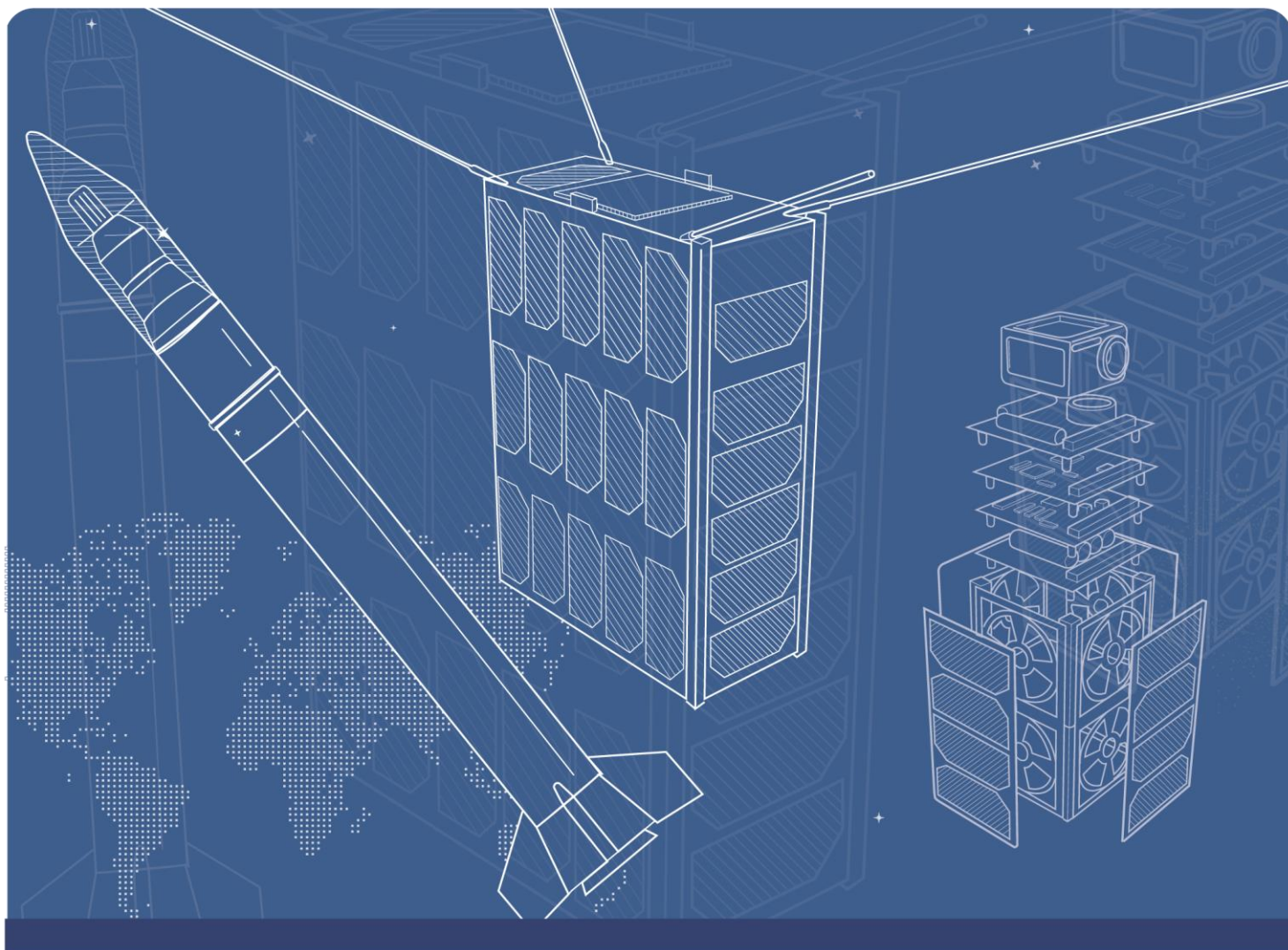




Observatório de Tecnologias Espaciais

Documento Estratégico para o Setor Espacial

Internet com satélites de baixa órbita

Brasília, DF

Dezembro de 2025



cgEE | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

RESERVADO

Documento Estratégico para o Setor Espacial

Ano 9 – Número 1

Internet com satélites de baixa órbita

Supervisão

Anderson Stevens Leonidas Gomes

Equipe técnica do CGEE

Thyrso Villela Neto (Coordenador)

Alessandra de Moura Brandão

César Augusto Costa

Fernando Teixeira Bueno

Apoio administrativo

Larissa Rocha



Brasília, DF
Dezembro, 2025

RESERVADO

Sumário

Apresentação	6
Resumo executivo	7
1 Introdução	15
1.1 Escopo.....	15
2 Satélites de comunicação.....	17
3 Constelações de satélites	21
3.1 Constelações.....	23
3.2 Órbitas utilizadas pelas constelações.....	25
3.3 Constelações diversas	26
3.4 Constelações para comunicações	29
4 Starlink	36
4.1 Sistema Starlink.....	36
4.2 Histórico.....	36
4.3 Satélites	38
4.4 Órbitas.....	43
4.5 Terminais	46
4.6 Enlace entre o satélite e o terminal.....	48
4.7 Estação de solo (<i>gateway</i>).....	50
4.8 Comunicação intersatélites	51
4.9 Estação de controle.....	52
4.10 Controvérsias.....	52
4.11 Custos	54
5 Sistemas alternativos ao Starlink	57
5.1 E-Space	57
5.2 Eutelsat OneWeb.....	58
5.3 Kuiper	59
5.4 O3b e O3b mPower	59
5.5 SatNet	60
5.6 Spacesail	60
5.7 Telesat Lightspeed.....	61
6 Comparação dos sistemas de comunicações.....	62
7 Sistema brasileiro de internet por satélites	65
7.1 Serviço de acesso à internet por satélites no Brasil.....	65
7.2 Proposta de um sistema nacional de internet por satélites NGSO	67
8 Seleção de órbitas.....	72
8.1 Constelação equatorial.....	72
8.2 Constelação inclinada	74
8.3 Constelação equatorial baixa.....	76
8.4 Órbita MEO.....	77
9 Arquitetura de comando, controle e comunicações	78
9.1 Região de cobertura das comunicações solo-satélite.....	79
9.2 Largura de banda dos enlaces do usuário	84
9.3 Avaliação preliminar dos enlaces do usuário.....	87
9.4 Avaliação preliminar dos enlaces da estação <i>gateway</i>	93
9.5 Avaliação preliminar dos enlaces de TM&TC.....	95
9.6 Plano de frequências das comunicações	97
10 Carga útil	98
11 Plataforma espacial.....	99

11.1	Órbita LEO.....	99
11.2	Órbita MEO.....	100
11.3	Órbita GSO:	101
12	Terminais do usuário	102
13	Segmento solo	103
13.1	Estações <i>gateway</i>	103
13.2	Estação de monitoramento e controle.....	104
13.3	Centro de operações da missão	105
14	Operações da missão	106
15	Segmento do lançador	107
16	Domínio das tecnologias necessárias	108
16.1	Plataforma orbital	108
16.2	Sistema ISL.....	108
16.3	Antenas <i>Phased Array</i>	109
16.4	Transponder embarcado.....	109
16.5	Transponder da estação <i>gateway</i>	110
17	Considerações finais.....	111
18	Referências.....	113
19	Apêndice A	120
20	Apêndice B.....	122
21	Apêndice C.....	123
22	Apêndice D	124

Lista de figuras

Figura 3.1 – Constelação TDRS em órbita geossíncrona [8].	26
Figura 3.2 – Vista polar das órbitas Molnyia [7].	27
Figura 3.3 – Geometria das órbitas utilizadas pela constelação GPS [6].	28
Figura 3.4 – Constelação de posicionamento e navegação Glonass [9].	28
Figura 3.5 – Constelação Galileo para navegação global [23].	29
Figura 3.6 – Número de objetos lançados no espaço nos últimos 25 anos [28].	30
Figura 3.7 – Satélites da geração I-5 em órbita geoestacionária [30].	32
Figura 3.8 – Constelação Intelsat mostrando os satélites GEO, e roteadores em solo conectados por fibra óptica (linhas azuis) [33].	33
Figura 3.9 – Constelação de satélites em órbita baixa Iridium [10].	34
Figura 3.10 – Constelação de satélites da SES em órbita MEO (O3b) e GEO [12].	35
Figura 4.1 – Sessenta satélites Starlink empilhados no último estágio do lançador [17].	39
Figura 4.2 – Configuração em voo dos satélites Starlink, com painéis solares abertos [17].	39
Figura 4.3 – Satélite Starlink V1.0, à esquerda, e V1.5, à direita [50].	41
Figura 4.4 – Satélite Starlink V2 Mini, à esquerda, e V2 Mini D2C, à direita [49].	42
Figura 4.5 – Satélites da constelação Starlink em órbita [46].	45
Figura 4.6 – Regiões disponíveis do Brasil (azul claro) e já saturadas (azul escuro) [47].	46
Figura 4.7 – Antenas de terminais Starlink: circular (2ª geração), retangular e Mini (3ª geração).	47
Figura 4.8 – Células H3 em formato hexagonal na região do Caribe [83].	50
Figura 4.9 – Círculo de visibilidade de um satélite Starlink com os hexágonos inscritos [82].	50
Figura 4.10 – Antenas parabólicas das estações de solo com cobertura (esq.) e descoberta (dir.).	51
Figura 4.11 – Rastros dos satélites Starlink em uma imagem astronômica [18].	53
Figura 4.12 – Defletor de luz nos satélites Starlink [18].	53
Figura 5.1 – Planos orbitais da constelação Eutelsat Oneweb. [16].	59
Figura 5.2 - Concepção artística do satélite Spacesail [37].	61
Figura 5.3 – Rede espacial da constelação proposta pela Telesat em órbita baixa [36].	61
Figura 8.1 – Distância atingida pela constelação equatorial em função da altitude orbital.	73
Figura 8.2 – Tempos de contato de estações em Porto Alegre (azul) e Manaus (vermelho). ..	74
Figura 8.3 – Inclinação orbital em função da altitude e do ângulo de elevação para uma estação no extremo sul do país.	75
Figura 8.4 – Cobertura da constelação inclinada, para terminais em Porto Alegre (azul) e Manaus (vermelho).	76
Figura 8.5 - Cobertura da constelação baixa equatorial, a 800 km de altitude, para terminais em Juiz de Fora (azul) e Manaus (vermelho).	77
Figura 8.6 - Cobertura da constelação MEO, para terminais em Porto Alegre (azul) e Manaus (vermelho).	78
Figura 8.7 - Número de prótons fornecido pelo AP8MIN, com energia superior a 0.1 MeV.	78
Figura 9.1 - Possibilidades de posicionamento relativo das regiões de cobertura dos satélites adjacentes da Constelação BR.	80
Figura 9.2 - Street of coverage da Constelação BR.	81
Figura 9.3 - Limites da street of coverage da subconstelação LEO (H = 2.000 km).	82
Figura 9.4 - Limites da street of coverage da subconstelação MEO (H = 8.100 km).	83
Figura 9.5 - Limites da street of coverage da constelação LEO (H = 800 km).	84

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 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 (PEB). 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).

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 PEB. No primeiro documento dessa série, foi apresentada uma categoria de satélites de pequeno porte, que são os nanossatélites conhecidos como CubeSats. O segundo documento foi dedicado a veículos lançadores de satélites de pequeno porte, mostrando um panorama sobre veículos lançadores no mundo. O trabalho realizado sobre esse tema deu origem a um projeto conhecido como Microlançador Brasileiro (ML-BR), que foi apoiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), por meio de um edital de subvenção econômica para empresas, e está sendo atualmente construído por um consórcio de empresas nacionais. O terceiro documento 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. O sétimo número apresentou informações sobre tecnologias associadas ao segmento solo para a área espacial. No oitavo documento, foram tratados alguns aspectos das tecnologias relacionadas aos serviços de posicionamento, navegação e tempo (PNT) fornecidos por satélites, em particular, dos sistemas globais de navegação por satélite (GNSS, da sigla em inglês para *Global Navigation Satellite System*).

O presente documento é o nono número dessa série e nele são tratados tópicos relacionados a serviços de telecomunicações que utilizam satélites como infraestrutura básica. Em particular, são apresentados sistemas que fornecem internet por meio desses artefatos. Nos seis primeiros capítulos deste documento são mostrados os sistemas existentes e nos dez últimos capítulos é apresentada uma sugestão para o desenvolvimento de um sistema brasileiro de fornecimento de internet baseado em uma constelação de satélites em baixa órbita. Essa sugestão levou em conta a possibilidade de a indústria nacional se envolver na fabricação dos satélites. Os estudos devem ser aprofundados para que tal solução possa ser validada.

Resumo executivo

Introdução:

Nos últimos 55 anos, o mundo viu um avanço fantástico nos sistemas de telecomunicações. O Brasil integrou a rede mundial de computadores, internet, a partir de meados da década de 1980, com a conexão à rede de alguns poucos computadores em universidades e instituições de pesquisa. As tecnologias evoluíram rapidamente com o surgimento das fibras ópticas e, mais recentemente, dos satélites em baixa órbita (Figura 1).



Figura 1: Avanços tecnológicos nos sistemas de telecomunicações (elaboração CGEE/ChatGPT).

A década de 1990 trouxe a novidade da *World Wide Web* junto com as primeiras páginas de internet. A partir da metade daquela década teve início no país a oferta de serviços de internet por meio de acesso telefônico ou cabo para residências, estabelecimentos comerciais e indústrias. O acesso à rede, contudo, permaneceu restrito a uma pequena parcela da população, até que as empresas telefônicas incorporaram o serviço de dados aos seus planos de serviços, que, aliado à queda no preço dos celulares multifuncionais (*smartphones*), acelerou o acesso da internet a quase toda a população, restando apenas alguns bolsões onde a própria rede de telefonia não estava presente.

No início dos anos 90, antes do surgimento de páginas de internet, de serviços de *streaming*, de canais de Youtube, de comércio eletrônico e das redes sociais, e quando o maior tráfego na rede eram mensagens de texto que substituíam as cartas enviadas pelo correio, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) iniciou um projeto de dotar o país com um sistema de satélites para comunicação em órbita baixa, denominado de ECO8. Inicialmente concebida para operar com oito satélites em órbita equatorial, a constelação foi redimensionada logo após para 12 satélites a 2000 km de altitude, mantendo ainda a órbita equatorial. O sistema iria prover

comunicação de voz e dados duplex entre terminais de usuários, ou entre o terminal do usuário e a rede de telefonia fixa. A constelação iria cobrir a zona equatorial compreendida entre as latitudes de 27,5° Norte e Sul [1], visando principalmente atender a “postos públicos, escolas, centros de saúde e guarnições de fronteira, entre outros”, mas, infelizmente, não foram alocados recursos financeiros para sua materialização. Passados mais de 30 anos desde a concepção do ECO8, o País ainda permanece com dependência de sistemas externos, e com ausência de investimentos domésticos.

Esse problema - prover meios de comunicação em locais afastados dos grandes centros urbanos - não se manifesta apenas no Brasil¹. Regiões com baixa densidade populacional nos Estados Unidos e certas partes da Ásia sofrem de problemas semelhantes. Em locais sem acesso a fibras ópticas, a alternativa é o uso de satélites.

Neste resumo executivo descreve-se de forma sucinta uma proposta para o uso de satélites para prover internet no Brasil, a partir das condições atuais de desenvolvimento tecnológico e disponibilidade global para esses tipos de sistema.

Internet por satélites

Há três opções para acesso à internet por meio satélites no Brasil:

- adesão a sistemas comerciais disponíveis globalmente,
- desenvolvimento de sistema próprio ou
- uso do SGDC (Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas), que não será explorado neste documento.

a) Sistemas comerciais disponíveis globalmente

Para implementação efetiva dos sistemas provedores de internet por meio de satélites atuais, foi necessário superar algumas dificuldades. Nas latitudes setentrionais - situadas entre a linha do equador (0° de latitude) e o Polo Norte (90° N) - porém, um sistema de comunicação por satélite demanda uma constelação de centenas deles, em órbitas baixas de alta inclinação, para assegurar visibilidade mútua nas altas latitudes. Décadas atrás esse obstáculo aparentava ser intransponível em virtude do custo gigantesco da constelação. A solução veio por meio do aumento do número de canais para transmissão de dados nos satélites geoestacionários destinados à comunicação de telefonia e televisão. A cobertura em solo proporcionada por satélites geoestacionários permite atender um continente inteiro, mas, por outro lado, o acesso aos canais deve ser compartilhado com todos os usuários, o que limita sobremaneira a velocidade de transmissão, ou então impede o acesso de potenciais clientes.

¹ No Brasil, o CGEE lançou, em 2024, um estudo com mapeamento de demandas, cenários e alternativas tecnológicas para conectividade no campo cobrindo todo o País [2].

Percebendo que uma constelação de satélites para internet em órbita baixa (LEO - *Low Earth Orbit*) seria capaz de resolver tanto o problema de limitação de tráfego quanto do tempo de resposta (latência) da comunicação, a empresa norte-americana SpaceX decidiu investir grande soma de recursos na construção de uma constelação de satélites para comunicação de dados em alta velocidade e baixa latência, denominada de Starlink. Atualmente, essa constelação possui pouco mais de 8.000 satélites em órbita, mas deve atingir 12 mil em poucos anos.

Três requisitos principais nortearam o projeto dos satélites da Starlink:

- cobertura global, mesmo em regiões próximas aos polos;
- garantia de uma taxa de comunicação de 250 Mbps no terminal de usuário em 99% do tempo;
- garantia de uma latência entre 25 e 75 ms.

Esses parâmetros foram adotados para permitir que o serviço suportasse *streaming* de vídeo e chamadas de voz, com ou sem vídeo. Porém, em virtude do compartilhamento de recursos entre os diversos usuários, tanto a velocidade de transferência quanto a latência podem variar, tanto no tempo quanto no local, dependendo da quantidade de clientes numa dada região. O requisito de latência exigiu que a órbita da constelação tivesse uma altitude próxima de 600 km, enquanto a cobertura global obrigou que as órbitas tivessem alta inclinação, entre 43 e 97 graus. A alta taxa de comunicação, comparável com 5G, requer milhares de satélites na constelação, com órbitas em dezenas de planos, e com dezenas de satélites em cada plano, para que haja sempre ao menos alguns satélites sobrevoando um dado local.

O custo dessa constelação já ultrapassou 10 bilhões de dólares, e as receitas ultrapassaram as despesas pela primeira vez no ano de 2024. No Brasil, o Starlink é usado majoritariamente, inclusive pelo Governo Federal, mas há potenciais alternativas, conforme a Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Sistemas de comunicações espaciais alternativos ao Starlink.

Constelação	Origem	Início	Órbitas	Satélites	Situação
E-Space	França	2022	LEO	100000	E
Eutelsat OneWeb	Reino Unido	2016	LEO	648	O
Kuiper	EUA	2019	LEO	3236	E
O3b / O3b mPower	Luxemburgo	2012	MEO	31	O
SatNet	China	2021	LEO	13000	E
Spacesail	China	2023	LEO	14000	E
Starlink	Estados Unidos	2019	LEO	30000	O
Telesat Lightspeed	Canadá	2016	LEO	198	E

Na Tabela 1, a situação é definida em função do grau de operacionalidade (N- Não Operacional; E – Fase experimental; P – Parcialmente operacional; O – Operacional). O número de satélites indica a previsão da constelação completa fornecida pelas empresas aos órgãos reguladores responsáveis pelos objetos em órbita.

Em 2024, foi anunciado um acordo entre a Telebras e a empresa chinesa SpaceSail, concorrente da Starlink. A companhia chinesa pretende atuar com o serviço de internet de alta velocidade transmitida por satélites de baixa órbita².

Para ações e viabilização de acesso imediato e mesmo de curto prazo (1 a 3 anos) a única alternativa é a contratação das empresas que dispõem do serviço, o que cria uma dependência tecnológica e afeta a soberania nacional.

b) Desenvolvimento de sistema próprio

A atual geopolítica global requer que cada País cuide de sua soberania, incluindo a soberania digital. A decisão de desenvolver um sistema próprio de satélites garante ao País ampliar o conhecimento científico e tecnológico no tema, permitindo autonomia até para discutir a contratação de serviços externos, gerar produtos e processos e incrementar a economia nacional.

Há que se considerar, nessa escolha, aspectos técnicos importantes: a maior parte das comunidades remotas do país não tem necessidade de baixa latência ou de alta taxa de transmissão, mas sim garantia de comunicação rápida e serviços básicos, como pedidos de auxílio para atendimento a doenças e acidentes de seus membros. Comunicações do tipo Whatsapp ou Telegram podem ser realizadas com facilidade com baixas taxas de transferência. O ganho obtido com o relaxamento desses dois parâmetros permite reduzir a constelação de satélites substancialmente e viabilizar seu projeto. Caso, no futuro, se opte por aumentar a taxa de transferência, bastará para isso aumentar a quantidade de satélites em órbita. Em outras palavras, apesar de haver relaxamento na taxa de comunicação, tanto os terminais de usuário quanto os satélites podem ser dotados de alta capacidade de transferência de dados, sendo que a limitação se deve, basicamente, a uma constelação com número menor de satélites. Em resumo, são propostos os seguintes requisitos para uma constelação brasileira de satélites para acesso à internet:

- cobertura regional,
- taxa mínima de transferência de dados nos terminais de usuários de 10 Mbps, e
- latência máxima do sistema de 1 segundo.

Esse relaxamento permite soluções que são atendidas por constelações em órbitas LEO e órbitas médias (MEO - *Medium Earth Orbit*), além de também serem satisfeitos com um satélite em órbita GSO (*Geo Synchronous Orbit*). A partir dessas observações, estudou-se possíveis constelações em diferentes configurações. Os resultados que permitiram atender os requisitos sem introduzir custos elevados foram aqueles que consideraram órbitas equatoriais. Porém, órbitas equatoriais abaixo de 800 km de altitude não apresentam boa cobertura do território brasileiro, já que a Região Sul fica totalmente fora da visibilidade dos satélites. Considerou-se, então, uma constelação formada por quatro planos inclinados de 23 graus e separados de 90° no plano do equador, a 600 km de altitude, com 20 satélites em cada plano, em configuração Walker 80/4/0. Adicionalmente, acrescentou-se um plano orbital equatorial para aumentar os

² (<https://www.telebras.com.br/ministerio-das-comunicacoes-assina-acordos-com-a-china-sobre-conectividade-e-economia-digital/>).

períodos de contato na região norte do país, chegando então a uma constelação de 100 satélites. Ainda que tal constelação cumpra os requisitos e possua cobertura completa do Brasil, o grande número de satélites exigido permite concluir que essa solução se tornará inviável quando os custos puderem ser estimados em detalhes.

Com base nessas hipóteses procurou-se comparar as constelações equatoriais em 3 altitudes distintas: 800, 2.000 e 8.100 km.

b.1) Constelação LEO a 800 km

Os melhores tempos de contato de terminais com uma constelação equatorial a 800 km de altitude foram obtidos com 32 satélites igualmente separados na órbita. Admitindo que um terminal consiga estabelecer contato com a constelação a partir de uma elevação (visada) de 5 graus em relação ao horizonte, a máxima latitude coberta por esta constelação seria de -22° , próxima de Juiz de Fora, em Minas Gerais (Figura 2). Latitudes mais setentrionais ficam fora da cobertura.

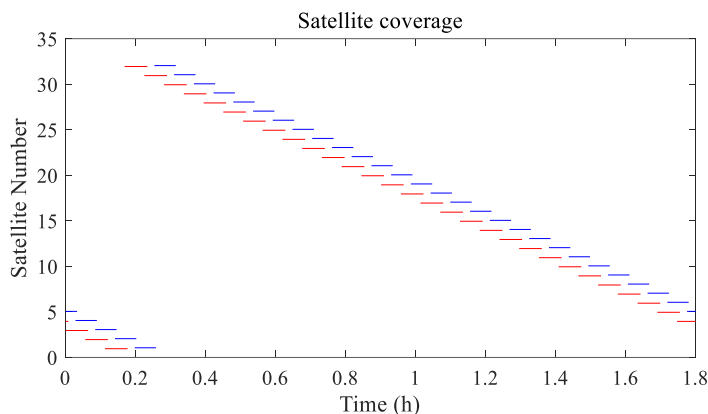


Figura 2: Simulação da duração de contato de dois terminais de usuário, na latitude de Juiz de Fora (azul) e Manaus (vermelho).

b.2) Constelação LEO a 2.000 km

A região de visibilidade em solo de um satélite a 2.000 km de altitude é muito maior do que aquela de um satélite a 800 km. Com isso, essa constelação atinge latitudes maiores, mas exige, em contrapartida, potência maior de seus transmissores. O custo de lançamento é também maior, porém fica amortizado quando se considera que o número de satélites é menor. A melhor configuração obtida com uma órbita equatorial a 2.000 km foi com 18 satélites. Essa constelação apresenta cobertura completa do território brasileiro, permitindo contato com terminais em Porto Alegre com 10 graus de elevação (Figura 3). Os satélites deverão ser projetados com blindagem especial, uma vez que a dosagem de radiação nessa altitude é maior devido à inserção orbital no cinturão de Van Allen.

