais simultaneamente. No entanto, dada a atual era de acesso facilitado ao espaço, principalmente com a introdução dos chamados *lean satellites*, a demanda por estações terrenas aumentou substancialmente. A redução dos custos de construção desses artefatos espaciais, principalmente dos CubeSats, gerou uma demanda natural por meios de solo com custos também reduzidos, em comparação com os sistemas tradicionais. Para integrar os novos sistemas espaciais de baixo custo, as estações terrenas devem, além do baixo custo, também atender a novas demandas, tais como maior distribuição geográfica, operação com satélites em órbita baixa, maior automação das suas operações, entre outras.

Como visto neste documento, uma tendência tecnológica dos transmissores de dados dos satélites de pequeno e médio porte e dos *CubeSats* é o uso da norma DVB-S2. O avanço do processamento digital permitiu embarcar em satélites dessas categorias equipamentos com a tecnologia de SDR capazes de realizar o processamento de sinais requerido para a implementação da norma DVB-S2. Uma das vantagens da aplicação dessa norma é a otimização da taxa de transmissão de dados. Outra vantagem é a otimização da capacidade de transferência de dados dos satélites em órbitas baixas, como é o caso de grande parcela dos artefatos lançados atualmente, durante a sua passagem pelas estações terrenas. Ao ser

adotada a compatibilidade com a DVB-S2, as estações terrenas são beneficiadas com a redução do custo dos seus receptores decorrente do uso dessa norma no mercado de massa de comunicação digital por satélites.

Por outro lado, algumas das demandas oriundas das novas missões espaciais como, por exemplo, uso de redes globais de estações de recepção de dados e, principalmente, redução de custos, podem ser atendidas por meio da abordagem “estações terrenas como um serviço” (GSaaS), na qual organizações rastreiam os satélites de seus clientes, recebem os dados de bordo desses satélites e enviam para eles os comandos dos clientes. Os clientes pagam pelo serviço com base no tempo de uso da infraestrutura.

Diversos fornecedores de GSaaS possuem estações terrenas com tecnologias muito diferentes das estações tradicionais incluindo, entre outros itens, o extenso uso da tecnologia SDR e do processamento digital de sinais em banda base. Essa abordagem pode ser interessante para aplicações nacionais.

Há duas categorias da infraestrutura de segmento solo nacional: a) as estações do INPE de Cuiabá e Alcântara e o Centro de Controle de Satélites em São José dos Campos; b) as estações desenvolvidas para os nanossatélites e pertencentes a várias instituições.

Acredita-se que o melhor uso da capacidade ociosa dessa infraestrutura seja disponibilizá-la para o público especializado (empresas do setor espacial, institutos de pesquisa, universidades, mercado internacional etc.) sob condições legais apropriadas, na forma do serviço *Ground Station as a Service*, a exemplo do serviço GSaaS do grupo GAUSS.

Note-se que essa aplicação não requer necessariamente atualizações tecnológicas nas estações, mas o desenvolvimento de uma interface Web adequada para o gerenciamento do acesso às estações e execução das atividades de planejamento e controle por parte dos usuários.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. **Operação Astrolábio: saiba mais sobre o lançamento experimental do foguete HANBIT-TLV.** Disponível em: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/assuntos/noticias/operacao-astrolabio-saiba-mais-sobre-o-lancamento-experimental-do-foguete-hanbit-tvl>. Acessado em 18/09/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Satélite.** Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/satelite/regulamentacao>. Acessado em: 02/10/2023.

_____. **Serviço Móvel Global por Satélite - SMGS.** Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/satelite/servico-movel-global-por-satelite-smgs>. Acessado em: 02/10/2023a.

_____. **Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil.** Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2023/1834-resolucao-759>. Acessado em 02/10/2023b.

AWS. **AWS Ground Station.** Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/ground-station/>. Acessado em: 04/06/2023.

_____. **Recursos do Ground Station.** Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/ground-station/features/>. Acessado em: 04/06/2023a.

_____. **AWS Ground Station Locations.** Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/ground-station/locations/>. Acessado em: 04/06/2023b.