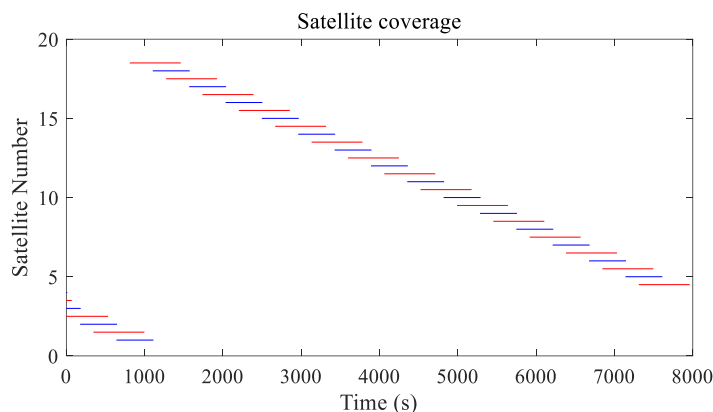


Figura 3: Tempos de contato de terminais com satélites da constelação a 2000 km de altitude, em Porto Alegre (azul) e Manaus (vermelho).

b.3) Constelação MEO a 8.100 km

Constelações em órbitas baixas possuem diversos pontos positivos, como menor preço de lançamento, menor potência nos transmissores, menor massa, reposição orbital mais fácil etc. Porém, a grande quantidade de satélites necessários na órbita LEO pode inviabilizar seu custo. Uma constelação em órbitas mais altas possui suas vantagens, como maior visibilidade e menor número de satélites, mas, por outro lado, o custo de lançamento é maior. Portanto uma análise comparativa do custo pode fornecer informações relevantes para a seleção da melhor solução para a constelação. Considerou-se na constelação MEO uma altitude de 8.100 km, também situada no interior do cinturão de radiação de Van Allen, o que exige, obviamente, maiores blindagens nos componentes eletrônicos dos satélites. Com órbita equatorial foram necessários 6 satélites para cobertura completa do Brasil, com elevação de 20° em terminais em Porto Alegre. Na Figura 4, é mostrada uma simulação da duração de contato da constelação com dois terminais: um em Porto Alegre, em azul, e outro em Manaus, em vermelho. Em nenhum momento, há perda de contato desses terminais com a constelação.

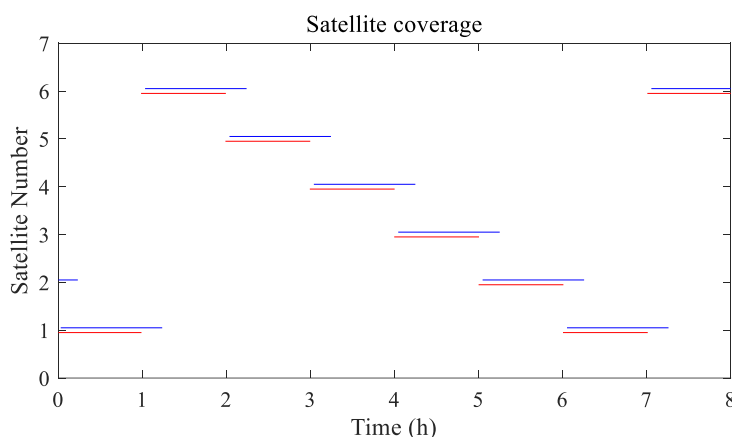


Figura 4: Tempos de contato da constelação MEO com terminais em Porto Alegre (azul) e Manaus (vermelho).

b.4) Satélite geoestacionário a 36.000 km

Satélites geoestacionários são amplamente utilizados em comunicação, como, por exemplo, o SGDC (Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas). A altitude geoestacionária possui igualmente vantagens para sistemas de comunicação, particularmente naquilo que se refere ao custo dos terminais, uma vez que as antenas são fixas e de baixo custo. Embora seja possível utilizar antenas móveis para comunicação com satélites GEO, o seu custo sobe significativamente. O maior obstáculo dessa solução é a necessidade de alta potência tanto dos transmissores do satélite quanto daqueles baseados em solo. O número de usuários que podem ser atendidos simultaneamente é também limitado, pelo fato de que o satélite pode cobrir todo o território nacional, com possibilidade de haver centenas de milhares de clientes interessados no serviço.

3. Custos das constelações

Estimou-se o custo das constelações para internet com base em valores encontrados em estudos similares [3]. Na Tabela 2, é apresentado o custo para todas as soluções discutidas. O custo dos satélites levou em conta o número de unidades produzidas, o que explica parte do custo unitário mais baixo das constelações com maior número de satélites. O número de satélites por lançamento pode variar em função da massa final dos satélites e da forma com que se consegue compactar as unidades dentre da coifa do lançador. Não foram considerados nesta tabela os custos envolvidos com o projeto dos satélites, o custo dos terminais e os custos de controle e operação da constelação.

Os cálculos preliminares indicam que a solução GSO é a mais econômica. Excetuando a GSO, a constelação MEO é a que exige o menor número de satélites. Porém, há diversas dúvidas ainda sobre a solução MEO. Entre elas, as principais são os custos de blindagem de componentes eletrônicos e de lançamento. Como quase não há satélites em altitudes de 8.000 km, é difícil estabelecer um custo com segurança. Entre as dúvidas está também a possibilidade de lançar mais de um satélite em cada lançamento. Se não for possível, o custo aumentaria bastante. A diferença de custo entre as soluções MEO e LEO 2.000 não é grande, considerando que há incertezas nas estimativas. Assim, em função dos custos estimados, a solução LEO 2.000 desponta como uma boa alternativa e, depois, viria a solução LEO 800. O tempo para instalação de qualquer das soluções é de 3 a 5 anos.

Tabela 2: Custos das constelações para serviço de internet apresentadas neste relatório

Parâmetro	LEO 800	LEO 2.000	MEO	GSO
Vida útil (anos)	5	5	5	10
Número total de satélites	32	18	6	1
Custo do satélite (milhões de dólares)	20	30	60	150
<i>Custo da constelação (milhões de dólares)</i>	640	540	360	150
Custo de cada lançamento (milhões de dólares)	50	60	80	100
Número de satélites por lançamento	5*	5*	2	1
Número de lançamentos necessários	7	4	3	1
<i>Custo total de lançamento (milhões de dólares)</i>	350	240	300	150
Custo total da constelação (milhões de dólares)	990	780	600	250

* A depender do grau de compactação obtido na plataforma.

Recomendação

Com base nos estudos preliminares apresentados, recomenda-se priorizar a constelação LEO 2.000. Essa recomendação leva em conta a possibilidade de a indústria nacional se envolver na fabricação dos satélites. Além disso, há a possibilidade de, no futuro, o Brasil poder ter seus próprios veículos lançadores que possam ser empregados nesse projeto. Atualmente, um veículo lançador em desenvolvimento terá capacidade de colocar satélites de cerca de 35 kg em órbitas de 450 km de altitude, o que, obviamente, não atende a solução LEO 2.000. Porém, seria um grande desafio para as empresas nacionais que estão desenvolvendo esse foguete tentarem se engajar nesse projeto. Os estudos devem ser aprofundados para que tal solução possa ser validada.

Bibliografia

- 1) Bambace, L. A. W.; Carleial, A. B. Características do Sistema ECO8 de Comunicações Móveis via Satélite. X. 391-396, 1995.
- 2) Conectividade no campo. Mapeamento de demandas, cenários e alternativas tecnológicas. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2024.
- 3) Reznik, S. V.; Shustilova, M. S. Comparison of geostationary and low-orbit “round dance” satellite communication systems. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971, 2020. IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/971/5/052045.
https://www.researchgate.net/publication/347276446_Comparison_of_geostationary_and_low-orbit_round_dance_satellite_communication_systems

1 Introdução

Este relatório apresenta uma síntese da tecnologia utilizada em comunicações por satélites, bem como um resumo dos principais sistemas comerciais disponíveis atualmente no mercado mundial, em particular aqueles destinados a prover serviços de transmissão de dados utilizando protocolos da rede internet. Dentre os sistemas existentes será destacado o sistema norte-americano Starlink, que atende tanto usuários individuais quanto empresas.

Devido ao caráter empresarial e econômico destes sistemas, pouca informação é disponibilizada ao público, quer pela necessidade de se manter confidência das tecnologias empregadas no intento de evitar competição, quer por inexistir interesse empresarial na divulgação técnica. Em decorrência disso, muito do que será apresentado aqui constitui inferência realizada pelos autores com base na informação disponível. Resguarda-se, portanto, a possibilidade de se encontrar neste relatório algumas afirmações que se mostrem equivocadas futuramente quando, e se, for possível acessar novos dados antes resguardados por aspecto confidencial.

Além disso, neste documento é apresentada um estudo preliminar de desenvolvimento de um sistema nacional de comunicação por satélites para distribuição de serviços de internet a usuários em solo.

1.1 Escopo

Este documento foi elaborado como resposta a um questionamento, no âmbito do CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos), órgão supervisionado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), sobre a necessidade de o País intensificar estudos visando atingir maturidade no conhecimento de constelações de satélites de comunicações, dadas suas dimensões continentais, com áreas esparsamente povoadas, que requerem inserção em tecnologias modernas de comunicação rápida via internet para introduzir melhorias nas condições de vida de comunidades remotas. Com base nesses objetivos, foram identificadas linhas de estudo que permitissem, em análise preliminar, avaliar as tecnologias utilizadas por diversas empresas no exterior que desenvolvem e operam constelações de satélites para comunicação de dados em órbita baixa. Neste documento, busca-se, primeiramente, apresentar as diversas características da comunicação por meio de constelações de satélites, em particular a Starlink. Ademais, levando em conta os objetivos supracitados, foram identificadas linhas de estudo que permitissem, em análise preliminar, avaliar as tecnologias utilizadas por diversas empresas no exterior que desenvolvem e operam constelações de satélites para comunicação de dados em órbita baixa. São explicitados os principais parâmetros do sistema sendo eles:

- i) o custo estimado;
- ii) o domínio tecnológico necessário;
- iii) os recursos humanos e de infraestrutura disponíveis no Brasil;
- iv) devem ser especificados o número mínimo de satélites e de órbitas que possam definir um sistema que cubra grande parte do território nacional (acima de 70%, por exemplo, embora esse número seja apenas uma referência) e que ofereça serviços mínimos de acesso à internet;

- v) deverão ser fornecidas opções de cobertura do território nacional em função do número de satélites e de órbitas.

Neste documento são apresentados e discutidos os principais satélites de comunicação e as constelações atualmente operacionais dentro dessa categoria, fornecendo um panorama geral do estado da arte. No capítulo 4, o sistema Starlink é explorado em maior profundidade, com a descrição de sua arquitetura, funcionalidades e capacidades técnicas. Os capítulos 5 e 6 dedicam-se, respectivamente, à apresentação de sistemas alternativos ao Starlink e à comparação entre esses sistemas, destacando vantagens, limitações e diferentes abordagens tecnológicas. Por fim, do capítulo 7 ao capítulo 17, desenvolve-se uma descrição abrangente e detalhada do sistema brasileiro proposto para o fornecimento de internet via satélite, enfatizando seus objetivos, estrutura e potencial de aplicação.

2 Satélites de comunicação

Entende-se por comunicação as diversas formas de transmissão de informação. Todas as formas de comunicação requerem necessariamente um meio de transmissão e uma forma de armazenamento da informação a ser transmitida. Tanto o emissor quanto o receptor são igualmente necessários. Esta definição permite que seja incluída entre as formas de comunicação a fala, a escrita, o rádio, chegando até internet e os satélites de comunicação. Qualquer que seja a forma de transmissão, o princípio que governa a comunicação é a velocidade e o alcance da transmissão. Por trás deste princípio encontra-se a vertente que permeia o crescimento da civilização: informação significa conhecimento, conhecimento implica em poder, e poder gera riqueza. Como consequência, quanto maior a velocidade ou o alcance da transmissão da informação, maiores os benefícios que podem ser obtidos a partir dela.

Com a compreensão dos fenômenos elétricos, em fins do século XVIII e início do século XIX, não tardou a serem desenvolvidos aparelhos que permitiam transmitir informações em velocidade surpreendente. Inicia-se então a era das telecomunicações, começando com o telégrafo, passando pelo telefone, rádio e televisão, entre outros, até atingir satélites e internet (veja-se a Tabela 2.1). Cada uma destas tecnologias reinou suprema até o aparecimento de outra que a ultrapassou em velocidade ou alcance.

Tabela 2.1: Formas de transmissão de informação ao longo do tempo.

Meio	Data	Velocidade	Alcance
Fala	Desconhecido	Baixa	Pequeno
Escrita monumental	~5000AC	Baixa	Pequeno
Escrita tipográfica	~1500	Baixa	Pequeno
Telégrafo	~1800	Moderada	Moderado
Telefone	1880	Baixa	Moderado
Rádio	1900	Moderado	Alto
Telex	1920	Moderada	Moderado
Televisão	1940	Alta	Alto
Satélite	1960	Alta	Alto
internet	1990	Alta	Alto

Qualquer que seja a forma de transmissão da informação, duas alternativas são possíveis: comunicação ponto a ponto e por difusão. Na primeira delas, a informação flui do transmissor para um receptor único; na segunda vários receptores, por vezes em locais distintos, recebem a mesma informação. O telefone é um exemplo da transmissão ponto a ponto e o rádio é um exemplo da difusão. A telecomunicação ponto a ponto é normalmente transmitida por meio de cabo (telefone, telégrafo), enquanto a difusão emprega ondas eletromagnéticas (rádio, televisão), embora existam exceções como os *walk-talkies*, por exemplo. Outra classificação possível é a codificação da informação, que pode ser analógica ou digital. Uma codificação analógica é uma reprodução fiel da informação, seja ela uma voz (áudio) ou imagem (vídeo). Na codificação digital a informação analógica é transformada em digital (digitalizada) por meio de equipamentos ou procedimentos especializados, e, em seguida, é transmitida na forma

digital. A transmissão também pode ser direta, do próprio sinal a ser transmitido (telefone, internet por cabo), ou por meio de um sinal portador, denominado de onda portadora (rádio, televisão, internet *wireless*). Na transmissão analógica o sinal transmitido pode passar por equipamentos intermediários dotados com receptor e transmissor integrados, também conhecidos como transceptores (*transceiver*) ou ainda repetidores. Eles decodificam o sinal original, amplificam e o enviam para o receptor ou transceptor seguinte. O meio de transmissão pode, inclusive, ser diverso em cada segmento de transmissão (cabo e rádio, por exemplo), porém em todos os equipamentos intermediários o sinal é transmitido integralmente sem atrasos. A transmissão digital utiliza exatamente os mesmos princípios de nós intermediários, porém a mensagem original pode ser armazenada temporariamente em um dos nós antes de ser reemitida, gerando eventuais atrasos na chegada da mensagem ao receptor final. É também possível transmitir sinais digitais utilizando ondas portadoras analógicas quer por meio de cabo ou por rádio. Este procedimento permite que vários sinais sejam transmitidos simultaneamente, bastando que cada portador possua frequência diferente das demais. A transmissão pode ocorrer em um único sentido, do emissor ao receptor, ou então em ambos os sentidos. Denomina-se a operação em sentido único como unidirecional, enquanto a transmissão em ambos os sentidos é chamada de bidirecional. Transceptores podem ser utilizados na comunicação bidirecional, mas, normalmente, os moduladores dos transceptores operam em frequências diferentes, enquanto a frequência na transmissão bidirecional pode ser, e geralmente é, única nos dois sentidos.

As transmissões por meio de cabos, inicialmente com o telégrafo e posteriormente com as transmissões telefônicas, tiveram significativo incremento no alcance quando foram implantados os primeiros cabos transoceânicos ligando a Europa ao continente americano por volta de 1870. Apesar da alta velocidade na transmissão da informação, a taxa de transmissão era relativamente baixa, de apenas alguns caracteres por minuto. Este limite somente seria ultrapassado anos depois com o rádio.

O desenvolvimento da transmissão por rádio que ocorreu após a invenção da válvula eletrônica promoveu um rápido crescimento da velocidade com que a informação fluía. Contudo o alcance era restrito a pequenas áreas, com um custo relativamente reduzido quando comparado às transmissões telegráficas. O alcance das primeiras transmissões era limitado a pouco mais do que alguns poucos quilômetros, pois as ondas eletromagnéticas do transmissor eram absorvidas por quaisquer obstáculos, como montanhas ou construções. O aumento da potência do transmissor podia melhorar o alcance, mas, ainda assim, ficava confinado a uma região. Transmissões que utilizavam portadoras de grande comprimento de onda podiam ser captadas a distâncias continentais, porque a alta atmosfera terrestre reflete estas ondas de volta para a Terra. Por outro lado, portadoras de grande comprimento de onda são mais suscetíveis a ruídos, identificados posteriormente como causados por ondas de rádio provindas do Sol. Por isso foi bastante comum na primeira metade do século XX que as transmissões de rádio intercontinentais fossem realizadas especialmente durante a noite.

O advento da era espacial trouxe novos alentos ao desejo de se atingir transmissões de longo alcance por rádio e com alta velocidade. Algumas tentativas foram feitas como os satélites

Echo, que eram balões de Mylar de 30 metros de diâmetro (Echo 1 e 1A) e 40 metros (Echo 2). Os balões eram inflados em órbita e retransmitiam passivamente por reflexão sinais de rádio em micro-ondas direcionados de solo.

Outro projeto de retransmissão passiva foi o West Ford, que consistiu em lançamentos entre 1961 e 1963 de milhões de pequenas antenas formadas por fios de cobre de 1,78 cm (8 GHz) de comprimento e diâmetro próximo de 20 micrômetros, em órbita polar a 3600 km de altitude. Contudo este projeto foi descontinuado em virtude de protestos de associações astronáuticas e também porque as antenas não se separaram em órbita como era esperado. Alguns aglomerados destas antenas permanecem em órbita até os dias atuais.

O primeiro satélite ativo de telecomunicação foi o Telstar 1, lançado em 1962 em órbita elíptica entre 1000 e 6000 km de altitude com 45° de inclinação. Sua capacidade de comunicação era bidirecional, mas limitada a um canal de televisão ou diversos canais telefônicos multiplexados. O projeto Telstar continua em atividade até hoje, com lançamentos frequentes para renovar a constelação. Atualmente os satélites utilizam a órbita geoestacionária.

Entre os satélites de comunicação pioneiros encontram-se os Syncom 2 e 3, lançados em órbita geossíncrona (inclinada em relação ao Equador) e geoestacionária (sem inclinação) respectivamente, em 1963 e 1964. Foram projetados pela americana Hughes e postos em serviço a tempo de transmitir ao vivo os jogos olímpicos do Japão em 1964 [1].

Com a demonstração em órbita da viabilidade de telecomunicações por satélite, formou-se em 1964 o consórcio internacional Intelsat integrado inicialmente por 11 países, com objetivo de prover sistemas de comunicação por satélites. O primeiro Intelsat (denominado de Early Bird), foi lançado em 1965, para retransmissão de comunicações entre Estados Unidos e Europa. Em 1967 foram lançados mais dois (2B e 2D) cobrindo o Pacífico, e o F3, em 1969, na região do oceano Índico. Todos eles utilizaram a órbita geoestacionária.

As latitudes setentrionais dos países que integravam a União Soviética impediam que órbitas geossíncronas fossem utilizadas nas comunicações, uma vez que as baixas elevações das antenas de solo eram afetadas pelo maior percurso que os sinais teriam que percorrer na atmosfera terrestre. A solução encontrada foram os satélites Molniya, que utilizavam uma órbita de alta excentricidade (0,737) e inclinação (63,4°), com apogeu de 39700 km (pouco acima da órbita geoestacionária), perigeu de 600 km e argumento do perigeu de 270°. O período orbital é próximo de 12 horas. Estas condições orbitais fazem com que o argumento do perigeu da órbita fique estacionário, e com isso o apogeu estará sempre sobre o hemisfério norte. Se três satélites forem postos nesta órbita, com ascensão reta defasadas de 120° entre si (veja-se o Apêndice A), e posicionados com defasagem igualmente de 120 graus no ângulo de anomalia média, então uma estação em solo irá observar um dos satélites praticamente estacionado num ponto do espaço, por aproximadamente 8 horas. Após este intervalo o satélite sai do campo de abertura da antena, mas é imediatamente substituído pelo satélite seguinte da constelação, permitindo, portanto, cobertura completa e contínua. O primeiro Molniya foi lançado em 1965, mas em 1967 a constelação já abrigava 6 satélites em órbita.

Não tardou a outros países perceberem as diversas vantagens que as comunicações por satélite ofereciam, e se juntaram aos pioneiros. O Canadá lançou o Anik 1 em 1972 e a Indonésia o Palapa 1 em 1976 [1].

O primeiro satélite de telecomunicações do Brasil foi o Brasilsat A1, lançado em 1985, adquirido pela Embratel da norte-americana Hughes com participação da empresa canadense Spar Aerospace na produção do transponder de comunicação, logo seguido do A2, em 1986. Neste mesmo ano iniciava-se a contratação dos satélites seguintes, B1 e B2, agora especificados pela Spar com subcontratação da Hughes. Estes foram lançados em 1994 e 95, para atender as comunicações de TV e telefonia. Assim como os seus antecessores, eles foram posicionados em órbita geoestacionária. Em 1998 e 2000 foram lançados os Brasilsat B3 e B4, sucedidos pelas séries C e D. Apesar do forte incentivo à participação do Brasil nestes projetos, o envolvimento de especialistas brasileiros nos projetos dos Brasilsat foi pequeno. Tampouco a tão almejada tecnologia de projeto e produção destes satélites foi transferida com êxito. Passados mais de 40 anos, o país ainda não ganhou massa crítica capaz de assimilar todas as fases do desenvolvimento de satélites voltados para telecomunicações.

3 Constelações de satélites

As órbitas dos satélites são classificadas em órbita baixa, ou LEO (*Low Earth Orbit*), com altitudes variando entre 300 e 2000 km. Órbitas médias, ou MEO (*Medium Earth Orbit*) são pouco empregadas por situarem próximas aos cinturões de radiação terrestres, prejudiciais aos componentes eletrônicos dos satélites. Porém, são bastante utilizadas por constelações de satélites voltados para posicionamento global, como o GPS (*Global Positioning System*), Galileo (Europeu), GLONASS (Russo) e BeiDou (Chinês). As altitudes de satélites MEO variam de 2000 a 35000 km. Em seguida têm-se as órbitas geoestacionárias ou geossíncronas GEO (*Geostationary Earth Orbit*) com altitude pouco abaixo de 36000 km. Satélites em órbita geoestacionária (com inclinação e excentricidade nulas) permanecem estacionados numa dada posição do espaço relativa à Terra, o que permite que antenas direcionais fixas possam ser utilizadas na comunicação entre o solo e o satélite. Como o movimento do satélite em órbita acompanha a Terra, a cobertura temporal é, portanto, total.

Satélites de comunicação utilizam a órbita geoestacionária (ou a geossíncrona, por vezes) em virtude da redução de custos com as antenas receptoras e transmissoras em solo. Satélites em órbitas baixas (até 1000 km de altitude), em oposição aos de órbita geoestacionária (35800 km), requerem antenas de grandes dimensões que possam acompanhar o rápido movimento do satélite pela estação de solo. O custo de aquisição e manutenção destas antenas é elevado, o que restringe seu uso em aplicações de comunicação. Ademais, o curto tempo de passagem destes satélites pela estação, de 15 minutos, no máximo, impede as comunicações de telefonia e televisão, mas permite a retransmissão de dados com atraso, como mensagens, por exemplo. Por outro lado, o custo de lançamento nas órbitas baixas é muito inferior em comparação ao custo de órbitas geoestacionárias, permitindo que a escolha da órbita dependa exclusivamente do tipo da missão.

O tráfego crescente de canais de comunicação não apenas aumentou o número de satélites GEO, mas também a quantidade e velocidade de seus equipamentos de comunicação. Isto, por sua vez, provocou aumento na massa do satélite e, como consequência, no custo de lançamento. Com custos crescentes, passou-se a exigir uma maior vida útil projetada destes satélites, com aumento decorrente de confiabilidade. Sistemas mais confiáveis são, inevitavelmente, mais caros e complexos. Não é de surpreender, portanto, que uma parcela significativa dos custos de lançamentos e operação seja financiada por governos, embora a participação de empresas já seja maioria. Satélites GEO atuais contam com painéis solares de grande dimensão, necessários para prover os sistemas de comunicação com a potência requerida para cobrir a grande distância que os separa do solo. Isto permite que receptores em terra possam utilizar antenas parabólicas de tamanho reduzido para receber retransmissões de TV (*broadcasting*) de satélites comerciais, como das empresas Sky e DirectTV. Ainda que se considere que alguns destes sistemas permitem a utilização de recursos limitados de transmissão sob demanda (*streaming*), os transmissores de bordo ainda não possuem capacidade suficiente para atender milhares de usuários simultaneamente em comunicação ponto a ponto. Em contrapartida eles são altamente eficientes em operações de retransmissão de dados (*gateway*). Em anos recentes o número de usuários de TV sob demanda ultrapassou tanto os usuários de transmissão por ondas de rádio

(*broadcast*) quanto os de TV por cabo nos Estados Unidos [2]. Sem apelo econômico, é bastante provável que estes sistemas desapareçam do mercado em poucos anos.

Chega-se com isso a um ponto de inflexão: sistemas satelitais baseados em retransmissão (*broadcasting*) estão em desuso, e satélites de comunicação GEO não conseguem atender a grande número de usuários simultaneamente. Acrescente-se a este problema a crescente busca por mobilidade, também não atendida por estes satélites. Estes problemas foram solucionados por meio de serviços de internet fixa (cabo ou fibra óptica, por exemplo) ou mesmo móvel, pelos provedores de internet e telefonia sem fio, que atuam em médios e grandes centros urbanos. Contudo a telefonia móvel e transmissão de dados ou TV sob demanda continuaram sem solução em áreas remotas, e em pequenos ou afastados centros urbanos. Eventualmente serviços de transmissão de dados por satélite LEO poderiam resolver estes problemas, mas antes disso diversos empecilhos teriam que ser suplantados.

Arquivos de vídeos sob demanda são reconhecidamente vorazes consumidores de canais de telecomunicação, tanto nos antigos sistemas analógicos quanto nos modernos sistemas digitais com conexão com internet. Em menor grau seguem as comunicações de vídeo ponto a ponto (*peer-to-peer*), voz em tempo real, vídeos oferecidos por servidores como Youtube ou em reuniões com vídeochamada e, finalmente, arquivos de mensagens ou informações. Qualquer que seja a solução utilizada para estabelecer uma comunicação por satélite em órbita baixa, o principal requisito a ser atendido deverá ser o atendimento a *streaming* de vídeos e transmissões ponto a ponto. A velocidade de comunicação torna-se prioritária, exigindo com isso a adoção de protocolos UDP (*User Datagram Protocol*), mais rápidos, porém menos seguros. Adicionalmente a taxa de transmissão de ambos os lados deve ser alta, da ordem de 10^6 bits por segundo (1 Mbps), podendo chegar a 10^8 . Estas taxas são modestas em sistemas a cabo ou fibra óptica, mas se tornam imensos desafios quando operadas por satélites em órbita baixa. Transmissões rotineiras de configuração de satélites com estações de solo são realizadas a taxas relativamente baixas de cerca de 100 kbits/s, no máximo. A depender da carga útil, os transmissores de dados podem atingir cifras de vários milhões de bytes a cada segundo, mas exigem, em contrapartida, antenas direcionais em solo de grandes dimensões. Como realizar tal façanha com antenas de dimensões reduzidas e móveis constitui-se, portanto, o grande desafio a ser solucionado por qualquer sistema que queira oferecer serviços de internet por satélites ao público.

Outro problema a ser enfrentado é a cobertura temporal planejada para o sistema. De forma simplificada, a cobertura pode ser entendida como a relação entre a área coberta por um sistema de comunicação e a área total considerada. Porém, a cobertura pode igualmente ser definida pelo tempo total de serviço oferecido sem interrupção das comunicações. Para diferenciá-las, emprega-se o termo cobertura espacial para a primeira, e cobertura temporal para a segunda. Satélites em órbita baixa apresentam tempos de contato com estações de solo da ordem de apenas 10 minutos a cada 100 minutos, ou seja, 10% de cobertura temporal. Para compensar esta pequena cobertura se pode inserir mais satélites em órbita, formando uma constelação. Se fosse possível separar os satélites de forma equidistante entre si cobrindo toda a Terra, então seriam necessários por volta de 350 satélites a 600 km de altitude, para possibilitar uma

transmissão com uma elevação mínima de 15 graus. A elevação mínima decorre do fato de que a comunicação solo-satélite é deficiente e ineficiente quando a visibilidade do satélite é próxima do horizonte no local da estação, devido ao maior caminho percorrido pelo sinal na parte densa da atmosfera, e porque a distância entre ambos é muito maior no horizonte. A alternativa de fazer a comunicação com centenas de satélites introduz um custo acentuado a esta solução, uma vez que orçamentos de satélites atingem facilmente valores que ultrapassam milhões de dólares cada unidade. Antes de analisar alternativas para o alto custo, deve-se considerar que uma constelação de centenas de satélites pode ainda não garantir uma boa cobertura. O motivo por trás desta afirmação é facilmente visualizado ao se considerar que a área em solo coberta por um satélite equivale a um quadrado com lados de 1200 km, de tamanho similar ao estado de Minas Gerais, Mato Grosso, Bahia, ou aos estados combinados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina. Mesmo que fosse uma área escassamente povoada, certamente haveria em área tão vasta centenas de cidades com potenciais usuários. Por sua vez, um único satélite será incapaz de atender a uma massa tão grande de clientes mantendo uma taxa de transmissão similar à de um vídeo sob demanda para cada um. Obviamente não resta alternativa a não ser aumentar a constelação, que sai de centenas de satélites e passa a contar com milhares deles. Além de aumentar o custo, selecionar as órbitas necessárias e manter os satélites suficientemente espalhados por toda a área coberta torna-se um desafio imenso de lógica e engenharia. Para compreender este processo será necessário abordar os tipos e geometrias possíveis para as constelações de satélites. Este tópico será apresentado na próxima seção.

3.1 Constelações

Constelações de satélites são grupos de satélites iguais ou similares, que visam cumprir objetivos que só podem ser alcançados em conjunto. Observação da Terra em intervalos curtos de tempo, navegação e comunicação em órbita baixa são exemplos de objetivos típicos de constelações. As constelações são caracterizadas pela escolha criteriosa das órbitas dos satélites que as integram, com números que variam entre 2 a milhares de satélites operando simultaneamente em suas órbitas. Os satélites de coleta de dados (SCD) desenvolvidos no Brasil pelo INPE e lançados na década de 1990 formam uma constelação de 2 satélites, uma vez que suas órbitas foram ajustadas para aumentar o número de passagens dos satélites pelo país. Estes satélites possuem retransmissores (transceptores) que recebem informações meteorológicas de estações operadas remotamente e as enviam para o solo novamente, sendo então recebidas pela estação do INPE em Cuiabá. A inclinação de 25 graus dos satélites SCD foi escolhida para atender dois objetivos: maximizar o número de passagens de cada satélite pelo país a cada dia e permitir que as estações de coleta de dados localizadas no ponto mais meridional do Rio Grande do Sul conseguissem se comunicar com o satélite ao menos uma vez ao dia. Esta órbita, contudo, faz com que diariamente ocorram passagens nas quais o satélite encontra-se no hemisfério Norte, inviabilizando o contato com estações do Brasil. Para minimizar este problema, as órbitas foram selecionadas de forma a fazer com que seus planos fossem inclinados entre si em 50 graus, de tal forma que quando um deles estivesse passando sobre o hemisfério Norte o outro passaria sobre o hemisfério Sul e vice-versa. Equivalentemente, este arranjo fez com que a ascensão reta da segunda órbita fosse defasada em 180 graus em relação à primeira. Como estes satélites não possuem propulsores para corrigir e manter sua órbita, é

natural que esta defasagem se afaste gradativamente daquela previamente selecionada, mas, ainda hoje, a defasagem é de 142° , mais de 27 anos decorridos do lançamento.

Diversas são as formas possíveis de se classificar as órbitas de uma constelação. Qualquer que seja a classificação haverá sobreposição entre elas, isto é, duas constelações diferentes sob um determinado parâmetro de classificação podem ser agrupadas dentro da mesma classe em outro parâmetro. Descrever as possíveis formas de se constituir uma constelação é, portanto, o caminho que permite melhor compreendê-las.

1) Simetria geométrica

Uma constelação pode exibir uma simetria geométrica entre os planos orbitais com um ou mais satélites em cada plano. Em contrapartida, constelações sem simetria não exigem arranjo orbital preciso. A constelação GPS adota configuração simétrica, com 6 planos orbitais distintos. Outro exemplo são as órbitas dos satélites de telecomunicação russa Molniya, com 4 planos inclinados. Em geral as alterações na órbita causadas por fenômenos naturais podem ser suportadas facilmente na constelação, sem perda de efetividade. Porém, a inserção em órbita requer ajustes precisos que podem exigir sistemas de propulsão no satélite, aumentando seu custo.

2) Manutenção de fase

Quando dois ou mais satélites da constelação ocupam a mesma órbita, a distância entre eles pode ser especificada preliminarmente e, como consequência, deverá ser controlada após a injeção em órbita. A constelação GPS é um exemplo deste requisito, assim como a Molniya. Sem uma defasagem específica, os satélites que compartilham a mesma órbita tendem a se aproximar ou se afastar uns dos outros, prejudicando com isso a comunicação com o solo, pois podem ocorrer períodos nos quais nenhum satélite da constelação sobrevoe um dado local. Por exemplo, a constelação GPS exige que um número mínimo de 4 satélites seja visto a qualquer instante em qualquer ponto do planeta. Igualmente, sem a manutenção da fase entre os satélites haveria perda de sincronismo na comutação da comunicação na constelação Molniya. A manutenção de fase requer um sistema de propulsão a bordo do satélite para efetuar eventuais correções da sua posição na órbita. A propulsão utiliza combustíveis consumíveis, limitando o alcance e a duração da vida do satélite, e estes fatores devem ser considerados no projeto da constelação.

3) Conexão solo-satélite

Como mencionado anteriormente, a potência do transmissor de bordo é limitada pela restrição de geração de energia em órbita. Painéis fotovoltaicos embarcados nos satélites, capazes de gerar energia renovável, apresentam baixo rendimento na conversão de energia e requerem sistemas articulados para aumentar a área de coleta. Sistemas mecânicos apresentam frequentemente problemas em órbita, e não faltam exemplos de painéis que falharam durante a sua abertura. A baixa potência gerada a bordo é compensada com o uso de antenas direcionais tanto no satélite quanto em solo.

Uma alternativa, até certo ponto utilizada quando não se dispõe em Terra de antenas direcionais rastreadoras do movimento, consiste em empregar baixa frequência na portadora do sinal, na faixa de VHF ou UHF com antenas onidirecionais, mas, em contrapartida, ocorre uma redução dramática da taxa de transmissão, que atinge apenas alguns milhares de bytes por segundo. Em tempos recentes a utilização de rede de antenas faseadas viabilizou uma solução de baixo custo e de tamanho reduzido, permitindo que altas taxas sejam atingidas com baixa potência, como será visto adiante.

4) Constelação por saturação

Quando o número de satélites requeridos para a constelação atinge e ultrapassa alguns milhares, não se consegue manter uma geometria orbital fixa, nem tampouco a fase daqueles que ocupam uma mesma órbita. O melhor a fazer é criar algumas dezenas de planos orbitais e agrupar os satélites nestes planos. A depender dos objetivos da constelação, sequer a altitude é especificada, basta tão somente estar em órbita. Por meio de lançamentos múltiplos, isto é, com diversos satélites sendo colocados em órbita simultaneamente, pode-se garantir uma separação entre eles com pequenos ajustes de velocidade durante o processo de ejeção de cada um. Caso necessário pode-se equipar os satélites com pequenos propulsores e com combustível, suficiente somente para afastá-los entre si. A constelação do Starlink utiliza esta configuração orbital, e é bastante provável que seus competidores, previstos para entrarem em serviço em poucos anos, seguirão a mesma tendência. A Planet Labs, voltada para obtenção de imagens da Terra, utiliza dezenas de CubeSats Dove, com fator de forma 3U, agrupados em conjuntos, mas sem formação orbital específica.

Três tecnologias viabilizaram a criação de constelações de satélites de comunicação ponto a ponto, embora nenhuma delas fosse inovadora: a utilização do conceito de satélites *lean*, o emprego de rede de antenas faseadas (*phased array antennas*), e a comunicação entre satélites por meio de feixe de laser, descritas nos Apêndices [Apêndice B](#), [Apêndice C](#) e [Apêndice D](#), respectivamente.

3.2 Órbitas utilizadas pelas constelações

Constelações de satélites tiveram grande impulso em anos recentes, atingindo centenas de missões e milhares de satélites. A tendência é de crescimento mais acelerado, uma vez que diversas constelações estão sendo propostas e projetadas. Em Kulu [3], as principais constelações planejadas e em operação no mundo são apresentadas, separadas por características funcionais. Seria impraticável descrever neste relatório a imensa quantidade de constelações existentes, mas deseja-se oferecer uma visão das constelações mais importantes, com ênfase naquelas nas quais a seleção da órbita é fundamental para a operação, selecionadas em duas categorias: constelações voltadas para comunicação, e constelações com outros propósitos. Ressalta-se que as informações a respeito das empresas que comercializam serviços de comunicação por satélite foram coletadas na rede global (internet) e, portanto, podem não ser exatas. Ademais se constatou que diversos sítios continham dados desatualizados, com quatro ou mais anos de atraso. A isto se soma a total ausência de informações pertinentes a

respeito dos satélites, órbitas e sistemas de comunicação nas páginas oficiais destas constelações, que, antes de tudo, enaltecem as qualidades de seu sistema, sem, contudo, apresentar um único dado técnico relevante.

3.3 Constelações diversas

As primeiras constelações de satélites surgiram da necessidade de garantir continuidade das transmissões pelo acréscimo de mais satélites em substituição daqueles que se aproximavam do período previsto de vida útil. Estes procedimentos eram mais necessários em satélites geoestacionários voltados para comunicação e para meteorologia. Depois seguiram satélites de navegação e, recentemente, constelações voltadas para observação da Terra. Alguns exemplos destas constelações são:

1. TDRS

A constelação de satélites TDRS (*Tracking and Data Relay Satellite System*) foi concebida para incrementar a transmissão de dados nas missões tripuladas da NASA, que requeriam um maior tempo de contato com as estações de solo e maior taxa de transmissão de dados. O objetivo foi estabelecer uma forma eficiente de transmissão de comunicações entre o centro de comando e as missões dos ônibus espaciais (*Space Shuttle*), mas hoje atende a estação espacial internacional (ISS), além de outros satélites em órbita baixa que demandam alta taxa de transmissão, como o telescópio Hubble, por exemplo. Originalmente pretendia-se dispor de dois satélites em órbita geossíncrona, posteriormente estendido para três, separados em órbita por ângulos próximos de 120° , em formação de triângulo equilátero, ocupando posições sobre os oceanos Atlântico, Índico e Pacífico, como é mostrado na Figura 3.1. A constelação conta, atualmente, com 8 satélites, ainda mantendo a formação triangular. Os satélites TDRS podem se comunicar com as espaçonaves em órbita baixa, com estação de solo ou mesmo com outros satélites da constelação por meio de antenas direcionais, permitindo com isso uma cobertura completa da Terra.



Figura 3.1 – Constelação TDRS em órbita geossíncrona [8].

2. Molniya

As órbitas dos satélites de telecomunicação russa Molniya possuem simetria apenas na direção do eixo polar terrestre. Mesmo assim, como pode ser visto Figura 3.2, com as órbitas em vista polar, a simetria entre as quatro órbitas não é perfeita, embora o sincronismo nas posições relativas entre os satélites permaneça restrito dentro de limites estreitos para garantir a continuidade da comunicação.

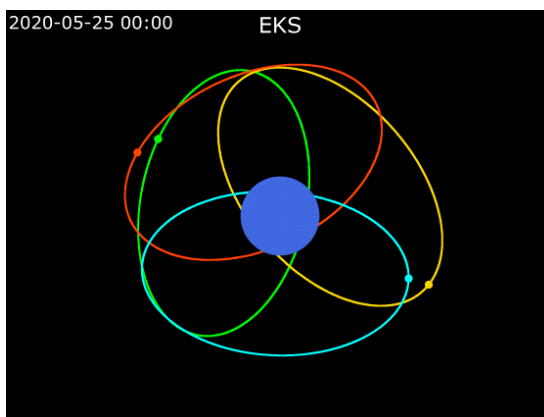


Figura 3.2 – Vista polar das órbitas Molniya [7].

3. GPS

A constelação GPS (*Global Positioning Satellite System*) evoluiu a partir dos satélites Navstar que foram os pioneiros de posicionamento e navegação por satélites, desenvolvidos pelo Departamento de Defesa norte-americano. A constelação utiliza uma configuração com geometria simétrica de órbita, com 6 planos orbitais defasados de 60° nos nodos ascendentes e inclinação de 55° (veja-se o Apêndice A). Quatro satélites são posicionados em cada órbita, mas não ficam igualmente separados de 90° entre eles, mas sim de 30° , 105° , 120° e 105° . A constelação utiliza ao todo 24 satélites. A altitude é ajustada próxima de 20200 km para que o período orbital seja igual à metade da duração de um dia sideral, e corresponde a 11 horas, 58 minutos e 2 segundos. Esta órbita garante que qualquer ponto sobre a Terra observe ao menos seis satélites da constelação GPS simultaneamente (Figura 3.3). Atualmente o GPS utiliza órbitas adicionais, não mais mantendo uma relação geométrica entre elas, mas assegurando ainda a visibilidade requerida.

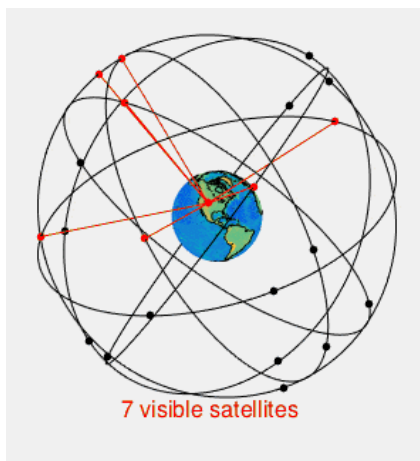


Figura 3.3 – Geometria das órbitas utilizadas pela constelação GPS [6].

4. Glonass

Glonass é uma constelação russa voltada para posicionamento e navegação, bastante semelhante ao GPS. A constelação é composta por 24 satélites em 3 planos defasados de 120° , com oito satélites em cada plano, defasados de 45 graus entre eles. Há também uma defasagem de 15° entre os satélites na posição orbital entre planos diferentes (Figura 3.4). A altitude da constelação é de 19140 km (ligeiramente abaixo da constelação GPS) com período de 11 horas e 15 minutos, e com $64,8^\circ$ de inclinação em relação ao plano do equador (ver Apêndice A). Embora o sistema tenha sido desenvolvido na Rússia, o acesso aos dados de navegação é disponibilizado a todos os usuários. Geralmente, os receptores GPS conseguem igualmente rastrear os satélites Glonass, além dos satélites da constelação de posicionamento europeu Galileo.



Figura 3.4 – Constelação de posicionamento e navegação Glonass [9].

5. BeiDou (Compass)

BeiDou (Colher do Norte, em chinês, referindo-se à constelação de Ursa Maior) é um sistema de posicionamento global por satélites, semelhante ao GPS norte-americano. É composto por 24 satélites em três planos orbitais em órbita MEO a 21500 km de altitude,

com oito satélites em cada plano (a ser confirmado), mais 3 satélites em órbita geoestacionária e 3 em órbita geossíncrona, estes últimos cobrindo todo leste asiático, incluindo a Índia, a Austrália, Japão e boa parte do Pacífico. O sistema BeiDou está entre os mais precisos sistemas de posicionamento global, tendo atingido uma precisão abaixo de 1 cm em pós-processamento recentemente [25].

6. Galileo

A constelação Galileo consiste de um conjunto de 30 satélites para navegação global da ESA (*European Space Agency*). Atualmente a constelação está em fase final de implantação, com os lançamentos dos últimos satélites a serem incorporados. Dos sistemas de navegação global, que inclui o GPS, o Glonass e o BeiDou, o Galileo é o único concebido e voltado para uso civil [23]. Utiliza uma configuração de três planos orbitais separados de 120° com inclinação de 56° em órbita circular a uma altitude de 23222 km [24]. Cada plano contém 9 satélites operacionais igualmente espaçados e mais um de reserva (Figura 3.5).

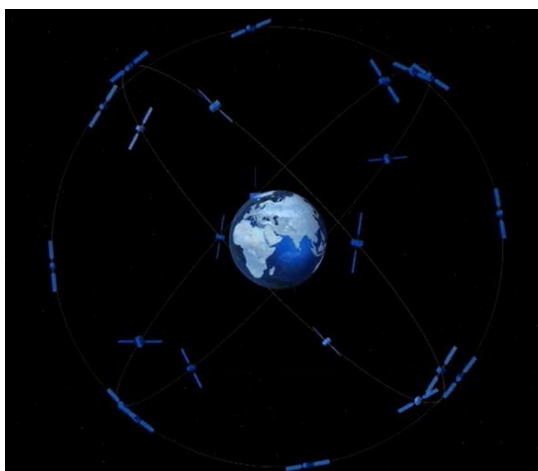


Figura 3.5 – Constelação Galileo para navegação global [23].

3.4 Constelações para comunicações

As primeiras constelações voltadas para comunicação por satélites surgiram logo depois que se tornou possível atingir as órbitas geoestacionárias, em fins da década de 1960 e início da década de 1970. Não eram constelações no sentido de formarem uma composição orbital, mas apenas reposição de repetidores de sinal alocados em determinadas posições da órbita GEO. Constelações de comunicação em órbita baixa tiveram impulso somente quando a demanda por conexão com internet de alta velocidade (*high bandwidth*) e baixa latência tornou-se mandatória, no início do milênio atual. A partir daí o número de objetos em órbita teve um crescimento exponencial, como pode ser observado na Figura 3.6 [28]. A maioria dos lançamentos tem como função abastecer as constelações de comunicação em órbita baixa, suportadas por empresas norte-americanas, embora o gráfico inclua também alguns poucos lançamentos de satélites convencionais, sondas interplanetárias, missões tripuladas e voos de reabastecimento das estações espaciais. A descrição de algumas das empresas que possuem ou utilizam estas constelações é apresentada a seguir, em ordem alfabética, exceto a Starlink, que

será apresentada na próxima seção, e algumas promissoras constelações em órbita baixa, concorrentes da Starlink, que serão apresentadas na seção 5.

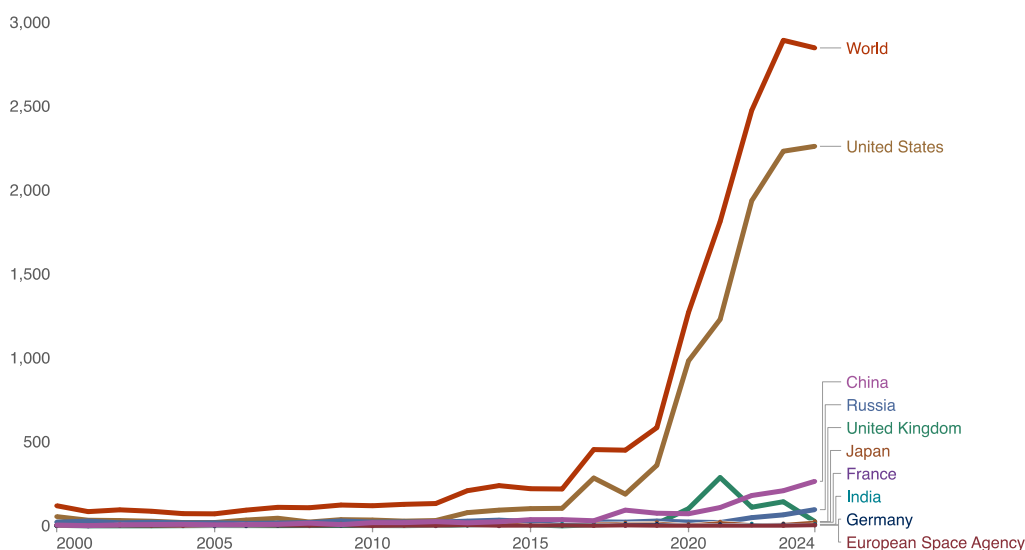


Figura 3.6 – Número de objetos lançados no espaço nos últimos 25 anos [28].

1. AST SpaceMobile

A AST SpaceMobile é uma empresa sediada nos EUA, voltada para comunicação direta com celulares, ainda em processo de implantação, sendo bem-sucedida nos diversos testes realizados. Atualmente estão sendo produzidos os satélites que farão parte da constelação. Serão postos em órbita 243 satélites em 16 planos a 740 km de altitude. A comunicação direta entre satélites e celulares requer grandes antenas desdobráveis em órbita. O satélite BlueWalker 3 da SpaceMobile, já em órbita, possui uma antena de 64 m².

2. EchoStar

EchoStar atua no ramo de oferta de sistemas de comunicação por satélites e serviços de internet. Em 2011 a EchoStar adquiriu a Hughes Network Systems, que comercializa serviços de internet por satélites para consumidores e empresas. Contudo, a Hughes Network System (27 continua a atuar plenamente como HughesNet, atendendo, inclusive, um grande número de clientes no Brasil. Além da Hughes, a EchoStar também incorporou diversas outras companhias, como a Boost Mobile, Dish e Sling. A EchoStar é proprietária de ao menos 12 satélites em órbita geoestacionária [26], capazes de atender vídeos sob demanda e internet, embora com latência maior do que 0,1 segundo.

3. Globalstar

A Globalstar é uma empresa fundada em 1991 a partir de um projeto conjunto da Qualcomm e Loral Corporation, com intenção de explorar o mercado de telefonia móvel por satélite. Os primeiros satélites da constelação foram lançados em 1998, e, após testes bem-

sucedidos, foram colocados em órbita 44 satélites quando então se iniciou a oferta de serviços, no ano 2000 [20]. Pouco tempo depois a Globalstar demonstrou capacidade de coletar e transmitir para satélites informações coletadas em voo de aeronaves, incluindo voz, dados e até vídeo, abrindo com isso um potencial mercado nas companhias aéreas. Hoje a Globalstar é pioneira e principal fornecedor de sistemas de rastreamento de veículos, frotas de caminhões, navios e aeronaves, por meio do sistema SPOT, que agrega num pequeno aparelho um receptor GPS e um transmissor-receptor de dados com os satélites da constelação. Desta forma a localização exata do portador pode ser recebida interruptamente numa central em qualquer ponto do globo. Os satélites não armazenam nem processam os dados recebidos, mas simplesmente retransmitem para uma central de redirecionamento (*gateway*) em solo. Portanto, para que a transmissão ocorra, ambos, transmissor em terra e central, devem ter visibilidade simultânea de um dos satélites. A central, por sua vez, está conectada tanto na rede internet quanto na rede telefônica, permitindo, com isto, chamadas em voz a partir de terminais portáteis móveis (*handheld*). A constelação é formada por 48 satélites, em seis planos orbitais com oito satélites em cada plano, a uma altitude de 1414 km e inclinação orbital de 52°. Regiões polares não são atendidas pela Globalstar [19].