ARAÚJO, Rodolfo A.S. **Uma nova estratégia combinando técnicas de rádio cognitivo e demodulação e codificação adaptativa para mitigar interferências no enlace de descida de serviços de exploração da Terra por satélites de órbita baixa.** 2023. 183 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

BASSETO, Murilo. **Força Aérea Brasileira lançou 10 foguetes SBAT-70 no Centro de Lançamento da Barreira do Inferno.** In: AEROIN. 5/08/2023. Disponível em: <https://aeroin.net/forca-aerea-brasileira-lancou-10-foguetes-sbat-70-no-centro-de-lancamento-da-barreira-do-inferno/>. Acessado em 18/09/2023.

CARCAILLON, Elisa, BANCQUART, Berylia. **Market perspectives of Ground Segment as a Service (GSaaS)**. In: International Astronautical Congress (IAC), 71. The Cyber Edition 2020 (IAC-20, B6, 1, 5, x60462), October, 2020. Disponível em: <https://www.pwc.fr/en/industrie/secteur-spatial/pwc-space-team-public-reports-andarticles/market-perspectives-of-ground-segment-as-a-service.html>. Acessado em: 23/09/2023.

CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **CubeSats**. Brasília, DF: 2018. 46 p.

CENTRO DE REFERÊNCIA EM SISTEMAS EMBARCADOS E AEROESPACIAIS. **RIBRAS**. Disponível em: <https://crseaiff.wixsite.com/site/ribras>. Acessado em: 04/10/2023.

CHINA-BRAZIL EARTH RESOURCES SATELLITE. **Controle**: CBERS-1, 2, 2B, 3, 4 e 04A. Disponível em: <http://www.cbears.inpe.br/sobre/controle.php>. Acessado em: 04/10/2023.

COSMIC MICROWAVE TECHNOLOGY. **CITLF4 – Cryogenic SiGe Low Noise Amplifier**. Technical Data Sheet, Rev. 06/01/2023. Disponível em: https://www.cosmicmicrowavetechnology.com/_files/ugd/aaf7b4_a9c1aa7eae5742f4abd939c4d8d7cf85.pdf. Acessado em: 23/12/2023.

CUBECOM. **μHDRTX-X Microsatellite Transmitter**. Disponível em: <https://cubecom.space/x-band/>. Acessado em: 31/10/2023.

CURTIS, Hywel. **Satellite ground station as a service providers**. In: SATSEARCH. 18/04/2023. Disponível em: <https://blog.satsearch.co/2019-09-25-ground-station-service-providers-an-overview-of-telemetry-and-telecommand-communication-services-and-networks-for-small-satellites>. Acessado em 04/06/2023.

DAVIES, Richard S. Communications Architecture. In: LARSON, Wiley J.; WERTZ, James R. (Ed.). **Space Mission Analysis and Design**. 2. ed. Torrance: Microcosm; Dordrecht/Boston/London: Kluwer, *Copyright* 1992. p. 503-552.

ELBERT, Bruce, R. **Introduction to Satellite Communication**. 3. ed. Norwood, MA: Artech House, *Copyright* 2008. 463 p.

ENDUROSAT. **X-Band Transmitter**. Disponível em: <https://www.endurosat.com/cubesat-store/cubesat-communication-modules/x-band-transmitter/>. Acessado em: 19/12/2023.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. **Space engineering: Ground systems and operations, ECSS-E-ST-70C**. Noordwijk, The Netherlands, 2008. 128 p.

EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. **Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2. ETSI EN 302 307-1 V1.4.1 (2014-11)**;

_____. **Space engineering: System engineering general requirements, ECSS-E-ST-10C**. Noordwijk, The Netherlands, 2009. 100 p.

_____. **Space project management: Project planning and implementation, ECSS-M-ST-10C**. Noordwijk, The Netherlands, 2009a. 50 p.

_____ **ECSS system: Glossary of terms, ECSS-S-ST-00-01C**. Noordwijk, The Netherlands, 2012. 63 p.

_____ **ECSS system: Tailoring, ECSS-S-ST-00-02C DRAFT 1**. Noordwijk, The Netherlands, 2020. 25 p.

FERNANDEZ, M.A., et al. **A game-changing radio communication architecture for cube/nano satellites**. In: Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 29., 2015, Logan, Utah, EUA.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA. **OPERAÇÃO CRUZEIRO**: FAB realiza primeiro teste de voo do motor aeronáutico hipersônico 14-X. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/38395/OPERA%C3%A7%C3%A3O%20CRUZEIRO%20%20FAB%20realiza%20primeiro%20teste%20de%20voo%20do%20motor%20aeron%C3%A1utico%20hipers%C3%B4nico%2014-X> . Acessado em 17/09/2023.