4. Inmarsat

Inmarsat é uma empresa de telecomunicações britânica dedicada à oferta de serviços de comunicação móvel, baseado integralmente em satélites geoestacionários. A constelação, sem formação orbital específica, conta com satélites para cobertura global, equipados com antenas de alto ganho, e com satélites voltados para coberturas regionais, usando antenas com lóbulos direcionais. As antenas da geração de satélites I-3 possuem de 4 a 6 feixes direcionais enquanto as da geração I-4 possuem 19 feixes para atendimento regional. Estes feixes de alto ganho aumentam a taxa de transferência de dados e, ao mesmo tempo, reduzem as dimensões das antenas de solo. Além destes, os satélites da geração I-4 oferecem cerca de 200 feixes estreitos (*narrow beams*), que permitem antenas de solo ainda menores e taxas de dados mais elevadas. Estes feixes estreitos são utilizados pelos terminais portáteis GPS da Inmarsat. Quatro satélites da geração I-5 foram dispostos na órbita geoestacionária a partir de 2013, com 89 feixes cada [30] (ver Figura 3.7), e, em 2021, o primeiro satélite da geração I-6 foi lançado. Neste mesmo ano a Inmarsat foi adquirida pela Viasat, mas continua mantendo suas operações de forma individual e compartilhando alguns dos serviços oferecidos, entre eles a telefonia móvel, IP (internet) móvel para empresas e aviação, e supervisão remota de veículos, frotas marítimas e aeronaves.

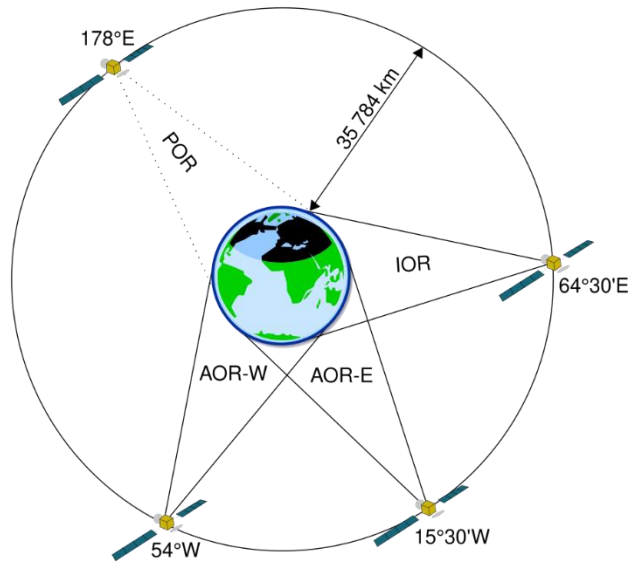


Figura 3.7 – Satélites da geração I-5 em órbita geoestacionária [30].

5. Intelsat

A Intelsat foi originariamente criada em 1964 com o nome ITSO (*International Telecommunications Satellite Organization*), como um consórcio intergovernamental (estatal) para operar uma constelação de satélites de telecomunicações e prestar serviços de tele-difusão. Em 2001 a Intelsat foi privatizada passando o controle para uma corporação de Luxemburgo. A Intelsat foi pioneira na comunicação por meio de satélites geoestacionários, tendo lançado e operado cerca de 150 satélites em órbita GEO, dos quais mais de 40 estão ativos (Figura 3.8). Atualmente a Intelsat oferece serviços de comunicação móvel para embarcações e aeronaves, teledifusão e conexão terrestre por fibra óptica entre suas estações de roteamento (*gateways*) [32]. Em 2023, após passar novamente por dificuldades financeiras, a Intelsat foi comprada pela empresa SES de Luxemburgo.

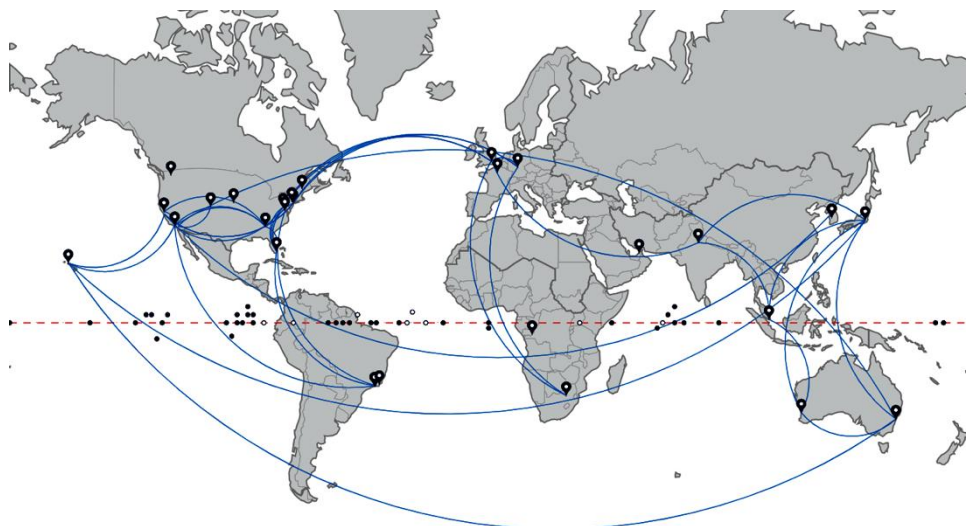


Figura 3.8 – Constelação Intelsat mostrando os satélites GEO, e roteadores em solo conectados por fibra óptica (linhas azuis) [33].

6. Iridium

A constelação Iridium foi concebida para permitir conexão de telefonia móvel em qualquer local do planeta a partir de um transmissor-receptor portátil, semelhante a um telefone celular. Como a potência do transmissor teria que ser muito alta para permitir comunicação em órbita geoestacionária, decidiu-se investir em uma constelação em órbita baixa quase polar, o que permitiu que as antenas receptoras onidirecionais em solo fossem compatíveis com um telefone portátil. Os satélites Iridium estão inseridos em seis planos orbitais defasados de 30 graus, com 11 satélites em cada órbita, perfazendo o total de 66 satélites, a uma altitude de 781 km, com inclinação de $86,4^\circ$ [5], como pode ser visualizado na Figura 3.9. Cada satélite pode comunicar-se com uma estação em solo, mas comunica-se também com os satélites à frente e atrás na sua órbita, além dos satélites à esquerda e à direita nos planos orbitais próximos. Esta estratégia permite que dois aparelhos em qualquer local do globo possam se comunicar por meio exclusivo de conexões entre os próprios satélites da constelação. Para se comunicar com a rede de telefonia fixa o sinal percorre a constelação até chegar ao satélite que sobrevoa a estação de solo, e de lá é enviado para a estação e segue por rede telefônica normal. Embora exista uma latência inerente em virtude dos diversos nós percorridos pelo sinal, ainda assim o atraso não chega a 1 segundo.

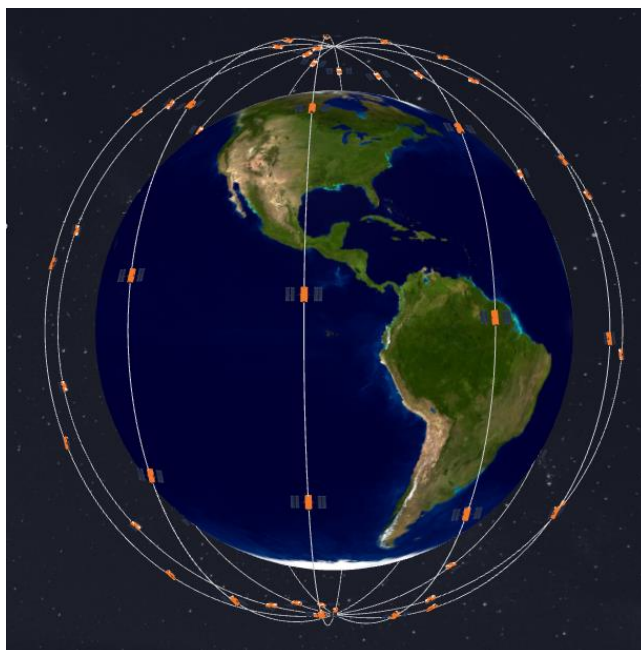


Figura 3.9 – Constelação de satélites em órbita baixa Iridium [10].

7. Lynk Global

Lynk Global é uma pequena empresa norte-americana dedicada a prover um serviço direto de telefonia móvel por meio de uma constelação de satélites em órbita baixa e cobertura global. A empresa encontra-se ainda em fase inicial de implantação, mas com tecnologia já comprovada em órbita. Possui sete satélites em órbita hélios síncrona (inclinação ao redor de 97°), entre 450 e 525 km de altitude. Pretende colocar em órbita milhares de satélites [21].

8. Orbcomm

A Orbcomm tem foco na oferta de produtos voltados para segurança patrimonial, incluindo IoT (*internet of Things*) e equipamentos para rastreamento de veículos, navios e aeronaves [22]. Para atingir ampla cobertura e permanente acesso nos equipamentos de rastreo, a Orbcomm investiu em uma constelação de satélites em órbitas baixas. A taxa de transmissão é baixa e não há requisitos de latência mínima, pois a comunicação é realizada apenas com mensagens de dados. Os transmissores em solo operam em TDMA (*Time-Division Multiple Access*) na frequência de VHF [78]. Foram lançados 35 satélites da primeira geração (OG-1) em meados da década de 1990, dos quais 24 ainda estão ativos, a 720 km de altitude e 45° de inclinação, em seis (TBC) planos orbitais. Os primeiros satélites da segunda geração (OG-2) foram injetados em órbita a partir de 2012, na altitude de 750 km e na mesma inclinação. Ao todo foram 18 satélites em três lançamentos com seis satélites em cada um [29].

9. SES

A empresa de telecomunicações SES, sediada em Luxemburgo, é hoje uma das maiores da área de comunicação por satélites. Originalmente a SES (*Société Européenne des Satellites*) foi criada para operar satélites com suporte do governo local. O seu primeiro satélite, Astra 1A, lançado em 1988 em órbita geoestacionária, foi utilizado por diversos prestadores de serviço de TV por satélite, como a Sky TV, por exemplo [31]. Ao longo dos anos mais satélites foram colocados em órbita GEO, ao mesmo tempo em que a SES incorporava diversas empresas que atuavam no ramo, tanto por junção quanto por compra, incluindo a O3b e, mais recentemente, a Intelsat, embora mantendo o portfólio de seus clientes. Com a compra da O3b a SES passou a operar também satélites em órbita MEO, e atender clientes com interesse em menor latência. Após a incorporação da Intelsat a SES passou a deter a operação de mais de 70 satélites de telecomunicações (Figura 3.10).

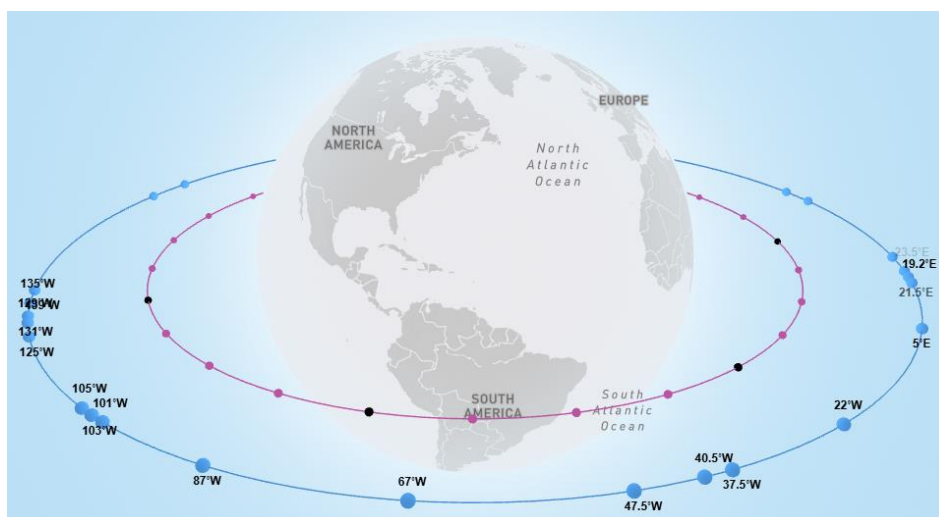


Figura 3.10 – Constelação de satélites da SES em órbita MEO (O3b) e GEO [12].

10. Viasat

Viasat é uma companhia norte-americana com foco em comunicações por satélites geoestacionários próprios e canais alugados de outros satélites, incluindo também o satélite de telecomunicações SGDC-1 do Brasil. O serviço de internet fixo utiliza antenas parabólicas de pequeno porte, mas a empresa oferece também serviços móveis. Por usar satélites GEO, a latência do sistema é mais elevada, podendo atingir mais de um segundo, comprometendo, com isto, eventos como reuniões realizadas por vídeo conferência e jogos multiusuários, por exemplo. Seus maiores clientes são entidades militares e empresas norte-americanas. Em anos recentes passou a atender também residências tanto nos Estados Unidos quanto no Brasil, com ampla penetração principalmente em áreas rurais e remotas. Em 2021 a Viasat adquiriu a empresa britânica Inmarsat, que já detinha, na época, serviços de comunicações com diversos satélites em órbita GEO [79]. Atualmente a Viasat opera com cerca de sete satélites próprios.

4 Starlink

A Starlink é uma empresa norte-americana voltada para a oferta de serviços de internet em banda larga com baixa latência a consumidores e empresas por meio de uma constelação de satélites em órbita baixa (LEO). Para conseguir alta taxa de transferência e grande cobertura, a solução encontrada pela Starlink foi aumentar o número de satélites da constelação. Em meados de 2025 a Starlink dispunha de mais de 7000 satélites em órbita a 550 km de altitude, com previsão de atingir 12000 nos anos seguintes, e conseguir aprovação de extensão para 30000. Como comparação, menciona-se que o número total de satélites operacionais em órbita da Terra em 2015 era ao redor de 2000 [17]. A empresa conta com mais de quatro milhões de clientes, e atende mais de 100 países em todos os continentes [17]. A previsão é que o número de clientes atinja seis milhões em junho de 2025. O custo estimado da constelação, incluindo projeto, produção dos satélites, terminais de usuário, estações de solo e lançamento é por volta de 10 bilhões de dólares.

4.1 Sistema Starlink

A Starlink, ou a Constelação Starlink, é um sistema de comunicações espaciais composto por uma infraestrutura de solo e por uma constelação de milhares de satélites em órbita baixa (LEO – *Low Earth Orbit*) que fornece serviço de acesso de alta velocidade à internet para usuários localizados em praticamente qualquer lugar da superfície terrestre, especialmente nos locais sem a cobertura dos sistemas de comunicação convencionais. O acesso oferecido é adequado para a transmissão de *streaming* de vídeo, chamadas de vídeo, jogos on-line e outros serviços da internet que demandem alta taxa de transferência de dados [44]. Os usuários, indivíduos ou empresas, podem estar estáticos, com localização geográfica fixa ou variável no tempo, ou estarem em movimento, a bordo de veículos terrestres ou de embarcações [54].

Pertencente à empresa americana SpaceX, a Starlink entrou em operação em novembro de 2019 com 60 satélites da versão 0.9, utilizando a banda Ku para a comunicação com os terminais dos usuários. Em maio de 2025 havia 7.578 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 subconstelações em órbitas com diversas altitudes 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 [55, 56]. Mais recentemente a empresa tem se movimentado para também oferecer acesso à constelação por meio de telefones celulares.

4.2 Histórico

Elon Musk, o CEO (*Chief Executive Officer*) da empresa SpaceX, anunciou em janeiro de 2015 a intenção da empresa de lançar um serviço de internet por satélites que utilizaria em torno de 4.000 artefatos espaciais em órbita baixa [56]. Todavia, de acordo com Handmer [57], a SpaceX já trabalhava na concepção desse serviço de internet desde 2012. Em novembro de 2016 a empresa pediu à *Federal Communications Commission* (FCC), órgão federal dos Estados Unidos

responsável pelo licenciamento de sistemas satelitais, autorização para a construção e operação da sua constelação de satélites a qual, na documentação para a FCC, foi chamada de SpaceX NGSO Satellite System (NGSO – *Non-Geostationary Orbit*) [58]. O tipo de serviço satelital que seria ofertado pela constelação era do tipo fixo (FSS – *Fixed Satellite Service*).

Em um dos documentos integrantes da solicitação de autorização para a FCC a SpaceX forneceu alguns detalhes técnicos da constelação de satélites pretendida destacando-se o total de 4.425 satélites operacionais (i.e., não incluindo os satélites sobressalentes em órbita), a utilização de 83 planos orbitais, com diferentes inclinações, e de 5 altitudes distintas variando entre 1.110 km e 1.325 km [59]. Conforme o planejamento apresentado na documentação para a FCC, na fase inicial do projeto, a SpaceX pretendia lançar 1.600 satélites na altitude de 1.150 km e, na fase final, 2.825 satélites distribuídos nas altitudes 1.110 km, 1.130 km, 1.275 km e 1.325 km. Para ajudar a detalhar o projeto da constelação a SpaceX lançou em fevereiro de 2018 os protótipos dos satélites da futura constelação, denominados Tintin A e Tintin B [61].

Após um período de consulta pública e de respostas aos questionamentos feitos por empresas e outras entidades potencialmente afetadas pelo projeto da SpaceX, em março de 2018 a FCC autorizou a construção e operação da constelação de satélites com algumas restrições e condicionantes em relação ao pedido original da SpaceX [59].

Os resultados obtidos com o voo dos dois protótipos dos satélites levaram a SpaceX a solicitar alteração da altitude dos satélites de parte da constelação. Assim, em novembro de 2018, a SpaceX solicitou à FCC autorização para mudança na licença obtida meses antes alterando a composição da casca da constelação com altitude de 1.150 km da seguinte forma: redução da altitude para 550 km; redução do total de satélites de 1.600 para 1.584; redução dos planos orbitais de 32 para 24; aumento da quantidade de satélites por plano orbital de 50 para 66. A inclinação dos planos orbitais foi mantida em 53° [61]. Com esse pedido de alteração o número total de satélites da constelação reduziu de 4.425 para 4.409 satélites. Este pedido de modificação foi aprovado pela FCC em abril de 2019 [62].

Como consequência da experiência ganha com os satélites lançados a partir de fevereiro de 2018, em abril de 2020 a SpaceX solicitou à FCC nova autorização de modificação da sua licença obtida em março de 2018 para alterar a configuração das órbitas da sua constelação destacando-se a redução das altitudes dos satélites da faixa 1.110 km – 1.325 km para a faixa 540 km – 570 km, aumento da quantidade de planos orbitais dos satélites da altitude de 550 km, e redução do total de satélites de 4.409 para 4.408 satélites [63].

Em maio de 2020 a empresa pediu à FCC autorização para a construção e operação da segunda geração da sua constelação de satélites de órbita não-geoestacionária com previsão de atingir 30.000 satélites. Nesse novo pedido a SpaceX distribuiu 30.000 satélites em oito altitudes variando entre 328 km e 614 km e utilizando 75 planos orbitais com inclinação entre 30° e 116° . Essa nova geração também pretende usar frequências da banda E (71 – 76 GHz, 81 – 86 GHz) para comunicação com as estações gateway em solo, além das frequências na banda Ka, já utilizadas na geração anterior [64]. Estas modificações foram aprovadas pela FCC em abril de 2021 [65].

Em agosto de 2021 a empresa pediu à FCC alteração do seu pedido para operação da segunda geração dos satélites da sua constelação. De acordo com este pedido, a SpaceX se propôs a utilizar 9 altitudes distribuídas entre 340 km e 614 km, 12 a 48 planos orbitais dependendo da altitude e com inclinação entre 33° e 116°, 12 a 120 satélites por plano dependendo da altitude, e total de 29.988 satélites [66].

A primeira geração da constelação, autorizada em março de 2018, ainda teve novos pedidos de modificação em julho de 2022 [67] e em setembro do mesmo ano [68]. Esses pedidos abordaram modificações para permitir a oferta do serviço móvel de satélite (MSS – *Mobile Satellite Service*) nas bandas de frequências 1.610 – 1.617,75 MHz, 2.020 – 2025 MHz (enlaces de subida) e 2.483,5 – 2.500 MHz (enlaces de descida).

Em dezembro de 2022 a FCC autorizou a segunda geração da constelação de satélites e o seu pedido de modificação, conforme as solicitações da SpaceX de maio de 2020 e agosto de 2021 descritas acima [69]. Essa autorização continha, todavia, alguns condicionantes dentre os quais se destaca a limitação temporária da quantidade total de satélites a 7.500 artefatos, em vez dos 29.988 solicitados.

Em fevereiro de 2023 a SpaceX fez solicitações de mudança da constelação (primeira geração) para permitir a comunicação direta com celulares no território dos Estados Unidos [70, 71]. Na mesma data a empresa pediu modificações para a segunda geração da constelação para permitir a oferta do serviço móvel por satélite (MSS) [72, 73]. Novos pedidos de modificação foram feitos em março de 2023 [74] e abril de 2024 [76] para permitir a operação dos satélites da segunda geração da constelação na banda V (enlaces com os usuários e com as estações gateway). A autorização para operação da segunda geração da constelação para comunicação direta com celulares fora território dos Estados Unidos foi solicitada em março de 2024 [76].

A autorização da FCC para o uso da banda E, conforme a solicitação da SpaceX de maio de 2020, e para uso da banda V, conforme a solicitação de março de 2023, foi concedida em março de 2024 [77]. O uso da banda V pela segunda geração da constelação, limitado aos satélites das altitudes 340 km, 345 km, 350 km e 360 km conforme a solicitação de abril de 2024, foi autorizado em novembro de 2024 [76].

O sumário apresentado acima listou os principais acontecimentos regulatórios relacionados com a Federal Communications Commission até junho de 2025. Até essa data, diversas solicitações da SpaceX de menor relevância para a visão geral da Constelação Starlink continuavam pendentes. Além disso, como pode ser deduzido do histórico apresentado, a Constelação está em constante mudança, o que torna permanente o processo de relacionamento com a FCC e com os órgãos regulatórios dos outros países em que a Starlink possui usuários ou estações gateway.

4.3 Satélites

Para reduzir os custos de lançamento da constelação Starlink, os satélites foram concebidos e projetados com massa e volume reduzidos, para com isso permitir lançamentos múltiplos. A

massa foi reduzida com emprego de componentes eletrônicos altamente integrados e antenas planares (rede de antenas faseadas). Adotou-se também como premissa uma geometria planar, de pouca espessura, para permitir um empilhamento dos satélites no veículo lançador (Figura 4.1). Com isto se tornou possível colocar em órbita até 60 satélites em um único lançamento. Após a injeção em órbita os satélites abrem seus painéis numa direção ortogonal ao plano das antenas (

Figura 4.2)



Figura 4.1 – Sessenta satélites Starlink empilhados no último estágio do lançador [17].

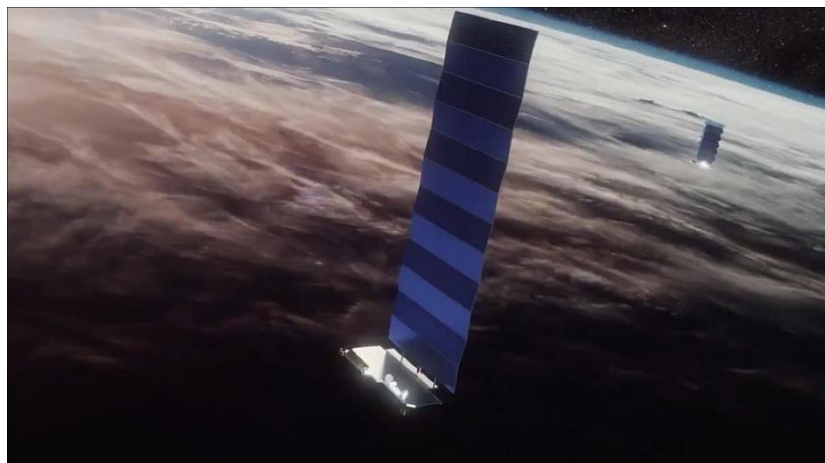


Figura 4.2 – Configuração em voo dos satélites Starlink, com painéis solares abertos [17].

Os satélites sofrem atualizações periódicas no seu projeto, buscando incorporar melhorias nas características dos transmissores e mudanças visando reduzir interferências da constelação com o ambiente espacial. A primeira versão foi denominada de 0.9, constou de apenas 60 satélites, e serviu para demonstrar a viabilidade e apontar deficiências. Com acréscimo de mais antenas e outros dispositivos no satélite, a massa migrou de 227 kg da primeira versão para 260 kg (Versão 1.0) (Figura 4.3, esquerda), com pouco menos de 1700 satélites injetados em órbita. A Versão 1.5 foi concebida para utilizar a comunicação intersatélites [41], por meio de laser óptico, com massa aumentada para 310 kg (Figura 4.3, direita) e quase 3000 unidades em órbita. O aumento da capacidade e melhoria de desempenho será conseguido com a incorporação das novas gerações de satélites (V2), com maior massa e maiores painéis solares que seus predecessores. A segunda geração terá massa de 1250 kg, e, devido ao seu volume, terá que ser colocada em órbita pela nave Starship, também da SpaceX, que ainda não se encontra operacional para voos comerciais. Em virtude deste atraso, a empresa investiu numa versão intermediária da geração V2, denominada de V2 Mini, com massa de 740 kg e com aproximadamente o dobro do volume dos satélites da primeira geração na configuração de lançamento (Figura 4.4, esquerda), e posteriormente modificada para incluir um painel extensível para antenas faseadas (Figura 4.4, direita), identificada por V2 Mini D2C. O propulsor de ambos passou a utilizar argônio em substituição ao criptônio empregado nas gerações anteriores. Os satélites V2 Mini foram lançados com o Falcon 9, da SpaceX, com 22 satélites empilhados na coifa do lançador, contra 60 satélites da primeira geração. Estes satélites constituem majoritariamente o grupo orbital 6 (ver seção 4.4).

Cálculos indiretos permitem especular que a capacidade de transmissão da versão 1.0 dos satélites Starlink esteja próxima de 18 Gbps [50]. Até o momento não se tem informação se a versão 1.5 teve sua capacidade aumentada ou não. A capacidade dos satélites V2 Mini é igualmente desconhecida, mas uma declaração da SpaceX permitiu concluir que a taxa da versão V2 pode atingir 150 Gbps, o que levaria a um total de 1250 Tbps para a constelação completa de 30 mil satélites desta geração. Alguns especialistas em telecomunicações afirmaram [53] que taxa de transmissão é proporcional à massa do satélite, o que permitiria inferir que a capacidade da versão 1.5 seria próxima de 24 Gbps, enquanto a V2 Mini teria uma taxa de 82 Gbps. Porém, todos estes valores são especulativos e não há confirmação deles por parte da SpaceX. A Tabela 4.1 apresenta as diferentes versões dos satélites.

Tabela 4.1: Versões dos satélites Starlink.

Versão	Massa (kg)	Lançados	Grupos orbitais	Largura de banda (Gbps)
V0.9	227	60	-	?
V1	260	1675	1	18?
V1.5	306	2977	2, 3, 4, 5	24?
V2 Mini	740	~4200	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17	80?
V2 Mini D2C	740	700	8, 9, 12	80?
V2	1250	0	-	150?

O sistema de controle de atitude é baseado em um sensor de estrelas e quatro rodas de reação em configuração piramidal de grande ângulo, com eixo da pirâmide ortogonal ao plano principal do satélite. Uma barra de torque magnético, aproximadamente alinhada com o campo magnético terrestre na atitude de voo, provê meios para remover o excesso de momento angular armazenado nas rodas de reação (TBC). Não foi possível encontrar informações sobre se a barra é magnetizada ou se é uma bobina de torque. Um propulsor iônico de efeito Hall com gás criptônio (Versões 1.0 e 1.5) ou argônio (Versão 2 Mini e posteriores) permite corrigir a posição orbital de cada satélite, além de prover empuxo para inserir o satélite em uma órbita de reentrada ao fim da vida útil.

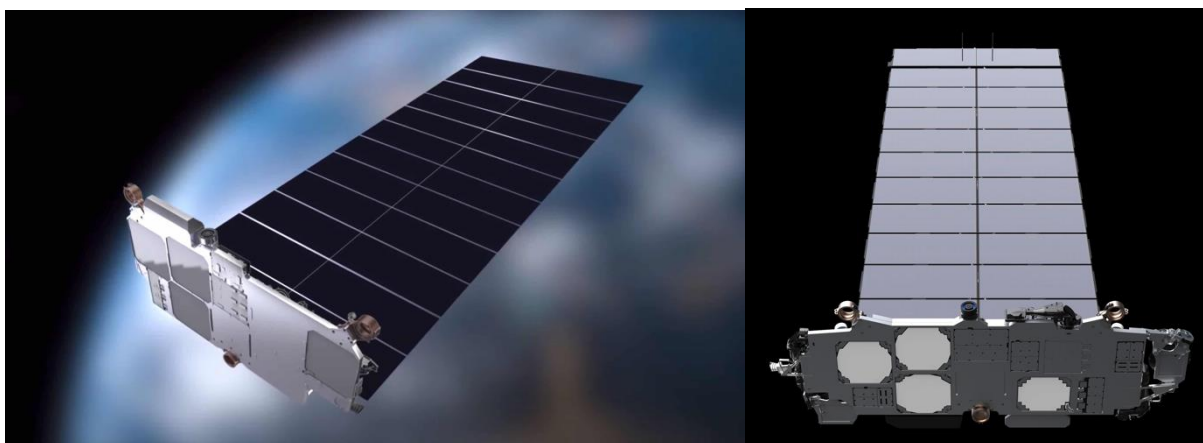


Figura 4.3 – Satélite Starlink V1.0, à esquerda, e V1.5, à direita [50].

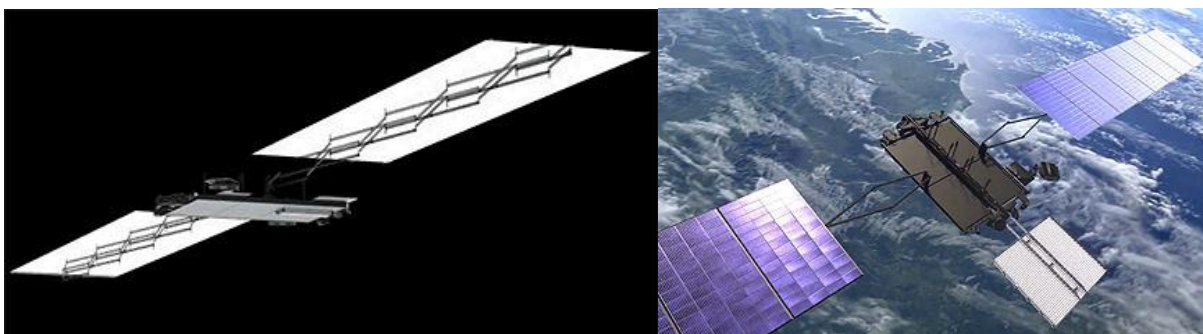


Figura 4.4 – Satélite Starlink V2 Mini, à esquerda, e V2 Mini D2C, à direita [49].

Na página oficial da constelação [44] consta que os satélites podem, de forma autônoma, rastrear objetos e outros satélites em órbitas próximas para evitar possível colisão. O rastreamento é calculado com base em arquivos do departamento de defesa norte-americano (DOD), que mantém registro dos satélites e destroços em órbita terrestre, e são enviados pela estação de controle a cada satélite da constelação. Pouca informação é disponibilizada acerca dos procedimentos necessários para que uma possível colisão seja evitada. É natural supor que os propulsores de argônio sejam utilizados para manobrar o satélite em sua órbita, mas isto teria que ser realizado com muita antecedência, uma vez que estes propulsores apresentam baixo empuxo. A SpaceX esclarece que além desta técnica, o satélite pode realizar uma manobra de atitude ao redor do seu eixo de guinada para reduzir a área do satélite projetada na direção do possível encontro, reduzindo a probabilidade da colisão.

Cada satélite é equipado com 5 antenas planares (rede de antenas faseadas) na faixa de micro-ondas Ku, entre 12 e 15 GHz, e 3 antenas parabólicas nas faixas Ka (27 a 40 GHz) e E (60 a 90 GHz), também de micro-ondas para comunicação com os terminais de solo e portais (*gateways*). Algumas referências [34] citam 4 antenas faseadas e duas antenas parabólicas; a divergência é, provavelmente, explicada por diferenças na configuração das gerações. Duas das antenas faseadas são reservadas para comunicação com o terminal do cliente em solo, enquanto as duas restantes comunicam-se com portais, caso estejam em visibilidade pelo satélite. Contudo, outras referências afirmam que as 5 antenas são para atendimento aos terminais, enquanto as três parabólicas destinam-se ao contato com as estações de solo. Se não houver visibilidade de alguma estação de solo para realizar o roteamento, então o satélite irá se comunicar com outro satélite da constelação por meio de feixe de laser (Apêndice D), e este com o seguinte, até que um deles esteja em contato com alguma estação em solo. A transmissão de dados pelas redes de antenas faseadas utiliza a modulação de amplitude por quadratura, ou QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), que permite enviar 6 bits simultaneamente, gerando uma tabela com 64 valores de amplitude e fase no sinal da portadora. A comutação para a próxima sequência de 6 bits ocorre a cada 10 nanossegundos, resultando numa taxa de transmissão de 540 Mbits/s [34]. A transmissão do satélite para o terminal do usuário (*downlink*) utiliza 92,6% do tempo útil de comunicação. O restante 7,4% é utilizado para comunicação em sentido contrário (*uplink*). Em um único segundo ocorrem diversas comutações entre *downlink* e *uplink*. A situação é invertida quando o satélite se comunica com o portal em solo, pois, neste caso, 92,6% do tempo é reservado para *uplink* da estação para o satélite.

A SpaceX divulgou que conseguiu comunicar dois satélites separados por até cinco mil quilômetros com o sistema de comunicação por laser entre satélites. Cada satélite é equipado com 3 sistemas de laser. Porém, não se conseguiu obter informação segura sobre a orientação espacial destes transceptores com relação ao satélite, embora algumas imagens da versão 1.5 indiquem que haveria um à esquerda do painel solar, outro à direita e mais um à frente. É claro

que a comunicação por meio deste sistema depende igualmente da atitude do satélite em órbita, e, infelizmente, esta é outra informação não disponibilizada. A

Figura 4.2 parece sugerir que não haveria uma atitude preferencial para voo, bastando apenas que o painel se alinhe com um plano vertical. A orientação ao redor do eixo restante (eixo de guinada) seria, supostamente, dirigida de forma a maximizar a incidência do Sol nos painéis para suprimento máximo de energia. Esta possível flexibilidade de alteração da atitude ao redor do eixo de guinada é corroborada pelas manobras de atitude para evitar colisões com detritos espaciais, como citado anteriormente.

4.4 Órbitas

A constelação Starlink foi concebida com intenção de utilizar três constelações em baixa órbita, nas altitudes de 1200 km, 550 km e 340 km. Porém, até o momento apenas a altitude de 550 km está sendo utilizada. A constelação completa será formada por pelo menos 17 grupos, dos quais apenas os primeiros 4 grupos foram preenchidos até 2023. Atualmente alguns satélites estão sendo lançados dentro dos grupos 15 e 17, embora grupos intermediários ainda não tenham sido completados. Todos estes grupos usam altitudes orbitais próximas, porém com diferentes inclinações, números de planos orbitais e número de satélites por órbita, como pode ser visualizado na Tabela 4.2. O primeiro grupo é formado por 72 planos orbitais com 22 satélites em cada plano, a uma altitude de 550 km e 53,05° de inclinação. Este grupo possuía 1294 satélites ativos [17] em novembro de 2023, dos 1584 previstos. O grupo 2 possui inclinação de 70°, a 570 km de altitude, e 36 planos com 20 satélites em cada plano. Na mesma época tinha 397 satélites ativos dos 729 necessários para completar o grupo. O grupo 3 foi colocado numa inclinação de 97,6°, em 6 planos com 58 satélites por plano, a 560 km de altitude. Contava com 233 satélites ativos dos 348 deste grupo. O grupo 4 utilizou uma inclinação de 53,22°, e mesma configuração orbital do grupo 1. Contava com 1530 satélites ativos em novembro de 2023 dentre os 1584 satélites deste grupo. O grupo 5 utiliza órbitas de 43° de inclinação a 530 km de altitude, também utilizada pelo grupo 6, mas o grupo 5 é composto por satélites da versão 1.5, enquanto o grupo 6 usa satélites V2 Mini. Os grupos 8, 9 e 12 são recentes, a partir de maio de 2024, e estão sendo preenchidos com satélites V2 Mini D2C [49]. O último lançamento reportado ocorreu em 13 de junho do presente ano. Os grupos orbitais não são preenchidos em sequência, mas seguem uma ordem que visa preencher lacunas e repor satélites que deixaram de operar. De forma geral, gerações diferentes dos satélites (ver seção 4.1) ocupam grupos também diferentes. Atualmente existem 6418 satélites ativos, segundo a página Satellitemap.space (Figura 4.5), excedendo os 4245 satélites dos 4 primeiros grupos. Recentemente, a SpaceX divulgou que tem interesse em incrementar sua constelação para 30 mil satélites nos próximos anos.

Tabela 4.2: Grupos orbitais da constelação Starlink.

Grupo	Inclinação (°)	Altitude (km)	Planos Orbitais	Satélites
1	53,0	550	72	1584

2	70,0	570	36	720
3	97,6	560	10	508
4	53,2	540	72	1584
5	43,0	530	?	?
6	43,0	530	?	?
7	53,0	525	?	?
8	53,0	535	?	?
9	53,2	475	?	?
10	53,2	475	?	?
11	53,2	475	?	?
12	43,0	485	?	?
13	43,0	485	?	?
15	70,0	570	?	?
17	?	?	?	?

A solução de uso de órbitas baixas pela Starlink para oferecer uma baixa latência nas conexões exigiu, como foi dito, uma constelação com um elevado número de satélites. Como a quantidade de conexões que cada satélite consegue oferecer tem um limite superior, de forma a poder garantir uma velocidade adequada de transferência de dados, os usuários de uma dada região devem ser limitados a um número máximo, e um aumento deste limite só pode ser atendido pela inserção de mais satélites na constelação. Ao atingir o número máximo de clientes a SpaceX impede novas vendas na região, até que surja desistência ou aumento na oferta. No Brasil, as regiões da grande São Paulo, Belo Horizonte e Rio de Janeiro estão esgotadas, como pode ser observado na Figura 4.6. Outras regiões do Brasil com espera de disponibilidade são: Breves, no Pará, e Manaus, Tefé, e Tabatinga, no Amazonas. Contudo, é interessante mencionar que a SpaceX informa haver disponibilidade total dentro do território norte-americano. Outras regiões congestionadas incluem Buenos Aires na Argentina, São Salvador em El Salvador, San Jose na Costa Rica, grande parte da Jamaica e Santo Domingo na República Dominicana. O limite foi também atingido em Lagos e Abuja, na Nigéria, e Harare no Zimbábue, além de Manila, nas Filipinas, e Singapura.

Pode ser mostrado sem dificuldades, que os satélites que ocupam órbitas de mesma inclinação atingem igualmente as mesmas latitudes setentrionais e meridionais. A latitude máxima atingida por uma órbita de 53° de inclinação, por exemplo, é também bastante próxima deste valor. Uma constelação com diversos planos inclinados de 90° geram trajetórias no espaço que se assemelham a meridianos terrestres, e, assim como os meridianos, estas órbitas se cruzam nos polos terrestres. Dois satélites, por exemplo, em planos consecutivos apresentam uma dada distância no equador, mas, ao se aproximarem dos polos, esta distância diminui acentuadamente. Quando esta análise é extrapolada para toda a constelação, percebe-se que a distância média entre os satélites é maior no equador terrestre, mas diminui em direção aos

polos. O mesmo raciocínio pode ser empregado nas órbitas não polares, e com conclusões semelhantes, isto é, a densidade média dos satélites é maior no equador e decresce até uma densidade mínima na latitude máxima atingida pela constelação. Posto de outra forma é mais fácil realizar um enlace de solo com algum satélite em altas latitudes do que nas regiões equatoriais.

Ao se observar a Tabela 4.2 percebe-se que a inclinação mais utilizada pela constelação é a de 53° . Considerando-se uma elevação mínima da antena de 40° (seção 4.5) e uma altitude dos satélites de 540 km, então as latitudes integralmente servidas por esta constelação seriam aquelas compreendidas entre os paralelos de 49° . O paralelo de 49° Norte define exatamente a fronteira norte dos Estados Unidos com o Canadá, exceto o Alaska. Latitudes até 58° (Estocolmo) poderiam ser atendidas pela constelação, embora com limitações severas. Regiões austrais e boreais incluindo o Canadá e Alaska são, na verdade, atendidas pelos grupos 2, 3 e 15, que possuem maiores inclinações. As altas inclinações destes três grupos permitem afirmar que a cobertura espacial oferecida pela Starlink é global. Igualmente, o número de planos orbitais e a quantidade de satélites em cada plano indicam que também a cobertura temporal é completa.

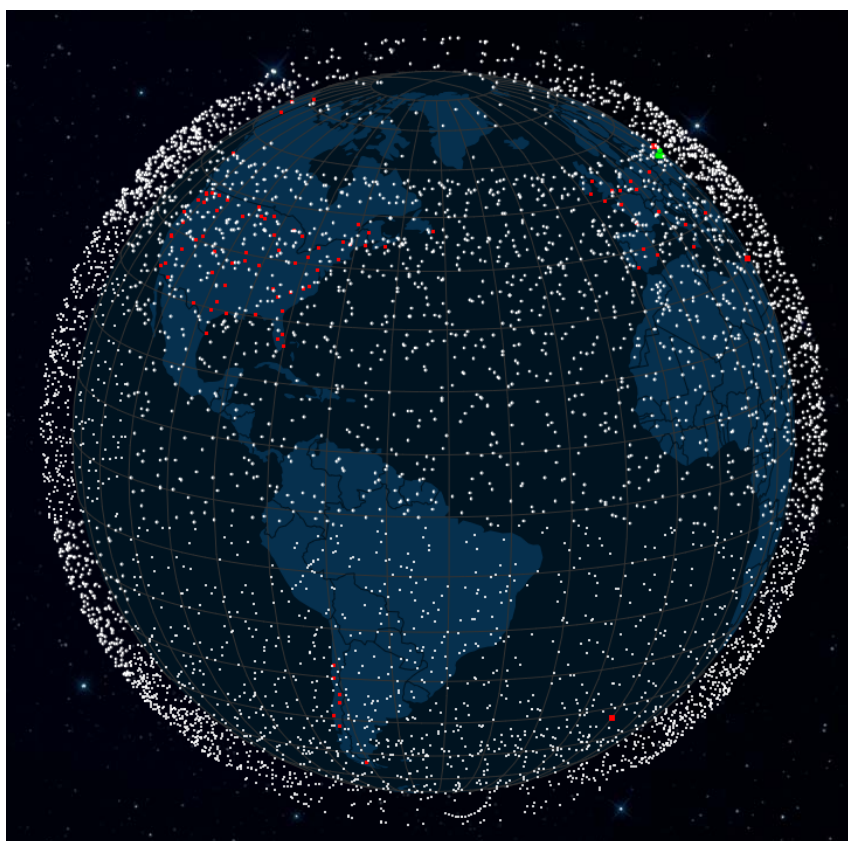


Figura 4.5 – Satélites da constelação Starlink em órbita [46].

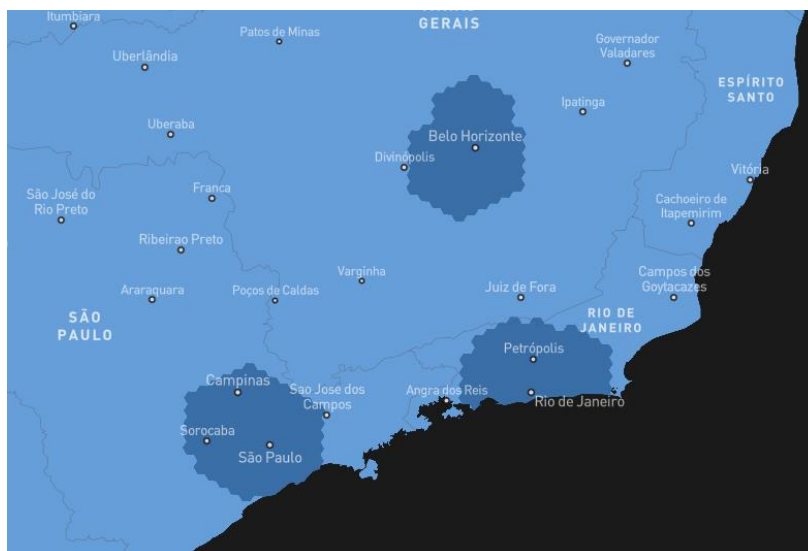


Figura 4.6 – Regiões disponíveis do Brasil (azul claro) e já saturadas (azul escuro) [47].

4.5 Terminais

A SpaceX disponibiliza diferentes terminais para diferentes aplicações, com planos de serviços domésticos ou voltados para empresas. No plano doméstico, o terminal pode ser fixo ou móvel, sendo este último mais compacto, mas com menor capacidade de tráfego. Os primeiros terminais empregavam antenas parabólicas, que foram substituídas por antenas circulares de rede de antenas faseadas com formação de feixe (*Phased Array Digital Beam Forming Antenna* - DBF) pouco maior do que uma caixa de pizza. Embora ainda sejam comercializadas, as antenas circulares também estão em desuso, sendo substituídas por retangulares de tamanho reduzido, com capacidade de defletir o feixe até 55° ao redor da direção normal ao plano delas. Estas últimas possuem as versões para terminais fixos e móveis (Figura 4.7). As antenas devem ser posicionadas em área aberta e livre de obstáculos. Elas possuem receptor GPS [17], o que permite que terminal consiga identificar os satélites que estão sobrevoando o local. O apontamento do feixe, contudo, depende do conhecimento da orientação, e este só pode ser determinado quando uma conexão for estabelecida. Em virtude deste obstáculo, a primeira conexão com a constelação pode levar de 15 a 20 minutos. A SpaceX disponibiliza um aplicativo para celular que consegue determinar a melhor orientação da antena, e, eventualmente, solicita ao usuário para refazer o apontamento. Infelizmente a empresa não informa o motivo pelo qual este apontamento seria necessário. A antena utiliza um processador de quatro núcleos ARM Cortex-A53, junto com diversos circuitos integrados customizados produzidos pela STMicroelectronics para controle da frente de onda na antena faseada, além do cálculo da direção dos satélites para direcionamento do feixe. O terminal é composto pela antena, pelos cabos para conexão e por uma eletrônica para roteamento dos sinais entre a antena e os computadores do usuário ou receptores *wireless*. O terminal é comercializado por 500 dólares, mas é subsidiado pela própria SpaceX; o verdadeiro custo do terminal é desconhecido. A SpaceX recomenda que as antenas dos terminais sejam instaladas preferencialmente em locais altos ou áreas abertas sem obstáculos no campo de visada da antena, inclusive de árvores.

Os terminais variam de acordo com o plano de serviços, com 7 configurações e características diferentes, apresentadas na Tabela 4.3. Algumas versões de terminais são oferecidas já com o roteador, exceto a Enterprise e Performance 2 e 3. O roteador da versão Mini é embutido no invólucro da antena, mas nos demais terminais ele é um módulo separado dela. Alguns terminais permitem mobilidade, como os terminais Performance 2 e 3, contudo a definição de mobilidade pode variar em função do plano contratado. Alguns planos de serviços permitem que o terminal possa ser deslocado temporariamente para outro local, desde que dentro do mesmo país. Planos que realmente suportam serviços móveis permitem que o terminal seja instalado em embarcações, aeronaves ou veículos. A empresa considera que ambos sejam móveis. A orientação das antenas pode ser realizada manualmente e auxiliada por aplicativo (*Software Assisted Manual Oriented* – SAMO), ou automaticamente quando a antena for motorizada (*Motorized Self Oriented* - MSO), nos terminais Standard Actuated e Performance 1. Outra diferença entre os terminais é um maior ângulo de visada (*Field of View* – FOV) nas três versões do terminal Performance. A SpaceX recomenda que as antenas sejam ligeiramente inclinadas para a direção norte, quando no hemisfério norte, ou para o sul, caso contrário. É provável que esta indicação decorra do aumento gradual na densidade de satélites ao se sair das regiões equatoriais em direção às regiões polares.



Figura 4.7 – Antenas de terminais Starlink: circular (2ª geração), retangular e Mini (3ª geração).

As versões 1.x dos satélites requeriam elevação mínima de 40° entre as antenas e o satélite para que pudesse haver conexão entre ambos. A partir da versão V2 Mini as comunicações dos usuários com os satélites da constelação podem ocorrer com ângulos de elevação iguais ou maiores que 25°.

Tabela 4.3: Terminais oferecidos pela Starlink.

Plano	Serviço	Roteador	Montagem	Peso (kg)	Antena (mm)	Campo de visada	Consumo (W)
Mini	Fixo	✓	SAMO	1,1	298 × 259	110°	25-40
Standard	Fixo	✓	SAMO	6,7	594 × 383	110°	75-100
Standard Actuated	Fixo	✓	MSO	4,6	513 × 303	110°	50-75
Enterprise	Fixo	✗	SAMO	12,2	594 × 383	110°	75-100
Performance 3	Móvel	✗	SAMO	7,3	609 × 396	140°	75-100
Performance 2	Móvel	✗	Fixa	9,6	575 × 511	140°	110-150

Performance 1	Fixo	✓	MSO	11,9	575 × 511	140°	110-150
---------------	------	---	-----	------	-----------	------	---------

Em 2022 a SpaceX passou a oferecer serviço corporativo, com desempenho maior do que o doméstico, podendo atingir até 500 Mbps, incluindo atendimento móvel a embarcações, veículos e aeronaves. O terminal deste sistema foi oferecido a 2500 dólares, e o custo mensal do serviço Global Priority varia entre 250 a 2150 dólares, a depender do volume de dados contratados. Assim como o serviço de telefonia móvel, o plano mensal da Starlink é limitado a uma quantidade de dados previamente contratada, e varia de 50 Gb a 2 Tb de dados mensais. Uma vez atingido o limite máximo, a velocidade de *download* cai para 1 Mbps enquanto a velocidade de *upload* cai para 500 Kbps. A SpaceX oferece possibilidade de extensão dos dados com pagamentos adicionais ao plano, com incrementos de 50 Gb ou mais.

4.6 Enlace entre o satélite e o terminal

Embora seja muito pouco divulgado, mencionou-se [45] que o enlace entre o terminal do usuário e a constelação tem início com uma varredura em solo realizada com o feixe das antenas faseadas dos satélites, visando entrar em contato com um possível terminal. Por seu lado, o terminal possui um registro em memória com os elementos orbitais da constelação, e pode igualmente fazer uma varredura no espaço no local previsto para detectar algum satélite emissor. A largura do feixe do satélite em solo ocupa um círculo próximo de 24 km de diâmetro. Qualquer antena dentro desta região irá receber o sinal desde que os seus detectores estejam direcionados ao satélite. Uma vez estabelecido o contato, ambos, satélite e estação de solo entram em modo de rastreamento, acompanhando o movimento mútuo. Acredita-se que dentro da área do feixe de rádio do satélite possam coexistir até 8000 terminais do usuário sem perda de desempenho do sistema [45]. A SpaceX divulgou que seu sistema usa um protocolo de comunicação P2P (*peer-to-peer*, ou ponto a ponto), semelhante ao IPv6, porém mais simples. Isto significa que a cada usuário participa da rede tanto como cliente como também servidor, recebendo requisições e repassando informações para terceiros. Este tipo de arquitetura deixa a rede menos segura, e, para aumentar a segurança, a SpaceX afirma que utiliza criptografia em todos os segmentos da comunicação. Ao se empregar o terminal de usuário como um retransmissor (gateway) da constelação, o tráfego aumenta consideravelmente, o que diminui o desempenho do sistema, e isto causa a limitação do número de usuários numa dada área. A comunicação entre satélites por laser óptico deve ter resolvido este problema, embora a SpaceX não tenha feito declaração alguma sobre ele.