_____ **CLBI – CENTRO DE LANÇAMENTO DA BARREIRA DO INFERNO**.

Disponível em:

<https://www.fab.mil.br/organizacaoes/mostra/74/CENTRO%20DE%20LAN%C3%87AMENTO%20DA%20BARREIRA%20DO%20INFERNO> . Acessado em 17/09/2023a.

_____ **TED 932224 – IMPLANTAÇÃO DO CEA – CLBI.** Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/ted/index.php/clbi/1621-ted-932224-implantacao-do-cea-clbi>. Acessado em 17/09/2023b.

_____ **CLA – CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA.** Disponível em: <https://www.fab.mil.br/organizacoes/mostra/75/>. Acessado em 17/09/2023c.

GENERAL ATOMICS – SYNOPTA. **Optical ground stations.** Disponível em: <https://ga-synopta.ch/products/optical-ground-stations>. Acessado em: 10/10/2023.

GOUVEIA, Adalton. **Esboço histórico da pesquisa espacial no Brasil.** São José dos Campos: INPE, 2003, INPE-10467-RPQ/248.

GROUP OF ASTRODYNAMICS FOR THE USE OF SPACE SYSTEMS. **Ground station.** Disponível em: <https://www.gaussteam.com/services/ground-station/>. Acessado em: 04/06/2023.

HA, Tri T. **Digital Satellite Communications.** Second Edition. S.I.: McGraw-Hill, Copyright 1990, p.641.

HIDALGO, Sebastian. **Ground Station as a Service: a data guide for space startups.** In: CLOUDFLIGHT. Disponível em: <https://www.cloudflight.io/en/blog/ground-station-as-a-service-a-data-guide-for-space-startups/>. Acessado em: 04/06/2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA. **Biblioteca:** Catálogo. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=447966>. Acessado em 21/09/2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – COORDENAÇÃO ESPACIAL DO NORDESTE. **Homepage.** Disponível em: <http://www.inpe.br/nordeste/>. Acessado em 28/01/2022.

_____ **Estação Multimissão de Natal – Manual Técnico, EMMN-MT-001-V01.** Natal-RN, 2020. 92p.

_____ **Estação de São José dos Campos.** Disponível em: http://www.inpe.br/sul/nanosat/estacoes/estacao_sjc.php. Acessado em: 04/10/2023.

_____ **Centro de Rastreamento e Controle de Satélites – COCRC.** Disponível em: <http://www.inpe.br/crc/>. Acessado em: 04/10/2023a.

_____ **Centro de Rastreo e Controle de Satélites – COCRC.** Disponível em: <http://www.inpe.br/crc/>. Acessado em: 04/10/2023b.

_____ **Missão Amazonia.** Disponível em: <http://www.inpe.br/amazonia1/amazonia.php>. Acessado em: 04/10/2023c.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Radio Regulations:** Articles. Edition of 2020. ed. Geneva, Switzerland: ITU Library & Archives Service, 2020. 430 p.

ISISPACE. **S-Band Ground Station Kit Data Sheet.** Disponível em: https://www.isispace.nl/wp-content/uploads/2016/02/ISIS.GSKit_DS_303_v1.0-S-Band-Ground-Station-DataSheet-for-website.pdf. Acessado em 23/12/2023.

KANEKO, T., et alli. **2.65 Gbps downlink communications with polarization multiplexing in X-band for small earth observation satellite.** IEICE Transactions on Communications. E104.B. 10.1587/transcom.2019EBN0009.

KONGSBERG/NANOAVIONICS. How many satellites are in space? Disponível em: <https://nanoavionics.com/blog/how-many-satellites-are-in-space/>. Acessado em: 19/12/2023.

KRATOS. **Digital IF: On-Ramp to the Ground Station in the Cloud.** Disponível em: <https://www.kratosdefense.com/products/space/networks/network-devices/spectralnet>. Acessado em: 23/12/2023.