Os satélites da constelação operam em células no solo, de forma semelhante às células de celulares, porém de dimensões muito maiores [81, 82]. Essas células têm formato hexagonal, e seguem um padrão de localização espacial com subdivisões denominado de H3, desenvolvido, originariamente, para suporte à plataforma Uber [83], e denominado de *Geospatial Indexing System*. Este sistema opera em níveis hierárquicos, com resoluções variando entre 0 e 15. Eles não são simétricos e sua área pode variar em função da posição. Cada hexágono é dividido em 7 outros, e assim por diante, até atingir o nível 15, com hexágonos medindo em média 0,9 m². Os hexágonos são identificados por um índice único, mas que mantém no código a informação

de todos os pentágonos que deram origem a eles. A Terra é inicialmente aproximada por um icosaedro, com 110 hexágonos e 12 pentágonos nos vértices do icosaedro. Nas divisões subsequentes os hexágonos são divididos em 7 hexágonos inscritos (Figura 4.8) enquanto os pentágonos são divididos em 5 hexágonos e um pentágono central. Parece razoável supor que os satélites registram em memória os índices dos hexágonos nos quais tenha sido identificada a presença de um ou mais terminais de usuários, para facilitar novas buscas e tornar mais ágil a comunicação com as células.

Para uma elevação de 40° das antenas dos primeiros terminais, o raio do círculo de visibilidade de um satélite da constelação a 540 km é de 546 km em solo com uma área de 1 milhão de quilômetros quadrados. Considerando a largura do feixe das antenas de 24 km em solo, tem-se que a área de um hexágono inscrito neste círculo de 24 km de diâmetro é de aproximadamente 374 km², o que significa que cada satélite cobre por volta de 2700 hexágonos em solo, mostrados em um exemplo na Figura 4.9 gerado na página do *starlink.sx* [82]. Com uma elevação mínima de 25° adotada pelos satélites V2, o número de hexágonos contidos no círculo de visibilidade aumenta para 7200. Por outro lado, a área média das células do sistema H3 mais próxima de 374 km² é a área na resolução 5, de 253 km². Adotando-se a largura do feixe como sendo dada por esta última área, o número de hexágonos no círculo de visibilidade cresce para 3950 e 10650 para as elevações de 40° e 25°, respectivamente. Os hexágonos exibidos nesta figura correspondem a esta resolução, e o círculo de visibilidade foi gerado com elevação de 25°. O autor do sítio *starlink.sx* esclarece que os hexágonos exibidos nos círculos de visibilidade dos satélites não coincidem exatamente com aqueles adotados pela constelação, mas estão próximos. Desconhece-se se a faixa horizontal com ausência de hexágonos na Figura 4.9 deve-se ao software que gera a simulação da constelação ou se é realmente uma característica dos satélites. Mencionou-se [81] que cada satélite consegue se comunicar com até 8 hexágonos simultaneamente devido às suas diversas antenas. O tempo de redirecionamento do feixe deve ser por volta de 5 a 10 μs, de acordo com a mesma referência. Testes realizados em terminais reais localizados em células com apenas um usuário atingiram velocidades de transferência de 540 Mbps para download, e de 39 Mbps para *upload*. Contudo, estes números caem rapidamente com o acréscimo de mais usuários.

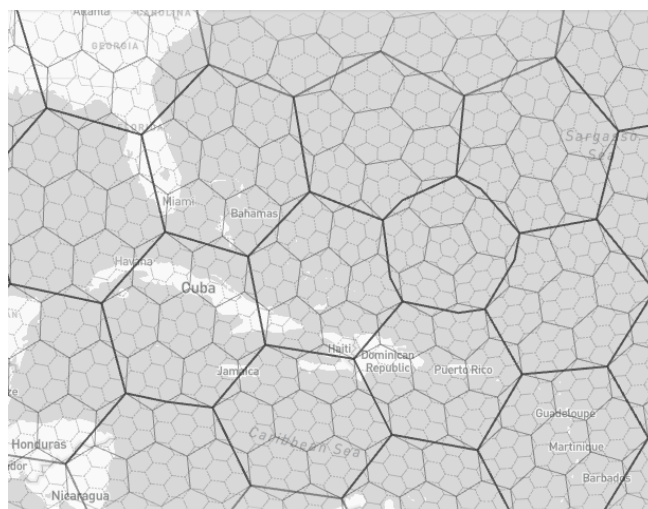


Figura 4.8 – Células H3 em formato hexagonal na região do Caribe [83].

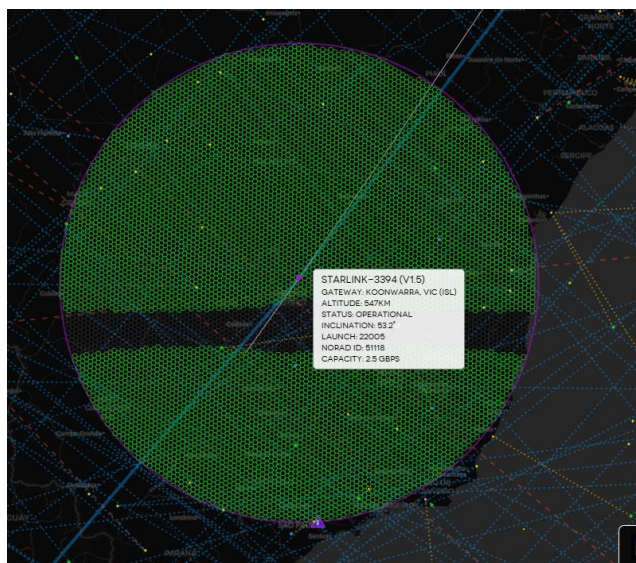


Figura 4.9 – Círculo de visibilidade de um satélite Starlink com os hexágonos inscritos [82].

4.7 Estação de solo (*gateway*)

A SpaceX requisitou autorização para instalar pelo menos 32 estações nos Estados Unidos, mas já possui cerca de 58 estações em solo norte-americano, 17 estações na Europa, 7 no Chile e apenas duas no Canadá [46]. Outras fontes informam um número maior de estações, incluindo algumas delas em países na América Central, do Sul, África, Austrália e Japão, além de 14 estações no Brasil [82]. Há ainda menção da existência de até 22 estações no País [84]. As diferentes datas nas quais estes números foram citados explica parte da discrepância entre os valores. Sobretudo a rápida expansão do sistema inviabiliza que se obtenham valores atualizados. Ademais, a SpaceX utiliza pontos de presença (*Point of Presence* – POP) cuja funcionalidade não é perfeitamente esclarecida, havendo discordância entre os analistas. É provável que as estações POP não disponham de antenas, servindo apenas para interligar uma ou mais estações de solo (*Gateways*) à rede de fibra óptica. Contudo nada impede que um ponto de presença esteja ao lado de uma estação de solo para reduzir a latência no local.

As estações operam na banda Ka e E, e usam antenas parabólicas com movimento em dois eixos que permite o acompanhamento do satélite conforme ele sobrevoa a estação. Cada estação possui 9 antenas parabólicas com diâmetro de 2,8 metros, abrigadas por uma cúpula esférica (Figura 4.10) [45], capazes de rastrear até 9 satélites. Quando um satélite deixa de ser visível por uma das antenas, esta é reposicionada para acompanhar o próximo satélite a sobrevoar o local. O satélite emprega suas 3 antenas parabólicas para comunicação com as estações em solo. Desconhece-se até o momento se as antenas parabólicas que equipam os satélites possuem meios para direcionamento ou se são fixas.



Figura 4.10 – Antenas parabólicas das estações de solo com cobertura (esq.) e descoberta (dir.).

De acordo com a SpaceX as estações em regiões setentrionais ou meridionais podem operar com elevação mínima de valor tão baixo como 5° a partir da versão 2 do satélite, assim como os terminais de usuários, diferentemente das versões anteriores (1.x) que requerem ângulo de elevação mínimo de 40° .

As estações de solo estão localizadas preferencialmente próximas das estações de amplificação e retransmissão de sinais em fibra óptica que interligam os Estados Unidos, ganhando com isso alta capacidade de tráfego. Além disso, as estações de retransmissão em fibra óptica ficam em locais remotos, que também beneficia as estações da Starlink, pois as transmissões das antenas poderiam causar interferência nos terminais de usuários próximos [45]. Um acordo foi estabelecido entre a Starlink e o Google, para que os centros de processamento deste último (que ficam também interligados nas redes de fibra óptica) atendam as solicitações de dados dos usuários da Starlink e façam o roteamento quando necessário.

4.8 Comunicação intersatélites

A partir da Versão 1.5 os satélites Starlink passaram a contar com um sistema para comunicação entre satélites por meio de feixe de laser (ver Apêndice D). Antes de este sistema entrar em operação, a única forma de utilização da rede seria por meio de visibilidade simultânea do satélite em relação a um usuário em solo e uma estação em terra (*gateway*), ou usando os terminais de usuários como roteadores temporários. A impraticabilidade de se contar com estações em solo estrangeiro e oceanos limitava seu uso, que se restringia, obviamente, apenas ao território norte-americano, no qual a SpaceX havia instalado diversas estações. O elo de comunicação entre satélites permitiu estender a cobertura para qualquer parte do globo, mesmo aqueles não atendidos por gateways, embora com acréscimo de certa latência. Como exemplo, pode-se citar o Brasil, que não contava até poucos anos com estações locais de gateway. Ainda assim um usuário da Starlink em Porto Alegre conseguiria se comunicar com outro em Manaus com baixa latência por meio do elo óptico entre satélites. Por outro lado, para que este usuário tivesse acesso a um servidor de uma loja na mesma cidade, e que não fosse cliente da Starlink, sua requisição teria que percorrer os elos por laser entre satélites, até que conseguisse atingir

um satélite da constelação que estivesse em contato com algum gateway em algum local, provavelmente em solo americano. De lá a requisição percorreria por fibra óptica terrestre e marítima, passando por diversas estações até atingir o destino final. A resposta seguiria caminho inverso, percorrendo a mesma rota, provocando uma latência significativa.

Embora existam diversos fabricantes do sistema de comunicação por laser [40, 42], a SpaceX desenvolveu seu próprio equipamento. Cada transceptor laser (bidirecional) atinge 200 Gbps segundo a SpaceX [44], mas outras referências citam 100 Gbps [51]. Todos juntos, o sistema intersatélite da Starlink consegue atingir cifras de 42 Pbps (peta bits por dia), ou 5,6 Tbps. A SpaceX conseguiu manter a comunicação entre satélites por distâncias de até 5400 km, e operando por 99,99% do tempo, sendo o intervalo restante empregado no redirecionamento dos transceptores de laser [52]. Recentemente anunciou sua intenção de comercializar este sistema para terceiros, algo inédito dentro do estilo de atuação da empresa. Planeja igualmente estender a comunicação por laser no link entre as estações de solo e os satélites.

4.9 Estação de controle

A SpaceX não informa onde se localiza sua estação de controle da constelação Starlink, nem mesmo se existe ou se há mais do que uma. A SpaceX mantém em Redmond, Washington, uma instalação dedicada ao Starlink, para realização de pesquisas, manufatura e controle de órbita [17]. Uma vez que os satélites dispõem de propulsores, como dito anteriormente, para correção e manutenção de órbita, é bastante provável que sua utilização seja restrita apenas para inserir os satélites na órbita desejada e para a remoção orbital, uma vez que a simetria geométrica da constelação é fracamente mantida (ver Figura 4.5). Além disso, uma vez que os satélites da geração 1.5 em diante comunicam-se uns com os outros por meio de laser óptico, ações de controle, como ativação de propulsor para alteração de altitude, por exemplo, podem ser enviadas de qualquer terminal conectado na constelação, o que elimina a necessidade operacional de manutenção orbital dos satélites, embora o planejamento das ações seja ainda mandatório.

4.10 Controvérsias

Mesmo quando se considera que a SpaceX demonstre interesse em atender todas as normas relativas ao uso do espaço, como limitação do tempo em órbita, prover os satélites com sistemas propulsivos para reentrar na atmosfera, e utilizar componentes que se desintegram totalmente na atmosfera para impedir que partes atinjam o solo, restam ainda problemas que estão longe de terem solução adequada. Entre estes problemas, pode-se mencionar:

- 1) Os painéis dos satélites são altamente reflexivos, e, frequentemente, podem ser vistos em Terra ao anoitecer e amanhecer. Infelizmente este fenômeno tem causado problemas em observações astronômicas, como pode ser visto na Figura 4.11. Este efeito provocou uma manifestação da União Astronômica Internacional em protesto contra a imensa quantidade destes satélites em órbita. O projeto dos satélites foi então alterado diversas vezes na

tentativa de reduzir o albedo, seja por meio de defletores de luz ou por recobrimento de superfícies (Figura 4.12). Contudo eles são ainda bastante luminosos e continuam a prejudicar as pesquisas astronômicas.

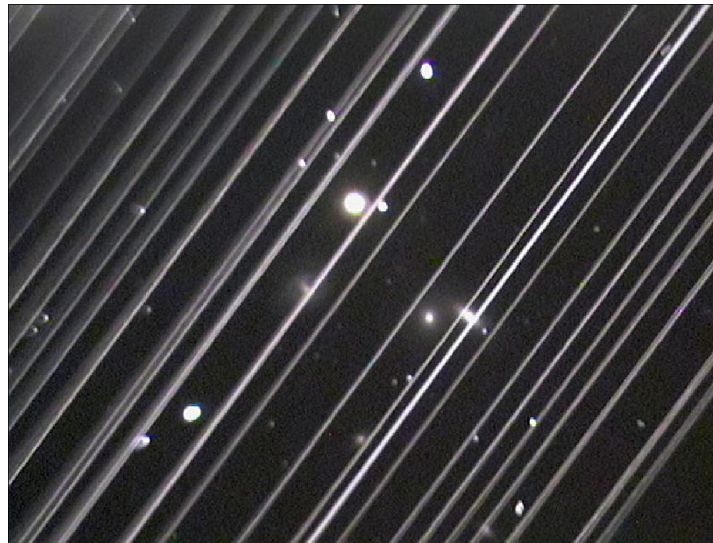


Figura 4.11 – Rastros dos satélites Starlink em uma imagem astronômica [18].

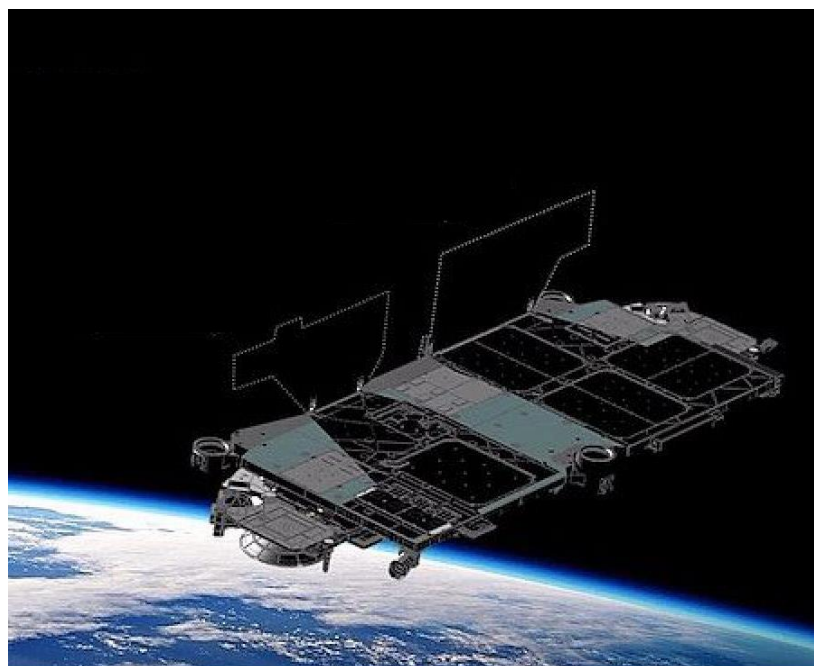


Figura 4.12 – Defletor de luz nos satélites Starlink [18].

- 2) A imensa quantidade de irradiação em micro-ondas provindas da constelação tem igualmente contribuído para aumentar os protestos dos pesquisadores de radioastronomia. Foi constatado que as emissões dos satélites da Starlink emitem sinais em rádio frequência com potência superior a qualquer fonte celeste natural. As interferências podem comprometer os sinais de rádio astronomia até mesmo em lóbulos secundários das antenas em solo. Embora elas possam ser evitadas por meio de algoritmos computacionais que

detectam quando e onde haverá uma possível interferência, o reescalonamento ou redirecionamento da observação acaba por afetar o resultado da pesquisa.

- 3) O número exponencialmente crescente de satélites em órbita tanto da Starlink como também das demais empresas que desejam participar deste lucrativo segmento de oferta de comunicação têm causado preocupação quanto à quantidade de resíduos e de lixo espacial em órbita terrestre baixa. Teme-se que em algum instante futuro se atinja o limite da síndrome de Kessler, pelo qual uma colisão entre satélites possa desencadear um efeito cascata onde os resíduos da colisão causam outras colisões e aumentam com isso o número de resíduos em órbita, colocando em risco missões tripuladas e as estações espaciais dos EUA e China. Atualmente os satélites da Starlink podem de forma autônoma prever colisão com outros objetos orbitais e alterar levemente sua trajetória usando seu propulsor de íons. O cálculo da probabilidade de colisão é efetuado a bordo com base em arquivos enviados de solo com os elementos orbitais dos objetos próximos da constelação. Além desta medida, o satélite realiza uma manobra de atitude para reduzir sua área projetada na direção do movimento relativo entre ambos, diminuindo ainda mais o risco de colisão. O sistema de reentrada que equipa os satélites desta constelação e que usa o propulsor de íons é também uma iniciativa para a redução do lixo espacial, mas, ainda assim, a China apresentou uma queixa nas Nações Unidas em 2021, pois teve que fazer duas manobras evasivas na sua estação espacial naquele ano para evitar possível colisão com satélites Starlink [18].
- 4) Cálculos efetuados por agências reguladoras apontaram um risco relativamente alto dos destroços da Starlink atingirem áreas habitadas ao reingressarem na atmosfera, dado o grande número deles. Como consequência a SpaceX alterou o projeto dos satélites para aumentar o número de componentes que se desintegram durante a reentrada, atingindo 95% de detritos vaporizados, restando apenas os espelhos de carvão de silício (carborundo) que fazem parte do sistema de comunicação entre os satélites por meio de laser. Em comunicação recente a SpaceX afirma que atingiu a marca de 100% de desintegração a partir da versão 1.0 dos satélites da constelação

4.11 Custos

De acordo com a página da Starlink no Wikipedia [17], a SpaceX divulgou em 2018 que o custo estimado para projetar, produzir e colocar em órbita a constelação era de pelo menos 10 bilhões de dólares. A receita, por outro lado, obtida com os serviços prestados aos usuários do sistema, ficou em 1 bilhão e 400 milhões de dólares em 2022, mas ainda operava com prejuízo até o terceiro trimestre daquele ano, esperando lucro a partir de 2023. A estimativa apresentada pela SpaceX era de uma receita de 7,7 bilhões de dólares em 2024, e de 11,8 bilhões em 2025.

Os custos individualizados dos satélites, lançamentos, estações em solo etc. também não são divulgados pela SpaceX, mas especula-se que o custo de cada satélite da versão 1.5 fique abaixo de 1 milhão de dólares, já incluído o lançamento, e o custo da V2 Mini seria de 2 milhões de dólares cada unidade mais 1 milhão de custo de lançamento. Outras estimativas apontaram que o custo estaria hoje em patamares de 500 mil dólares a unidade em virtude da escala de produção, enquanto os custos de lançamentos seriam de 3 milhões por unidade, pois cada

lançamento do Falcon 9 que coloca os 23 satélites V2 Mini em órbita custa 67 milhões [80]. Por outro lado, a SpaceX desativou cerca de 500 satélites Starlink no primeiro semestre de 2025, muitos deles com menos de 5 anos de serviço em órbita.

Como dito anteriormente, o custo dos terminais é subsidiado pela própria SpaceX. A empresa oferece dois planos para usuários domésticos nos Estados Unidos: o Residential Lite, e o Residential, a um custo mensal de 80 e 120 dólares, respectivamente, sem limite de tráfego, apresentados na Tabela 4.4. A velocidade de conexão pode variar entre 45 e 130 Mbps na versão Lite, e entre 100 a 270 Mbps para o plano Residential. A velocidade de *upload* pode variar entre 10 e 20 (Lite) e entre 10 e 25 (Residential). Além disso, a SpaceX comunica que a versão Lite tem menos prioridade na comunicação do que a Residential, podendo, assim, sofrer redução na velocidade em períodos de alta atividade na rede.

A SpaceX oferece dois serviços móveis por meio do plano roam [54]. O serviço de entrada tem limitação de 50 Gb por período, o plano Unlimited não limita a quantidade de dados transferida. Ambos permitem a mobilidade em áreas do país de origem, e permitem uso em outro país ou continente por até dois meses. O custo mensal destes planos é de 50 dólares, para o Roam, e de 165 dólares para o Roam Unlimited. São oferecidos 8 planos empresariais: 4 com mobilidade restrita (Local Priority) e 4 com mobilidade total (Global Priority). Estes planos diferem dos planos residenciais por exibirem maior prioridade, ou seja, menor latência e maior largura de banda, podendo atingir 400 Mbps ou ainda mais. A latência não é informada, mas é provável que seja menor do que 0,1 s. A principal diferença entre os 4 planos Local Priority é a quantidade de dados contratada, que varia de 50 Gb a 2000 Gb por mês. Os planos Global Priority exibem a mesma diferença. Os planos para veículos são cobertos preferencialmente pelo Local Priority e embarcações pelo Global Priority. Além destes, a SpaceX oferece dois planos especiais para aeronaves: Business e Business Unlimited, com ou sem restrições no volume de dados mensais, respectivamente. A adaptação das antenas exige customização em função do modelo das aeronaves. Embora a taxa de transferência de dados seja moderada nestes dois planos, a latência informada pela SpaceX é menor do que 99 milissegundos.

Tabela 4.4: Planos de serviços mensais oferecidos pela Starlink.

Plano	Custo (USD)	Terminal	Mobilidade	Limite (Gb)	Download (Mbps)	Upload (Mbps)
Residential Lite	80	Standard	✗	-	45-130	10-20
Residential	120	Standard	✗	-	100-270	10-25
Roam	50	Mini/Standard	✓	50	?	?
Roam Unlimited	165	Mini/Standard	✓	-	?	?
Local Priority 50	65	Performance x	✓	50	>400	?
Local Priority 500	165	Performance x	✓	500	>400	?
Local Priority 1T	290	Performance x	✓	1000	>400	?
Local Priority 2T	540	Performance x	✓	2000	>400	?
Global Priority 50	250	Performance x	✓	50	>400	?
Global Priority 500	650	Performance x	✓	500	>400	?
Global Priority 1T	1150	Performance x	✓	1000	>400	?
Global Priority 2T	2150	Performance x	✓	2000	>400	?
Business Aviation	2000	customizado	✓	20	100-250	8-25
Aviation Unlimited	10000	customizado	✓	-	100-250	8-26

Recentemente a SpaceX anunciou um serviço de conexão direta dos satélites Starlink com celulares, sem necessidade de adaptações ou antenas auxiliares, mas restrito apenas a mensagens de texto, embora testes com transmissão de vídeo e áudio tenham sido bem-sucedidos, de acordo com a empresa [48]. É provável que a próxima geração de satélites (V2) a ser incorporada na constelação, e que terá massa de 1250 kg, incorpore serviços de comunicação direta com celulares, sem necessidade de adaptações, pelo menos em solo norte-americano. O plano oferecido está ainda em versão de testes, e, no momento, é gratuito. A adesão não é feita pela SpaceX, mas sim por empresas de telefonia associadas a ela.

5 Sistemas alternativos ao Starlink

Outros sistemas de comunicações espaciais se propõem a oferecer serviços de acesso à internet com características similares às do Starlink destacando-se entre elas a baixa latência, alta velocidade, ampla cobertura geográfica, e terminais do usuário com acesso direto ao segmento espacial. Os sistemas de acesso a internet utilizando satélites geoestacionários não são considerados nesta Seção devido à sua latência ser maior que a dos sistemas com satélites em órbita baixa. Também não são considerados sistemas de comunicações que fornecem outros serviços como internet das Coisas (IoT), por exemplo, envio de mensagens de texto e comunicação de voz.

A Tabela 5.1 lista sistemas de comunicações espaciais alternativos ao Starlink juntamente com algumas informações sobre eles destacando-se o seu grau de operacionalidade (N – Não Operacional, E – Fase experimental, P – Parcialmente Operacional, O – Operacional). A constelação Starlink foi inserida nesta tabela a título de comparação. O número de satélites indica a previsão da constelação completa fornecida pelas empresas aos órgãos responsáveis pela regulamentação dos objetos em órbita.

Tabela 5.1: Sistemas de comunicações espaciais alternativos ao Starlink.