MILLERIOUX, J.P., ISSLER, J.L., DUDAL, C., MOURY, G., SOULA, J.M. **DVB-S2: a versatile COTS and CCSDS standard for telemetry applications.** In: ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications, 7., 2016, Noordwijk (The Netherlands).

NASA SPACE SCIENCE DATA COORDINATED ARCHIVE. **Starlink 1010.** Disponível em: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=2019-074D> . Acessado em 16/09/2023.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **DVB-S2 Experiment Over NASAs Space Network.** NASA/TM—2017-219524, 2017. 32 p.

_____ Ground Data Systems and Mission Operations. In: **2022 NASA State of the Art Report of Small Satellite Spacecraft Technology.** 2023. Disponível em <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa>. Acessado em 20/09/2023.

_____ **Tracking and Data Relay satellites.** Disponível em <https://www.nasa.gov/mission/tracking-and-data-relay-satellites/>. Acessado em 20/09/2023a.

_____ **Launch.** Disponível em <https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/chapter14-1/>. Acessado em 27/09/2023b.

NEGRON, Jr, David, CHOMAS, Arthur. **Mission Operations.** In: LARSON, Wiley J.; WERTZ, James R. (Ed.). **Space Mission Analysis and Design.** 2. ed. Torrance: Microcosm; Dordrecht/Boston/London: Kluwer, *Copyright* 1992. p. 553-577.

NORTHERN SKY RESEARCH. **Satellite Ground Network Virtualization.** NSR White Paper. March, 2020. Disponível em: <https://www.nsr.com/wp-content/uploads/2020/03/NSR-White-PaperGround-Network-Virtualization-March2020-FINAL.pdf> . Acessado em 27/12/2023

OMNISYS ENGENHARIA LTDA. **Radar de Trajetografia Banda C.** Disponível em: <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?action=dlattach;topic=19961.0;attach=412663> . Acessado em 27/10/2023.

PULTAROVA, Tereza; HOWELL, Elizabeth. **Starlink satellites:** Everything you need to know about the controversial internet megaconstellation. Last updated August 02, 2023. Disponível em: <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html> . Acessado em [16/09/2023](#).

RANGE COMMANDS COUNCIL. **Flight Termination System Commonality Standard.** Document 319-14. 2014. New Mexico.

SAFRAN. **Telemetry receivers and equipment for flight test.** Disponível em: <https://www.safran-group.com/products-services/flight-test-and-telemetry-equipment-cortex-rtr-cortex-rx-1-bss-cortex-rsr-qmdr-advantys-tm-maestro>. Acessado em: 26/12/2023.

_____ **Cortex NuRon, a virtualized software modem for Satellite Command & Control.** Disponível em: <https://www.safran-group.com/products-services/cortex-nuron-virtualizedsoftware-modem-satellite-command-control>. Acessado em: 29/12/2023a.

SATLAB. **S-Band Ground Station.** Disponível em: <https://www.satlab.com/resources/SLPB-SBAND-GND-1.2.pdf>. Acessado em: 23/12/2023.

STARLINK. **Starlink**. Disponível em: <https://www.starlink.com/technology> . Acessado em 16/09/2023.

TELEBRÁS. **Conheça o SGDC**. Disponível em: <https://www.telebras.com.br/telebras-sat/conheca-o-sgdc/> . Acessado em 17/09/2023.

UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. How many satellites are in space? The spike in numbers continues. Disponível em: <https://blog.ucsusa.org/syoung/how-many-satellites-are-in-space-the-spike-in-numbers-continues/>. Acessado em: 19/12/2023.

UNITED NATIONS OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS. Annual number of objects launched into space. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/yearly-number-of-objects-launched-into-outer-space>. Acessado em: 19/12/2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **SPACELAB**. Disponível em: <https://spacelab.ufsc.br/en/research/>. Acessado em: 04/10/2023.

_____ **Ground station, our operation Center**. Disponível em: <https://spacelab.ufsc.br/en/groundstation/>. Acessado em 04/10/2023a.

UNIVERSITY OF ILLINOIS URBANA-CHAMPAIGN. **Space Systems**. Disponível em: <https://aerospace.illinois.edu/research/research-areas/space-systems#:~:text=Space%20systems%20are%20vehicles%20and,navigation%20and%20weather%20prediction%20services> . Acessado em: 16/09/2023.