Constelação	Origem	Início	Órbitas	Satélites	Situação
E-Space	França	2022	LEO	100000	E
Eutelsat OneWeb	Reino Unido	2016	LEO	648	O
Kuiper	EUA	2019	LEO	3236	E
O3b / O3b mPower	Luxemburgo	2012	MEO	31	O
SatNet	China	2021	LEO	13000	E
Spacesail	China	2023	LEO	14000	E
Starlink	Estados Unidos	2019	LEO	30000	O
Telesat Lightspeed	Canadá	2016	LEO	198	E

As constelações da Tabela 5-1 são brevemente descritas nas seções a seguir.

5.1 E-Space

A empresa E-Space é uma startup criada em 2022 com base na França e nos Estados Unidos que tem por objetivo o desenvolvimento de redes de satélites de baixíssimo custo para fornecer serviços para empresas e governos. Para a prestação desses serviços a empresa pretende lançar uma constelação de até 100.000 satélites (LEO) a ser implantada até 2032. Três satélites de demonstração foram lançados em maio de 2022 [87].

A E-Space pretende ser bastante inovadora em vários aspectos do projeto tais como nas tecnologias a serem utilizadas, no desempenho e nos serviços fornecidos. A constelação de satélites deverá permitir aplicações em diversas áreas como, por exemplo, defesa, veículos

conectados, agricultura digital, planeta conectado e rastreamento de bens e logística. Deve-se ressaltar que a empresa tem uma visão inovadora e ampliada dessas aplicações. Destacam-se, por exemplo, o conceito da *Constellation as a Service* (CaaS) e o da *Constellation as a Product* (CaaP) correspondendo, respectivamente, ao aluguel de constelações satelitais para países que queiram operar a sua própria constelação ou que queiram possuir a sua própria constelação (88).

A empresa disponibiliza poucas informações e detalhes sobre o projeto, tanto do ponto de vista técnico como comercial. Todavia, o seu fundador, Greg Wyler, possui grande experiência no setor espacial, tendo sido o fundador das empresas OneWeb e O3b Network, o que parece respaldar a empresa no cenário comercial e financeiro mundial. Com base nas poucas informações encontradas, foi possível aventar que a empresa tem atuado desde a sua fundação até o momento com os recursos de investidores no valor de USD 50 milhões obtidos no lançamento da empresa [87].

5.2 Eutelsat OneWeb

A constelação Eutelsat OneWeb é composta por 588 satélites ativos em órbita LEO, em 12 planos orbitais com 49 satélites em cada plano, com objetivo de prover serviço de comunicação de dados (internet) com baixa latência. A órbita é circular, quase polar, com 86,4° de inclinação a 1.200 km de altitude, como pode ser observado na Figura 5.1 [16]. O portfólio da OneWeb inclui clientes majoritariamente corporativos e agências governamentais, como empresas de navegação mercante, aviação comercial, jatos particulares, usuários em locais remotos e grandes empresas. A primeira geração utiliza satélites com massa de 150 kg, mas a segunda irá demandar satélites com 500 kg de massa. A solução para comunicação em alta velocidade adotada pela OneWeb consiste em duas antenas parabólicas com controle direcional, projetadas para rastrear os satélites da constelação. Para garantir a continuidade da comunicação, enquanto uma das antenas acompanha um satélite, a outra faz busca do satélite seguinte na órbita. Assim que a nova conexão for estabelecida a função das antenas é invertida, com a segunda fazendo o rastreamento e a primeira buscando por nova conexão. Com adição de mais antenas consegue-se atingir taxas de transmissão maiores. De acordo com informações da OneWeb [15] o tempo de latência é inferior a 100 ms, com taxa de recepção (download) ao redor de 50 Mbps, e taxa de transmissão (upload) de 15 Mbps. A OneWeb oferece também a possibilidade de utilização de antenas planares ativas, que são, na verdade, redes de antenas faseadas com controle computacional da fase [16].



Figura 5.1 – Planos orbitais da constelação Eutelsat Oneweb. [16].

A constelação OneWeb tornou-se ativa no Brasil em janeiro de 2024 [85].

5.3 Kuiper

O projeto Kuiper é mantido pela empresa Amazon, que também conta com um lançador próprio, Blue Origin New Glenn, embora com apenas um lançamento realizado no início de 2025. A constelação Kuiper tem como objetivo a oferta de serviço de internet em banda larga (alta taxa de transferência de dados) em áreas remotas, nas quais a comunicação por cabo ou fibra óptica é inexistente. A Amazon planeja lançar 3236 satélites em 98 planos orbitais e em 3 altitudes diferentes: 590, 610 e 630 km, com inclinação de 51,9° a um custo estimado de 10 bilhões de dólares. Os satélites deverão contar com propulsores iônicos de efeito Hall para ajuste e correção de órbita. O primeiro grupo de 27 satélites foi inserido em órbita recentemente, em abril de 2025, com mais de um ano de atraso. A constelação contará com ao menos 12 estações de solo para suporte à constelação e roteamento de dados. Adicionalmente os satélites deverão contar com sistema de comunicação óptica por laser (*Optical Inter-Satellite Link* – OISL), formando com isso uma rede em órbita com capacidade de transferência de 100 Gbps em distâncias entre satélites de até 2600 km [38].

5.4 O3b e O3b mPower

Os satélites da constelação O3b (*Other three billion* – referindo-se aos 3 bilhões de habitantes excluídos de serviços de internet no mundo) pertencem à empresa SES de Luxemburgo, provedora de serviços de comunicação e internet. Os principais clientes da O3b são corporativos, atendendo empresas de navegação, aviação e militares, tanto fixos quanto móveis. A SES, portanto, não oferece serviços a residências ou pequenos estabelecimentos. O propósito da O3b é oferecer altas taxas de transferência e baixa latência, limitadas, porém, a latitudes de até 50°. Utiliza órbitas MEO e conta com 20 satélites da primeira geração (O3b) e 6 da segunda (O3b mPower) [11], e mais cinco satélites estão sendo produzidos e serão lançados brevemente. Além destes, a O3b utiliza também satélites geoestacionários pertencentes a SES. Os satélites empregam rede de antenas faseadas, atingindo até 5000 alvos na superfície cada um, com potência suficiente para transmitir em velocidades de até 10 Gbits/s. Os vinte satélites da

primeira geração da O3b foram postos em órbita circular e equatorial (inclinação nula) a 8060 km de altitude, separados em fases de 36°. Por outro lado, os satélites da segunda geração utilizarão órbita MEO também a 8060 km de altitude, porém com inclinações variando entre 36 e 61°. Além dos satélites GEO, a O3b utiliza os portais (*gateway*) em solo da SES para retransmissão de sinais e conexão com a rede de telefonia e internet

5.5 SatNet

Outra empresa chinesa, a China Satellite Network Group, está iniciando a sua própria constelação denominada Guowang, ou Xingwang ou SatNet, que deverá contar com 13.000 satélites em órbita baixa, a 1100 km de altitude, com inclinação de 86,5°, de acordo com o registro feito na ITU – *International Telecommunication Union* em 2020 [86].

A empresa estatal gerenciadora da constelação foi criada em 2021. De acordo com a regulamentação da ITU, a China Satellite deve lançar pelo menos metade da quantidade de satélites da constelação até 2032. O primeiro grupo de dez satélites da constelação foi lançado em dezembro de 2024 [86] e o segundo grupo, aparentemente com nove satélites, foi lançado em fevereiro de 2025 [89]. O quarto grupo foi lançado recentemente em junho de 2025. Não se tem informações sobre a situação operacional da constelação após o lançamento desses dois grupos de satélites.

5.6 Spacesail

A Constelação Spacesail, também conhecida por Qianfan, Thousand Sails ou ainda G60, é uma proposta chinesa (empresa estatal Shanghai Spacecom Satellite Technology) para uma constelação de 14000 satélites em órbita baixa (LEO), provavelmente a 800 km de altitude, para comunicação em banda larga, ou seja, alta taxa de transferência de dados. Até março de 2025 cerca de 90 satélites foram colocados em órbita, e a previsão é de que ocorram pelo menos mais 3 lançamentos neste mesmo ano, cada um com 18 satélites da constelação (Figura 5.2). Contudo, pouca informação é disponibilizada para a imprensa, devido ao controle exercido pelo governo central chinês. Uma vez que o conteúdo da internet é fortemente controlado na China, impedindo que diversas redes sociais operem em solo chinês, pode-se igualmente esperar que as transmissões da Spacesail sejam igualmente controladas, ou, ao menos, supervisionadas. Outro ponto a ser esclarecido na constelação é localização dos portais de comunicação com solo (*gateways*). Estações de solo fora do território chinês não teriam problema com o conteúdo da informação, uma vez que os dados que transitam pela rede são encriptados, o que poderia dificultar o controle. Por outro lado, se a Spacesail disponibilizar apenas estações em solo chinês, a comunicação com domínios e páginas do ocidente seria fortemente prejudicada.



Figura 5.2 - Concepção artística do satélite Spacesail [37].

5.7 Telesat Lightspeed

A Telesat é uma empresa pública de telecomunicações canadense, fundada em 1969, para operar o satélite geoestacionário Anik 1, lançado em 1972. Em 1998 a empresa foi privatizada [35]. Ao todo a Telesat lançou e operou pouco menos de 30 satélites de telecomunicação geoestacionários, dos quais muitos ainda estão ativos, atendendo não apenas o Canadá, mas também diversos outros países. É a quarta empresa mundial no ramo de comunicações por satélite, e passou a oferecer serviços de internet para aviões, navios e localidades remotas a partir de 2004, incluindo o Brasil, utilizando a faixa de frequência Ka dos seus satélites. Em 2016 a Telesat decidiu ingressar na comunicação de dados de baixa latência, com propósito de lançar 300 satélites Lightspeed em órbita baixa, a 1000 km de altitude e inclinação quase polar. Para dar suporte à constelação, a Telesat planeja criar cerca de 50 estações de solo para retransmissão (*gateways*). Contudo, até 2023 apenas dois satélites de prova de conceito foram lançados. A Telesat deverá utilizar uma rede de comunicação óptica intersatélite por laser [41], que permitirá conectar com baixa latência dois locais afastados entre si (Figura 5.3). Os satélites deverão contar com processamento de dados a bordo e efetuar roteamento de sinais.



Figura 5.3 – Rede espacial da constelação proposta pela Telesat em órbita baixa [36].

6 Comparação dos sistemas de comunicações

A comparação direta e ampla dos sistemas de comunicações compostos por grandes constelações de satélites em órbita baixa como os delineados nas seções anteriores é difícil devido ao grande número de características que definem essas constelações e o seu desempenho. O que parece ser mais produtiva é a comparação desses sistemas de comunicações por meio dos subgrupos de suas características mais relevantes para a utilização específica ou objetivo específico pretendidos. Assim, por exemplo, a baixa latência da transmissão é uma característica importante para diversos serviços da internet e foi um dos motivos-chaves para o emprego de satélites em órbita baixa em substituição aos satélites geoestacionários. A latência é, portanto, um parâmetro a ser considerado na comparação dos desempenhos dos diversos sistemas de comunicações.

A latência da transmissão depende da distância total percorrida pelo sinal de alta frequência no seu trajeto da antena do terminal do usuário até a antena do satélite, e desta até a antena da estação gateway, no solo. Esse trajeto pode, eventualmente, incluir um enlace intersatélites. As distâncias do terminal do usuário até o satélite e deste até a estação gateway dependem da altitude orbital do satélite e do ângulo de elevação pelo qual o satélite é visto pelas antenas em terra. Além da distância do percurso, a latência também depende do tempo de processamento do sinal dos equipamentos a bordo dos satélites e nas estações *gateway*.

A Tabela 6.1 apresenta os tempos de percurso do sinal de alta frequência no trajeto solo-satélite-solo para diversas altitudes de órbita e para as elevações de 5° e 40°. As altitudes de órbita desta tabela são próximas das utilizadas pelas constelações apresentadas nas seções anteriores e servem apenas para dar a ordem de grandeza dos atrasos do sinal associados às diversas configurações. A altitude da órbita geoestacionária foi incluída para comparação dos atrasos associados às órbitas GEO, MEO, LEO e VLEO.

Tabela 6.1: Distâncias entre o terminal de usuário e o satélite e tempos de percurso

Altitude (km)	Elevação: 5°		Elevação: 40°	
	Distância máxima (km)	Atraso (ms)	Distância máxima (km)	Atraso (ms)
350	1656,8	11,0	525,7	3,5
550	2205,9	14,7	812,1	5,4
1000	3194,5	21,3	1428,7	9,5
1500	4101,7	27,3	2080,2	13,9
8000	12342,2	82,3	9422,8	62,8
35786	41127,1	274,2	37780,8	251,9

Conforme foi apresentado anteriormente neste documento, o comprimento do enlace entre satélites varia na faixa de 2.600 a 5.000 km. O tempo de propagação do sinal de alta frequência varia, portanto, na faixa de 8,7 a 16,7 milissegundos. Esse tempo deve ser adicionado aos valores da Tabela 6.1 se a comunicação solo-satélite-solo incluir um enlace entre satélites.

Alguns serviços ou aplicações podem requerer, além da baixa latência, altas taxas de dados, ao passo que outros requerem a baixa latência, mas não necessitam de taxa de dados elevada. Além destes parâmetros, algumas características técnicas que são, normalmente, relevantes do ponto de vista do usuário destes sistemas são, por exemplo, a assimetria do fluxo de dados (taxa de dados de download e taxa de upload), portabilidade do terminal, tipo de acesso do usuário (direto ao segmento espacial ou via infraestrutura terrestre) e sigilo das comunicações. Alguns exemplos de características não técnicas, mas de interesse, são o tipo de serviço oferecido (fixo ou portátil ou ainda móvel), tipo de usuário (residencial, empresarial, governo ou militar), disponibilidade do serviço na localidade (cobertura) e o custo do acesso.

Algumas características permitem avaliar o desempenho da constelação como um todo como, por exemplo, o número total de satélites, a cobertura (se é global ou regional), o tamanho da infraestrutura de solo necessária (estações gateway e de controle), custo de implantação e o custo de operação. Todavia, como já comentado neste documento, o acesso aos detalhes técnicos e não técnicos do projeto das diversas constelações é bastante difícil devido ao caráter sigiloso que as empresas e organizações responsáveis por estes sistemas atribuem a estas informações.

A Tabela 6.2 compara as diversas constelações de satélites em órbita não geoestacionária (NGSO – *Non Geostacionary Orbit*) com base em algumas das suas características técnicas de interesse do usuário. É importante ressaltar que dos provedores em situação operacional, apenas a Starlink oferece serviços individuais a residências. Todos os demais operam apenas no mercado corporativo. A Tabela 6.3, por outro lado, apresenta algumas características que permitem comparar as constelações nos aspectos globais do projeto. Todas elas oferecem cobertura global. O custo de aquisição e de manutenção dos sistemas que já se encontram operacionais (exceto pela Kuiper) é apresentado na Tabela 6.4, que inclui constelações em órbitas GEO. Todas elas oferecem atendimento a residências, exceto a Eutelsat OneWeb e a SES Broadband.

Tabela 6.2: Comparação das constelações NGSO em aspectos de serviço para o usuário.

Constelação	Download (Mbps)	Upload (Mbps)	Latência (ms)	Serviço*	Usuário**	Terminal†
E-Space	?	?	?	F-?	E-G	?
Eutelsat OneWeb	50 a 195	15 a 32	70	F-M	E-G-M	F, P
Kuiper	100 a 1000	100 a 1000	?	F-?	R-E-G	F, P
O3b / O3b mPower	40 a 600	40 a 600	130 a 150	F-M	E-G	?
SatNet	?	?	?	F-?	?	?
Spacesail	?	?	?	F-?	?	?
Starlink	45 a 400	8 a 25	20 a 100	F-M	R-E-G-M	F, P
Telesat Lightspeed	> 50	> 10	?	F-M	E-G-M	?

*F – Fixo, M – Móvel

**R – Residencial, E – Empresarial, G – Governo, M – Militar

†F – Fixo, P – Portátil

Tabela 6.3: Comparação dos projetos de constelações de comunicação NGSO.

Constelação	Ano	Custo (bilhão USD)	Órbita	Satélites		Situação ⁺
				Previstos	Lançados	
E-Space	2022	?	LEO	100000	3	E
Eutelsat OneWeb	2016	~ 3	LEO	648	648	O
Kuiper	2019	10	LEO	3236	27	E
O3b / O3b mPower	2012	?	MEO	31	26	O
SatNet	2020	?	LEO	13000	19	E
Spacesail	2023	?	LEO	14000	90	E
Starlink	2016	10	LEO	34.396	7.578	O
Telesat Lightspeed	2016	3,5	LEO	198	3	E

+N– Não Operacional, E– Experimental, T– Em testes, P– Parcialmente Operacional, O– Operacional

Tabela 6.4: Comparação de desempenho e custo das constelações operacionais.

Operador	Órbita	Velocidade (Mbps)	Latência (ms)	Custo (USD)	Terminal (USD)	Restrição (GB)
Eutelsat OneWeb	LEO	50	70	300+	Variável	Variável
HughesNet	GEO	100	650	89,99	99-399	100
Kuiper	LEO	100-400*	<50*	TBD	249-399*	-*
SES Broadband	GEO	10	550	46,8	233-468	-
Starlink	LEO	50-220	30-50	120	599	-
Viasat	GEO	150	600	119,99	299	-

*Valores esperados.

7 Sistema brasileiro de internet por satélites

A discussão sobre um sistema nacional de fornecimento de acesso à internet por satélites ganhou força em determinados grupos do governo brasileiro em 2024, período em que se constatou que um número considerável de usuários brasileiros dos serviços de acesso, incluindo usuários civis, órgãos da administração pública direta e mesmo grupos das Forças Armadas, utilizava a constelação de satélites Starlink pertencente à empresa americana de mesmo nome [93].

As pesquisas que permitiram a constatação acima não revelaram os motivos pelos quais essa parcela dos usuários brasileiros optou pelo uso dos serviços oferecidos pela Starlink. Todavia, com base nas características dessa constelação, apresentadas neste documento, acredita-se que entre os prováveis motivos estão a cobertura de regiões com pouca ou nenhuma infraestrutura de comunicações, as altas velocidades e a baixa latência dos acessos à internet pelo usuário final, a portabilidade e facilidade de uso dos terminais de usuário, e a possibilidade de acesso em regiões com obstáculos naturais (vegetação, colinas etc.) ou artificiais (edifícios, construções etc.) próximos. O custo do serviço de acesso, relativamente baixo face às diversas características positivas da constelação, também é um provável motivo da adesão da parcela de usuários.

A dependência de uma única empresa estrangeira para as comunicações de usuários civis e agentes públicos nas áreas desprovidas de infraestrutura de comunicações como, por exemplo, as áreas remotas e as áreas sob os efeitos de desastres naturais de grandes proporções foi percebida por parte de setores do governo brasileiro como uma importante fraqueza estratégica. A necessidade de mitigação dessa fraqueza reacendeu a discussão sobre a ampliação e a melhoria do sistema de comunicações existente no país.

Na realidade, a necessidade de melhoria do sistema de comunicações nacional não é um tema recente e destaca-se como exemplo do avanço nesta questão a aquisição do SGDC – Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas, com cobertura do território nacional e da Amazônia Azul, lançado em 2017 [94]. O SGDC utiliza 70% da sua capacidade para fornecer internet em alta velocidade para as regiões do país nas quais as empresas de telecomunicações não têm interesse comercial ou capacidade técnica de operação atendendo usuários como escolas públicas, hospitais e unidades de saúde, aldeias indígenas e comunidades quilombolas. Como o satélite é de aplicação dual, o restante da sua capacidade é utilizado nas comunicações da área da Defesa nacional.

7.1 Serviço de acesso à internet por satélites no Brasil

No sistema de comunicações nacional trafegam muitos tipos de informação como voz, áudio, imagens, vídeos, televisão e dados, normalmente na forma de sinais eletrônicos digitais. Os dados, por sua vez, podem estar relacionados a diversos tipos de informação, em particular àquelas fornecidas pelos sistemas conectados à rede global de internet como, por exemplo, os sistemas financeiros e bancários, de mensagens, *sites* das empresas e instituições, de

teleconferência e as redes sociais. Na realidade, o acesso aos sistemas e serviços da internet tornou-se uma demanda importante do sistema de comunicações nacional.

O sistema nacional utiliza diversas tecnologias como equipamentos de comunicação por fibra óptica, cabos de cobre, enlaces de RF e micro-ondas, redes celulares e satélites. Esses equipamentos e a infraestrutura necessária para o seu funcionamento são comumente agrupados como a rede terrestre e a rede espacial do sistema de comunicações.

Diversos fatores técnicos e econômicos influenciam a expansão das redes terrestre e espacial pelo território nacional ocorrendo, muitas vezes, situações em que um tipo de rede se impõe como solução. É o caso, por exemplo, das regiões de baixíssima densidade populacional, de difícil acesso, ou com características inadequadas de solo, vegetação ou topografia nas quais a instalação e manutenção da infraestrutura da rede terrestre são inviáveis em termos técnicos ou econômicos. Neste caso, as redes espaciais se apresentam como a única solução viável praticamente.

Como visto no início desta Seção, o SGDC faz parte da rede espacial do sistema nacional de comunicações desde 2017 e oferece o serviço de acesso à internet a uma classe de usuários civis selecionada pelo governo brasileiro.

Nas aplicações civis o usuário final da internet não tem acesso direto ao SGDC. O acesso é feito por meio de pequenas estações terrenas denominadas VSAT – *Very Small Aperture Terminal* que são responsáveis por receber o sinal de alta frequência do satélite e processá-lo gerando os dados digitais de interesse (internet) para o usuário final. No sentido inverso, os dados digitais do usuário são processados na VSAT gerando um sinal de alta frequência que é enviado por ela para o SGDC. Uma estação VSAT atende um grupo de usuários finais.

A utilização civil do SGDC, isto é, a distribuição e operacionalização das estações VSAT, é feita pela empresa americana VIASAT, contratada pela empresa estatal brasileira TELEBRÁS, proprietária e operadora do SGDC [95]. O uso do SGDC no mercado corporativo é controlado pela própria Telebrás através do seu programa Telebras SAT [104].

A capacidade do SGDC para aplicação civil não é suficiente para atender todos os usuários potenciais do plano de inclusão digital elaborado pelo governo na época da especificação do satélite e atualmente se encontra praticamente esgotada. Além disso, quando uma VSAT atende um grupo de usuários finais relativamente grande, como no caso de escolas públicas, a velocidade de *download* dos acessos pode ficar próxima de algumas dezenas de kbps (kilobits/s), muito abaixo do mínimo de 25 Mbps (megabits/s) considerada como a velocidade mínima de um sistema de internet de banda larga [96].

Além dos serviços da Starlink e do SGDC há outros serviços de acesso à internet por satélite disponíveis no Brasil como, por exemplo, os oferecidos pela HughesNet [97, 98], Viasat [99], internetSat [100], Vivo [101]. A Claro também oferece esse serviço atualmente [102], mas ele deixará de ser fornecido em breve.

De maneira geral, as operadoras acima, com exceção da Starlink, não dão muitos detalhes técnicos de desempenho dos seus serviços na literatura de acesso público inviabilizando o levantamento e comparação dos seus pontos positivos e negativos. Apenas a Viasat informa as velocidades de *download* e *upload* de 35 Mbps e 3 Mbps, respectivamente. Em princípio, todos os serviços listados utilizam satélites geoestacionários (GEO) e, diferentemente do SGDC, os usuários finais (residências ou empresas) utilizam terminais com acesso direto aos satélites. O acesso à internet não é ilimitado e as operadoras vendem planos diferenciados para os usuários com pacotes de volume de dados mensais (franquias) variando tipicamente na faixa de 10 a 200 Gigabytes. O acesso aos satélites em horários fora do pico de uso é estimulado por todas as operadoras por meio de mecanismos como, por exemplo, a oferta de pacotes bônus para serem utilizados em horários específicos de baixa demanda do sistema.

A Embratel oferece um serviço de acesso à internet por satélites (IPSat) de banda larga voltado exclusivamente para o mercado corporativo [103].

O emprego de satélites geoestacionários nas comunicações limita o valor mínimo do atraso de propagação dos sinais de alta frequência a aproximadamente 270 milissegundos para o trajeto solo-satélite-solo devido à grande altitude da órbita (~ 36.000 km). Esse atraso contribui diretamente para a latência das comunicações o que pode inviabilizar certos serviços específicos que utilizam a internet. Além disso, a grande distância entre o satélite e o terminal do usuário, no caso de acesso direto, exige terminais com antenas fisicamente maiores e transmissores de maior potência em comparação com o acesso aos satélites em órbita média (MEO), baixa (LEO) ou muito baixa (VLEO). Desta forma, de maneira geral, os terminais de acesso aos satélites GEO são fisicamente maiores, exigem maior precisão de apontamento da sua antena e consomem mais energia para o seu funcionamento. Esses fatores diminuem a portabilidade dos terminais que é um requisito importante para diversas aplicações.

Por estes motivos, diversas operadoras que operam no Brasil estão procurando incorporar redes de satélites não-geoestacionários (NGSO – *Non GeoStationary Orbit*) à sua atual rede de satélites geoestacionários. Essa incorporação está ocorrendo por meio de parcerias com as proprietárias ou operadoras de algumas das constelações de satélites NGSO vistas no Produto 1 como, por exemplo, a parceria da Hughes com a OneWeb [105] e a parceria, em discussão, entre a estatal brasileira Telebrás e a empresa estatal chinesa Shanghai Spacecom Satellite Technology para acesso à constelação SpaceSail, ainda não operacional [111].

Algumas constelações NGSO estão presentes no Brasil por meio de outros mecanismos além das parcerias com as proprietárias/operadoras de satélites GEO como, por exemplo, escritórios próprios, representações e parcerias com empresas fornecedoras de serviços específicos. Alguns exemplos dessas formas de participação no mercado são a parceria Claro e O3b mPower [106], OneWeb [107, 108], Starlink [109] e Lightspeed da Telesat [110].