VIRGILI LLOP, Josep et al. **Very Low Earth Orbit mission concepts for Earth Observation. Benefits and challenges**. In: Reinventing Space Conference, 12., 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/271499606_Very_Low_Earth_Orbit_mission_concepts_for_Earth_Observation_Benefits_and_challenges. Acessado em 18/09/2023.

VISIONA TECNOLOGIA ESPACIAL. **Programa SGDC**. Disponível em: <https://visionaespecial.com/programa-sgdc/> . Acessado em 17/09/2023.

VITA. **Critical Embedded Systems are everywhere...**Disponível em: <https://www.vita.com/>. Acessado em 26/12/2023.

WERTZ, James, R.; LARSON, Wiley, J. The Space Mission Analysis and Design Process. In: LARSON, Wiley J.; WERTZ, James R. (Ed.). **Space Mission Analysis and**

Design. 2. ed. Torrance: Microcosm; Dordrecht/Boston/London: Kluwer, *Copyright* 1992. p. 1-17

WHITWORTH, Gary G. Ground System Design and Sizing. In: LARSON, Wiley J.; WERTZ, James R. (Ed.). **Space Mission Analysis and Design.** 2. ed. Torrance: Microcosm; Dordrecht/Boston/London: Kluwer, *Copyright* 1992. p. 579-601.

WIKIPEDIA. **Spacecraft.** Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft>. Acessado em 17/09/2023.

_____. **Outer space.** Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Outer_space. Acessado em 17/09/2023a.

_____. **Centro de Lançamento da Barreira do Inferno.** Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Centro_de_Lan%C3%A7amento_da_Barreira_do_Inferno. Acessado em 19/09/2023b.

_____. **Foguete Sonda.** Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Foguete_Sonda. Acessado em 19/09/2023c.

WONG, Y. et alli. **NASA Near Earth Network (NEN) DVB-S2 Demonstration Testing for Enhancing Data Rates for CubeSat/SmallSat Missions.** In: Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 32., 2018, Logan, Utah, EUA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturação dos sistemas espaciais conforme a ECSS.....	12
Figura 2 - Composição dos sistemas espaciais utilizada neste trabalho.	13
Figura 3 - Vista do SGDC-1.....	16
Figura 4 - Montagem com fotos do satélite Juno e do planeta Júpiter.....	17
Figura 5 - Apresentação da Operação Cruzeiro da FAB.	18
Figura 6 - Veículo Acelerador Hipersônico (versão de 2011).	19
Figura 7 - Lançamento da carga útil 14-X S com o lançador VAH em 14/12/202.....	20
Figura 8 - Lançamento do satélite Amazonia 1 com o lançador PSLV-C51 em 28/02/2021..	21
Figura 9 - Vista atual (2023) da sala de controle do CLBI.	26
Figura 10 - Sala de controle do CLA após a Operação Cruzeiro.....	28
Figura 11 - Composição do segmento solo.	29
Figura 12 - Ilustração do conceito de satélite retransmissor.....	32
Figura 13 - Ilustração da rede de satélites retransmissores TDRS da NASA.....	33
Figura 14 - Exemplo de arquitetura simplificada do segmento solo.....	35
Figura 15 - Centro de Rastreo e Controle de Satélites (COCRC) do INPE.....	41
Figura 16 - Segmento solo da missão Amazonia 1.	42
Figura 17 - Centro de Operações Espaciais Secundário – Rio de Janeiro.....	43
Figura 18 - Família de antenas do fabricante WTW para aplicações em estações terrenas.	49
Figura 19 - Desempenho da estação terrena óptica da GA-Synopta.	57
Figura 20 - Distribuição geográfica das estações da rede NSN da NASA.....	58
Figura 21 – Funcionamento do serviço <i>AWS Ground Station</i>	60
Figura 22 - Arquitetura de alto nível do serviço <i>AWS Ground Station</i>	61
Figura 23 - Localização das antenas do serviço <i>AWS Ground Station</i>	61
Figura 24 - Antenas (a) CB01, (b) CB09 da estação terrena INPE/Cuiabá.	63
Figura 25 - Estrutura cliente-servidor da rede de acesso à EMMN.	65

Figura 26 - Vistas parciais da Estação Multimissão de Natal.	65
Figura 27 - Vista das antenas da estação terrena do INPE/Santa Maria.....	66
Figura 28 - Vista das antenas da estação terrena do ITA.....	67
Figura 29 - Montagem das antenas VHF/UHF e banda S das estações da RIBRAS.	68
Figura 30 - Artefatos espaciais lançados anualmente.	69
Figura 31 - Total de satélites em órbita a cada ano.....	69
Figura 32 - Transmissores na banda X conformes à norma DVB-S2.	70
Figura 33 - Diagrama de blocos funcionais simplificado da cadeia de recepção das ETs.....	73
Figura 34 - Geração do sinal de FI digital e transmissão por rede IP.	79
Figura 35 - Diagrama de blocos funcionais simplificado da cadeia de recepção das ETs.....	81
Figura 36 - Ilustração do Serviço de GSaaS do GAUSS.	86
Figura 37 - Estrutura de alto nível para a digitalização do segmento solo.....	91
Figura 38 - Segmentos solo convencional e virtualizado.	92
Figura 39 - Exemplos de redes terrestres virtualizadas existentes e em desenvolvimento. ...	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Altitude e período das órbitas terrestres.	15
Tabela 2 - Classificação dos satélites pela sua massa.....	15
Tabela 3 - Família de antenas do fabricante WTW para aplicações em estações terrenas. .	50
Tabela 4 - Serviços de radiocomunicação envolvendo artefatos espaciais conforme a ITU.	52
Tabela 5 - Serviços de radiocomunicação espacial para consulta da regulamentação nacional.	54
Tabela 6 - Principais características da cadeia de recepção das ETs.....	73
Tabela 7 - Principais características da cadeia de transmissão das ETs.	81

LISTA DE ABREVIATURAS

ACM	<i>Adaptative Code and Modulation</i>
AEB	Agência Espacial Brasileira
AGS	<i>Amazon Web Services Ground System</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
CBERS	<i>China-Brazil Earth Resource Satellite</i>
CCM	Centro de Controle de Missão
CCOCU	Centro de Controle de Operação da Carga Útil
CCOS	Centro de Controle de Operação de Satélite
CEA	Centro Espacial de Alcântara
CDTL	Centro de Tratamento de Dados de Localização
CFB	Conversor de Frequências para Baixo
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara, no Maranhão
CLBI	Centro de Lançamento da Barreira do Inferno
COC	Centro de Operações Científicas
COCRC	Centro de Rastreamento e Controle de Satélites (do INPE)
COESU	Estação Terrena da Coordenação Espacial Sul
COM	Centro de Operações da Missão
COPE	Centros de Operações Espaciais
CRS	Centro Regional Sul
CT	Centro Técnico
CubS	<i>CubeSat</i>
DTE	<i>Direct To Earth</i>
DVB-S2	<i>Digital Video Broadcast, Satellite Second Generation</i>
ECSS	<i>European Cooperation for Space Standardization</i>
EESS	<i>Earth Exploration Satellite Service</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
EMC	Estações de Monitoramento e Controle
EMMN	Estação Multimissão de Natal
ESA	<i>European Space Agency</i>
ETA	Estação Terrena de Alcântara
ETC	Estação Terrena de Cuiabá

FAB	Força Aérea Brasileira
FI	Frequência Intermediária
FSO	<i>Free Space Optical</i>
Gbps	Giga bits por segundo
GEO	<i>Geostationary Orbit</i>
GSaaS	<i>Ground Station as a Service</i>
GICLA	Grupo para Implantação do Centro de Lançamento de Alcântara
HPA	<i>High Power Amplifier</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia
IF	Institutos Federais
IFAC	Instituto Federal do Acre
IFBA	Instituto Federal da Bahia
IFF	Instituto Federal Fluminense
IFMT	Instituto Federal de Mato Grosso
IFRR	Instituto Federal de Roraima
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISS	<i>Inter-Satellite Service</i>
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LEOP	<i>Launch and Early Orbit Phase</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MECB	Missão Espacial Completa Brasileira
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MicS	Microssatélite
NanS	Nanossatélite
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NSN	<i>Near Space Network</i>
OTE	Observatório de Tecnologias Espaciais
PicS	Picossatélite
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>

RCC	<i>Range Commanders Council</i>
RF	Rádio Frequência
RIBRAS	Rede Integrada Brasileira de Rastreamento de Satélites
RTV	Receptor de Terminação de Voo
RX	Receptor (ou Recepção)
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SBD	<i>Short Burst Data</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SGDC	Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas
SGP	Satélite de Grande Porte
SINDAE	Sistema Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais
SISNAV	Sistema de Navegação Inercial
SMGS	Serviço Móvel Global por Satélites
SOS	<i>Space Operation Service</i>
SPMP	Satélite de Pequeno e Médio Porte
STV	Sistema de Terminação de Voo
TC	<i>Telecommand</i>
T&C	<i>Telemetry and Command</i>
TDRS	<i>Tracking and Data Relay Satellites</i>
TM	<i>Telemetry</i>
TRX	Transceptor (ou Transmite e Recebe)
T&T	<i>Telemetry and Tracking</i>
TT&C	Telemetry, Tracking and Command
TX	Transmissor (ou Transmissão)
UFABC	Universidade Federal do ABC
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UnB	Universidade de Brasília
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VAH	Veículo Acelerador Hipersônico
VCM	<i>Variable Code and Modulation</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VLEO	<i>Very Low Earth Orbit</i>
VLS	Veículo Lançador de Satélites

APÊNDICE A – Frequências na faixa 100 MHz – 40 GHz para os serviços espaciais

Tabela Ap.A-1 – Frequências na faixa 100 MHz – 40 GHz para os serviços da Tabela 3.5-2 no Brasil.

SERVIÇO	BANDA	Nº DA FAIXA DO SERVIÇO	FAIXAS DE FREQUÊNCIAS	
			VALOR	UNIDADE
SFS – Fixo por Satélite	S, C	1	3.400 – 4.800	MHz
	C	2	5.151 – 5.250	MHz
	C	3	5.850 – 7.075	MHz
	C	4	7.300 – 7.750	MHz
	C, X	5	7.900 – 8.400	MHz
	X, Ku	6	10,7 – 12,2	GHz
	Ku	7	12,75 – 13,25	GHz
	Ku	8	13,75 – 14,8	GHz
	Ku	9	15,43 – 15,63	GHz
	Ku, K	10	17,3 – 21,2	GHz
	K	11	24,75 – 25,25	GHz
	Ka	12	27 – 31	GHz
	Ka	13	37,5 – 40	GHz
SMS – Móvel por Satélite	VHF	1	137 – 138	MHz
	VHF	2	148 – 150,05	MHz
	UHF	3	399,9 – 400,05	MHz
	UHF	4	400,15 – 401	MHz
	UHF	5	406 – 406,1	MHz
	UHF	6	455 – 456	MHz
	UHF	7	459 – 460	MHz
	L	8	1.518 – 1.559	MHz
	L	9	1.610 – 1.660,5	MHz
	L, S	10	1.980 – 2.025	MHz
	S	11	2.160 – 2.200	MHz
	S	12	2.483,5 – 2.500	MHz
	Ku	13	14 – 14,5	GHz
	K	14	19,7 – 21,2	GHz
	Ka	15	29,5 – 31	GHz
	Ka	16	39,5 – 40	GHz
SRS – Radiodifusão por Satélite	L	1	1.452 – 1.492	MHz
	Ku	2	12,2 – 12,7	GHz

SERVIÇO	BANDA	Nº DA FAIXA DO SERVIÇO	FAIXAS DE FREQUÊNCIAS	
			VALOR	UNIDADE
	Ku	3	17,3 – 17,8	GHz
SPE – Pesquisa Espacial	VHF	1	136 – 144	MHz
	UHF	2	400,15 – 401	MHz
	L	3	1.215 – 1.300	MHz
	L	4	1.400 – 1.427	MHz
	L	5	1.660,5 – 1.668,4	MHz
	L, S	6	1.706 – 2.301	MHz
	S	7	2.665 – 2.700	MHz
	S	8	3.100 – 3.300	MHz
	C	9	4.990 – 5.000	MHz
	C	10	5.250 – 5.570	MHz
	C	11	5.650 – 5.725	MHz
	C	12	7.145 – 7.235	MHz
	X	13	8.400 – 8.500	MHz
	X	14	8.550 – 8.650	MHz
	X	15	9.300 – 9.900	MHz
	X	16	10,6 – 10,7	GHz
	Ku	17	13,25 – 14,3	GHz
	Ku	18	14,4 – 14,47	GHz
	Ku	19	14,5 – 15,4	GHz
	Ku	20	16,6 – 17,1	GHz
	Ku	21	17,2 – 17,3	GHz
	K	22	18,6 – 18,8	GHz
	K	23	21,2 – 21,4	GHz
	K	24	22,21 – 22,5	GHz
	K	25	22,55 – 23,15	GHz
	K	26	23,6 – 24	GHz
	K, Ka	27	25,5 – 27	GHz
	Ka	28	31 – 32,3	GHz
	Ka	29	34,2 – 35,2	GHz
	Ka	30	35,5 – 38	GHz
SOE – Operação Espacial	VHF	1	137 – 138	MHz
	VHF	2	272 – 273	MHz
	UHF	3	401 – 402	MHz
	UHF	4	410 – 420	MHz
	L	5	1.427 – 1.429	MHz
	L	6	1.525 – 1.535	MHz

SERVIÇO	BANDA	Nº DA FAIXA DO SERVIÇO	FAIXAS DE FREQUÊNCIAS	
			VALOR	UNIDADE
	S	7	2.025 – 2.110	MHz
	S	8	2.200 – 2.300	MHz
SETS – Exploração da Terra por Satélite	UHF	1	401 – 403	MHz
	UHF	2	432 – 438	MHz
	UHF	3	460 – 470	MHz
	L	4	1.215 – 1.300	MHz
	L	5	1.400 – 1.427	MHz
	L	6	1.525 – 1.535	MHz
	S	7	2.025 – 2.110	MHz
	S	8	2.200 – 2.290	MHz
	S	9	2.665 – 2.700	MHz
	S	10	3.100 – 3.300	MHz
	C	11	5.250 – 5.570	MHz
	X	12	8.025 – 8.400	MHz
	X	13	8.550 – 8.650	MHz
	X	14	9.300 – 9.900	MHz
	X	15	10,6 – 10,7	GHz
	Ku	16	13,25 – 14	GHz
	Ku	17	15,35 – 15,4	GHz
	Ku	18	17,2 – 17,3	GHz
	K	19	18,6 – 18,8	GHz
	K	20	21,2 – 21,4	GHz
	K	21	22,21 – 22,5	GHz
	K	22	23,6 – 24	GHz
	K	23	24,05 – 24,25	GHz
	K, Ka	24	25,5 – 27	GHz
	Ka	25	28,5 – 30	GHz
	Ka	26	31,3 – 31,8	GHz
	Ka	27	35,5 – 37	GHz
	Ka	28	37,5 – 40	GHz
SETS-Meteo – Meteorologia por Satélite	VHF	1	137 – 138	MHz
	UHF	2	400,15 – 403	MHz
	L	3	1.670 – 1.710	MHz
	C	4	7.450 – 7.550	MHz
	C	5	7.750 – 7.900	MHz
	X	6	8.175 – 8.215	MHz
SES – Enlace entre Satélites	K	1	24,45 – 24,75	GHz

SERVIÇO	BANDA	Nº DA FAIXA DO SERVIÇO	FAIXAS DE FREQUÊNCIAS	
			VALOR	UNIDADE
	K, Ka	2	25,25 – 27,5	GHz
	Ka	3	32,3 – 33	GHz

Fonte: CGEE (2023).

APÊNDICE B – GaaS – Fornecedores e características

Tabela Ap.B-1 – Fornecedores do serviço GSaaS.

ITEM	FORNECEDOR	BANDAS	FUNÇÕES	ENDEREÇO
1	AWS Amazon	S, X	D, TT&C	https://aws.amazon.com/pt/ground-station/
2	Viasat	S, X, Ka	D, TT&C	https://www.viasat.com/space-innovation/space-and-networking-technology/ground-network/
3	SpaceLink	Ka	TT&C	https://eosspacelink.com/
4	Leaf Space	UHF, S, X	D, TT&C	https://leaf.space/