7.2 Proposta de um sistema nacional de internet por satélites NGSO

A maior utilidade de uma constelação de satélites NGSO, com as suas várias vantagens operacionais em comparação com os satélites GEO, é nas regiões remotas ou com pouca

infraestrutura de comunicações, ainda que temporariamente. Exemplos desses tipos de região são, respectivamente, a região Amazônica e o estado do Rio Grande do Sul durante as enchentes de 2024.

As comunicações nessas regiões são estratégicas em diversos sentidos como, por exemplo, na vigilância das fronteiras, combate à criminalidade, rapidez e flexibilidade no apoio às populações em situação de risco.

Considerando os aspectos estratégicos, entre outros, pode ser de interesse do governo brasileiro a posse e o controle de uma constelação de satélites NGSO, a exemplo do realizado com o satélite geoestacionário SGDC.

Desta forma, nesta e nas próximas seções propõe-se o desenvolvimento de tal sistema de comunicações. Em face da complexidade de um sistema espacial como este, as etapas do desenvolvimento seguirão a metodologia iterativa proposta por Larson e Wertz [112].

Para facilidade de referência no presente documento, a constelação NGSO será chamada provisoriamente de Constelação BR.

7.2.1 A missão espacial Constelação BR

A missão espacial Constelação BR deve prover ou complementar o serviço de acesso rápido à internet para os habitantes da região Norte e da parte mais setentrional das regiões Nordeste e Centro-Oeste aumentando a participação da infraestrutura nacional de comunicações na oferta desse serviço nessas regiões.

7.2.2 Objetivos da missão Constelação BR

O objetivo primário da missão é fornecer acesso contínuo à internet para os habitantes da região Norte e da parte mais setentrional das regiões Nordeste e Centro-Oeste (Região 1) de forma que eles possam realizar os serviços de internet básicos.

O objetivo secundário da missão é fornecer acesso contínuo à internet para os habitantes da região do território nacional complementar à Região 1 (Região 2) de forma que eles possam realizar os serviços de internet básicos, tolerando-se degradações pré-definidas na qualidade ou condições do acesso em comparação ao acesso na Região 1.

7.2.3 Restrições e requisitos preliminares da missão Constelação BR

Como os recursos financeiros do governo brasileiro para aplicações em desenvolvimento são escassos a principal restrição para a viabilidade do sistema Constelação BR é o custo de implantação. Ele deve ficar algumas ordens de grandeza abaixo do custo das constelações NGSO vistas no Produto 1 que variou na faixa USD 3 bilhões – USD 10 bilhões. Os custos de operação e manutenção também devem permanecer em patamares compatíveis com a realidade nacional.

Outra restrição importante é o cronograma para a entrada em operação do sistema, ainda que em fase inicial. Período muito longo para o desenvolvimento e implantação do sistema tem maior probabilidade de enfrentar descontinuidades devido a mudanças de governo e respectivas prioridades. Por outro lado, a missão envolve itens de longo prazo de planejamento como, por exemplo, os lançamentos dos satélites. Desta forma, uma previsão preliminar do cronograma do sistema Constelação BR é de 3 a 5 anos.

Define-se de forma preliminar que o limite sul da Região 1 é o paralelo 20° Sul, na latitude aproximada de Belo Horizonte. O requisito preliminar do tempo de vida operacional da missão Constelação BR é de oito anos mínimo.

Um requisito de desempenho importante é o ângulo de elevação mínimo em que o usuário do sistema visualiza pelo menos um satélite da Constelação BR. Usuários em locais com obstáculos próximos como vegetação alta, colinas ou encostas requerem valores altos de ângulo de elevação. Por outro lado, valores altos de ângulo requerem maior número de satélites na constelação. O requisito preliminar adotado para este parâmetro é 20° para usuários na Região 1 e 10° para usuários na Região 2.

Dois requisitos de desempenho importantes para o serviço a ser fornecido pela Constelação BR são a velocidade de transmissão dos dados e a latência da comunicação.

O principal parâmetro que dirige o projeto é, sem dúvida, a taxa mínima de transferência de dados especificada para os terminais em solo. Valores altos, compatíveis com banda larga, iguais ou acima de 300 Mbps certamente levará a solução para uma constelação parecida com a Starlink, com milhares de satélites e custo de alguns bilhões de dólares, incrementada pelo fato de não se dispor até o momento de lançamentos domésticos. Outro fator a ser relaxado é a latência do sistema. Latências baixas, da ordem de alguns milissegundos também dirigem a solução para uma constelação do tipo da Starlink. O principal serviço perdido ao se adotar latências iguais ou pouco superiores a 0,1 segundo é a possibilidade de se utilizar o sistema para vídeo ou áudio conferências. Visitas a páginas de internet, comunicação por áudio ou vídeo previamente gravado (como no Whatsapp, por exemplo), streaming de vídeos sob demanda com armazenamento programado no local, podem ser perfeitamente realizados mesmo a taxas tão baixas quanto 10 Mbps. A Tabela 7.1 apresenta alguns valores considerados por estes autores como razoáveis para utilização de internet em velocidade baixa, compatível com requisitos e demandas de locais remotos. Há que se considerar, nesta escolha, que a maior parte das comunidades remotas do país não tem demanda para baixa latência ou alta taxa de transmissão, mas sim garantia de comunicação rápida e serviços básicos de pedidos de auxílio para atendimento a doenças e acidentes de seus membros. Comunicações do tipo Whatsapp ou Telegram podem ser realizadas com facilidade com baixas taxas de transferência. O ganho obtido com o relaxamento destes dois parâmetros permite reduzir a constelação substancialmente e viabilizar seu projeto. Caso, no futuro, se opte por aumentar a taxa de transferência, bastará para isso aumentar a quantidade de satélites em órbita. Em outras palavras, apesar de haver relaxamento na taxa de comunicação, tanto o terminal quanto os satélites serão dotados de alta capacidade de transferência de dados, sendo que a limitação se

deve, basicamente, a uma constelação com número reduzido de satélites. Em resumo, são adotados para esta constelação:

- 1) Mínima taxa de transferência de dados nos terminais de usuários: 10 Mbps
- 2) Máxima latência do sistema: 1 segundo.

Tabela 7.1: Requisitos do sistema de comunicação com base nas aplicações.

Aplicação	Latência (ms)	Recebimento (Mbps)	Envio (Mbps)
Mensagens de texto	-	> 5	> 5
Mensagens de áudio	-	> 10	> 5
Vídeo sob demanda	-	> 50	-
Vídeo conferência	< 200	> 50	> 10
Jogos em grupo	< 100	> 50	> 10
Podcast de áudio	< 500	> 20	-
Consulta de páginas	-	> 10	-
Redes sociais	< 500	> 10	> 10

7.2.4 Conceito de missão da Constelação BR

Na Constelação BR os terminais dos usuários têm acesso direto ao segmento espacial enviando para ele os sinais de radiofrequência do enlace de subida do usuário com as informações de *upload* e recebendo dele os sinais de radiofrequência do enlace de descida do usuário com as informações de *download*.

Os sinais dos enlaces de subida dos usuários são processados pelo segmento espacial e enviados para uma estação *gateway* no solo utilizando o sinal de radiofrequência do enlace de descida do *gateway*. A *gateway* realiza o processamento necessário e envia as informações para os provedores de acesso à internet no solo por meio da rede de comunicações terrestre.

No sentido inverso, a estação *gateway* recebe as informações dos provedores de acesso à internet por meio da rede terrestre de comunicações, processa essas informações gerando um sinal de radiofrequência que é enviado para o segmento espacial utilizando o enlace de subida do *gateway*. O segmento espacial processa esse sinal e o envia para os terminais do usuário por meio dos enlaces de descida dos usuários.

Os enlaces de subida e descida do usuário e do *gateway* têm características bastante distintas.

O monitoramento e controle do segmento espacial tanto para a configuração da comunicação dos usuários e do *gateway* como para o controle dos satélites e monitoramento da sua saúde é feito por uma estação de monitoramento e controle no solo. Esta estação utiliza enlaces de

radiofrequência de subida e descida de serviço para a troca das informações necessárias (telemetrias e telecomandos) com o segmento espacial.

Por razões de custo e complexidade o segmento espacial do sistema Constelação BR não terá enlaces de comunicação entre satélites (ISL – *Inter Satellite Link*). Por este motivo a operação da Constelação BR requer que os terminais dos usuários e a estação *gateway* estejam sempre no mesmo *footprint* do satélite para a comunicação com “um salto”, isto é, os sinais do terminal do usuário percorrem uma única vez o trajeto solo-satélite-solo. Também será analisada possibilidade do uso, e seus impactos, da comunicação com “dois saltos” na qual os sinais do terminal do usuário percorrem o trajeto solo-satélite 1-*gateway* 1-satélite 2-*gateway* 2.

O sistema Constelação BR poderá ter mais de uma estação *gateway* e de controle.

7.2.5 Arquitetura de missão da Constelação BR

Segundo Larson e Wertz [112] a arquitetura de missão de uma missão espacial é composta pelo conceito de missão e oito elementos de missão identificados como “assunto” (*subject*); órbita e constelação; carga útil; plataforma (*bus*) espacial; segmento do lançador; segmento solo; arquitetura de comando, controle e comunicações; e operação da missão. No caso da missão Constelação BR o “assunto” pode ser definido como os terminais dos usuários uma vez que são eles que terão interface com os satélites (carga útil + plataforma espacial) da Constelação.

O conceito de missão da Constelação BR foi apresentado na seção anterior e nas próximas seções serão apresentados cada um dos oito elementos de missão de forma que, no conjunto, sejam visualizadas as alternativas para a implantação da arquitetura de missão da Constelação BR. As arquiteturas alternativas são resultantes das combinações das diversas possibilidades de implantação dos elementos de missão e, eventualmente, da variação do próprio conceito de missão.

8 Seleção de órbitas

Algumas diretrizes e premissas são necessárias para iniciar um estudo para um sistema de internet baseado em satélites de baixa órbita. Sem dúvida um dos parâmetros mais influentes é o custo, que se torna dominante quando se considera que verbas para pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos são escassas em países em desenvolvimento, como o Brasil. O custo de tal sistema é proporcional à quantidade de satélites necessários para estabelecer a constelação, e, portanto, minimizar o custo significa também reduzir o número de satélites. Neste aspecto o país apresenta características bastante satisfatórias, uma vez que boa parte do seu território se localiza na zona equatorial, e, em particular, áreas remotas e isoladas como as da Amazônia e a região centro-oeste. Uma constelação formada por satélites em órbitas equatoriais de inclinação nula conseguiria atender estas regiões com facilidade. Porém, algumas características seriam mais bem atendidas com uma constelação em órbitas inclinadas em relação ao plano do equador. As próximas seções irão analisar estas possibilidades. Porém, será necessário definir preliminarmente alguns parâmetros e requisitos que auxiliem na definição da missão.

8.1 Constelação equatorial

Uma constelação formada por satélites em um único plano orbital permite obter o menor número de satélites capazes de cumprir a missão dentre todas as demais possibilidades. Esta configuração oferece atrativos adicionais, como a possibilidade de se incrementar o número de usuários atendidos simultaneamente pela simples inserção de mais satélites na mesma órbita. O custo de inserção em órbita de satélites equatoriais é também menor, quando comparado aos de órbitas inclinadas. A altitude da possível constelação equatorial pode ser estabelecida com base na necessidade de se prover comunicações em locais afastados do equador, em particular aquelas mais meridionais, como no Rio Grande do Sul, por exemplo. A Figura 8.1 apresenta a distância de uma dada localização ao equador em função da altitude orbital e da elevação mínima da antena de comunicação. Percebe-se que a esta distância aumenta com a altitude do satélite e decresce com a elevação, como seria esperado. Para haver comunicação com Porto Alegre, por exemplo, com uma elevação mínima da antena em solo de 10° , os satélites deverão orbitar a Terra a uma altitude pouco menor do que 1900 km. Por outro lado, nas regiões equatoriais e centrais do Brasil consegue-se comunicação com os satélites com elevações superiores a 40° . Infelizmente esta altitude fica dentro do cinturão de radiação de Van Allen interno [90], formado principalmente por prótons e elétrons de alta energia. Embora seja possível utilizar órbitas nesta altitude, a necessidade de blindagem eletrônica para minimizar os efeitos nocivos da radiação encarece o satélite e o lançamento, e pode inviabilizar sua utilização. Antes de se analisar outras possibilidades, será necessário estabelecer a quantidade mínima de satélites nesta configuração orbital. Para isso adota-se uma órbita de 2000 km, equatorial. A duração do contato de uma estação no Rio Grande do Sul com um satélite desta constelação é de cerca de 7 minutos e 52 segundos, com elevação mínima de 10° . Para garantir continuidade da comunicação seriam necessários 18 satélites igualmente espaçados nesta órbita, com defasagem de 20° entre eles. Por outro lado, uma estação na latitude de Manaus conseguiria acompanhar até três satélites simultaneamente em visibilidade, ou então estabelecer contato

com elevações de antena acima de 45° . É claro que esta solução prioriza o contato com terminais em pequenas latitudes, em prejuízo daqueles situados nas regiões mais meridionais do país. Em resumo, a constelação seria formada por:

- Um plano orbital,
- órbita equatorial de inclinação nula,
- órbita circular a 2000 km de altitude,
- 18 satélites igualmente espaçados nesta órbita.

A cobertura obtida por esta constelação pode ser visualizada na Figura 8.2, que mostra os tempos de contato de duas estações em solo com os satélites da constelação, situadas em Porto Alegre (azul) com 10° de elevação mínima e Manaus (vermelho) com 40° de elevação mínima. O gráfico gerado abrange pouco mais do que uma órbita completa dos satélites. Como não existe nenhum intervalo de tempo sem que haja um satélite em contato com as estações, pode-se garantir que a cobertura desta proposta é completa. Qualquer cidade ou região do país que situe entre estes dois extremos (incluindo também a região equatorial e as latitudes setentrionais até 30° de latitude norte) será igualmente coberta.

As principais vantagens desta constelação são:

- 1) Menor número de satélites possíveis para contato permanente com estações em solo brasileiro
- 2) Menor custo de lançamento quando comparado com órbitas inclinadas, porém não é vantajoso quando comparado a órbitas mais baixas.
- 3) Menor custo de operação e manutenção da constelação.
- 4) Possibilidade de expansão da constelação por meio da inserção em órbita de mais satélites, com órbitas ligeiramente inclinadas ou com altitudes ligeiramente inferiores.

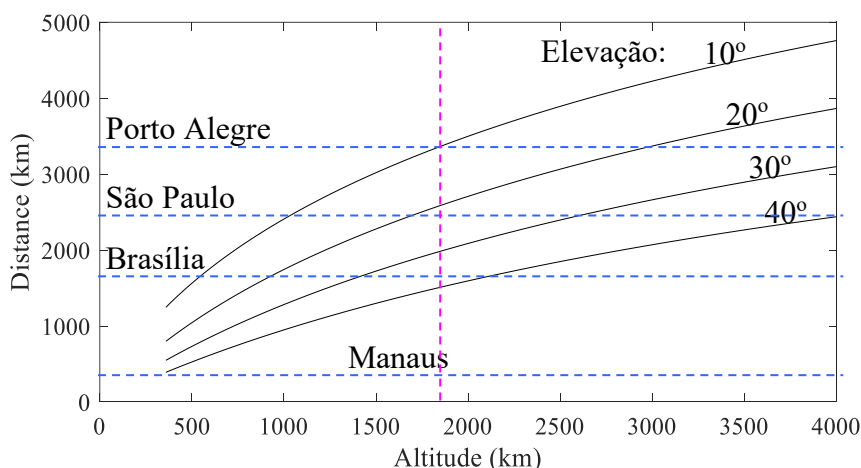


Figura 8.1 – Distância atingida pela constelação equatorial em função da altitude orbital.

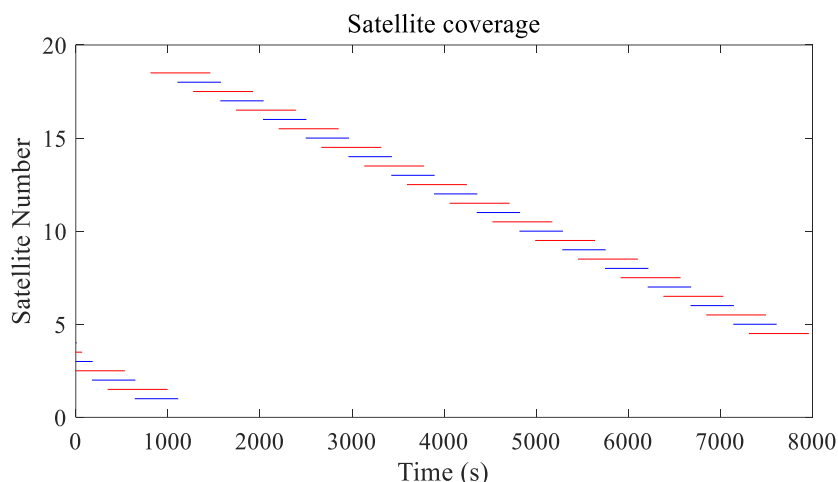


Figura 8.2 – Tempos de contato de estações em Porto Alegre (azul) e Manaus (vermelho).

Em relação às desvantagens, pode-se citar:

- 1) Órbitas dentro do cinturão de radiação, o que exige maior blindagem dos componentes eletrônicos dos satélites.
- 2) Órbitas no limite superior das órbitas baixas (LEO), encarecendo os custos de lançamento, por exigirem lançadores especiais.
- 3) Altitudes maiores requerem mais potência dos transmissores, que, por sua vez, exige maiores painéis solares, aumentando, com isso, os custos, a massa e o volume do satélite.

8.2 Constelação inclinada

As desvantagens da órbita equatorial apontadas na seção anterior podem ser mitigadas pela adoção de uma constelação de baixa inclinação com poucos planos orbitais. É claro que, ao mesmo tempo em que algumas desvantagens da órbita equatorial são eliminadas, outras são incorporadas nesta solução. A decisão por alguma delas só será possível após estudos mais aprofundados a respeito dos custos reais de projeto, desenvolvimento, integração, lançamento e operação dos satélites.

Assume-se inicialmente uma constelação formada por quatro planos orbitais inclinados em relação ao equador, separados por 90° nos seus respectivos nodos ascendentes. Admite-se, igualmente, um ângulo de elevação mínimo de 30° nas latitudes mais meridionais do país, ou seja, a -30° de latitude. A variação da inclinação orbital em decorrência da altitude e da inclinação mínima da antena do terminal de solo é apresentada na Figura 8.3, para a latitude de -30° , na qual se percebe que a inclinação se reduz com a altitude orbital. Pode-se argumentar que seria preferível, neste caso, uma órbita mais inclinada numa menor altitude, mas o número de satélites necessários em cada plano aumenta com a redução da altitude, o que pode comprometer a redução do custo do lançamento. Adota-se então provisoriamente uma altitude para a constelação em 600 km, o que resulta em uma inclinação de 23° , aproximadamente.

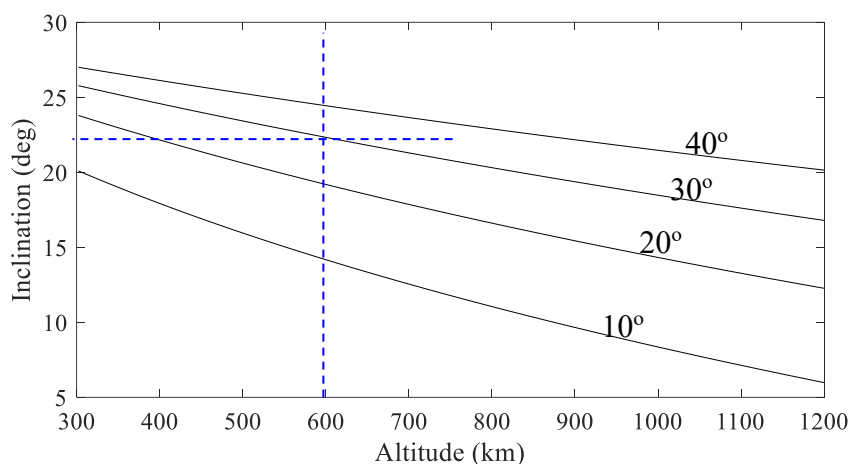


Figura 8.3 – Inclinação orbital em função da altitude e do ângulo de elevação para uma estação no extremo sul do país.

Inicialmente, foram adotados 15 satélites em cada plano orbital, com um total de 60 satélites, com espaçamento entre eles de 24° , o que permite, na altitude de 600 km, que um novo satélite entre em visibilidade de uma estação, com elevação nula, no mesmo instante que outro sobrevoe esta mesma estação no zênite local. Contudo, cálculos de cobertura mostraram que seria necessário aumentar o número de satélites para 20 em cada plano (80 satélites no total), além de também aumentar a inclinação para 30° a fim de manter cobertura completa nas latitudes mais ao sul. Foram também realizadas simulações com variação do número de planos orbitais entre três e seis. Os resultados mais econômicos do ponto de vista do número de satélites foram obtidos com quatro planos orbitais, obtendo-se cobertura completa em qualquer horário do dia na latitude de Porto Alegre, como pode ser visualizado na Figura 8.4, em azul, que apresenta os tempos de contato de um terminal com elevação mínima de 20° . Embora estes resultados se mostrem promissores, terminais localizados nas regiões mais equatoriais passam longos períodos sem contato, em virtude da distância de 90° entre os planos orbitais. Para reduzir este problema acrescentou-se um plano a mais, equatorial, com consequente aumento no número de satélites da constelação, atingindo agora 100 satélites ao todo. Este plano adicional atende preferencialmente a região equatorial, mostrado na Figura 8.4, na cor em vermelho, na latitude de Manaus, mas a cobertura completa é somente atingida com elevação mínima de 20° . Sendo assim a constelação em órbita baixa seria formada por:

- Cinco planos orbitais sendo:
 - Quatro planos orbitais com inclinação de 30° e defasados de 90° , com 20 satélites em cada plano a 600 km de altitude
 - Um plano equatorial com inclinação nula a 600 km de altitude, com 20 satélites igualmente espaçados.

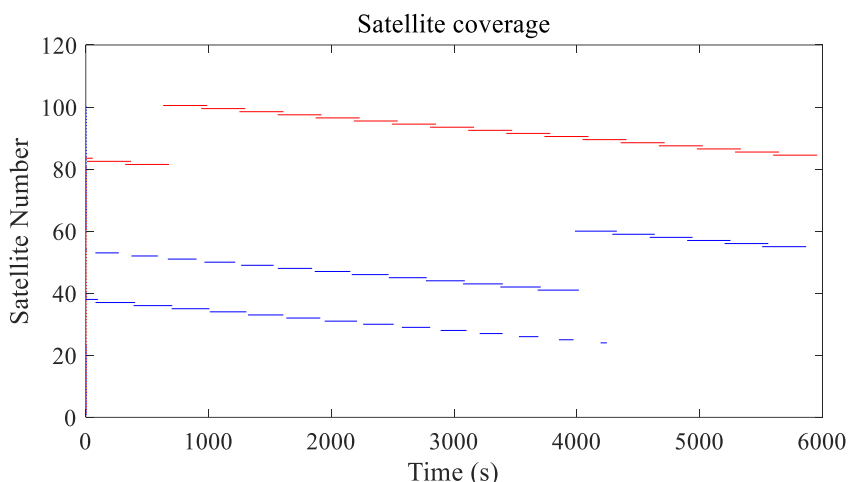


Figura 8.4 – Cobertura da constelação inclinada, para terminais em Porto Alegre (azul) e Manaus (vermelho).

A principal vantagem desta constelação é o aumento da cobertura na extremidade sul do país. O custo de lançamento por satélite é menor do que a constelação estritamente equatorial, por utilizar uma órbita mais baixa, a 600 km de altitude. Porém, o maior número de satélites, que passou de 18 satélites na versão equatorial para 100 satélites nesta nova constelação certamente aumentará significativamente o custo total desta versão. Felizmente as duas versões não são incompatíveis entre si. Seria perfeitamente possível utilizar as órbitas equatoriais a 2000 km de altitude, aliadas a órbitas inclinadas de 30° na altitude de 600 km. O relaxamento da latência permite afirmar que ambas são satisfatórias. Além disso, a configuração dupla viabiliza um crescimento da constelação de forma progressiva, com a incorporação de mais satélites nas órbitas inclinadas à medida que aumenta a demanda.

8.3 Constelação equatorial baixa

As constelações em órbitas abaixo de 1000 km apresentam algumas vantagens que podem torná-las bem atraentes sob determinados aspectos. Um deles é a significativa redução na potência requerida pelo transmissor de bordo para o enlace com os terminais em solo. Desta forma é válido analisar a possibilidade de uma constelação em órbita baixa puramente equatorial, já que a adição de planos inclinados aumenta sobremaneira o número de satélites e, como consequência, o custo total da constelação. Adotou-se, nesta análise, uma constelação equatorial a 800 km de altitude. A redução da altitude em órbita não inclinada irá provocar, sem dúvida, a completa ausência de contato das regiões mais meridionais do país. De fato, considerando-se uma elevação mínima da antena do terminal em solo de 5 graus, a maior latitude atingida por esta constelação, com transmissão contínua, é de -22°, próxima da cidade de Juiz de Fora, em Minas Gerais. O número de satélites nesta altitude resultou em 32, suficiente para manter em contato qualquer terminal no Amazonas com uma elevação mínima da antena de 40°. A Figura 8.5 apresenta os tempos de contato para dois terminais: o primeiro é situado em Manaus, em cor vermelha na figura, e o segundo é fixado em Juiz de Fora, na cor azul. A elevação mínima dos terminais foi ajustada respectivamente em 40° e 5°.

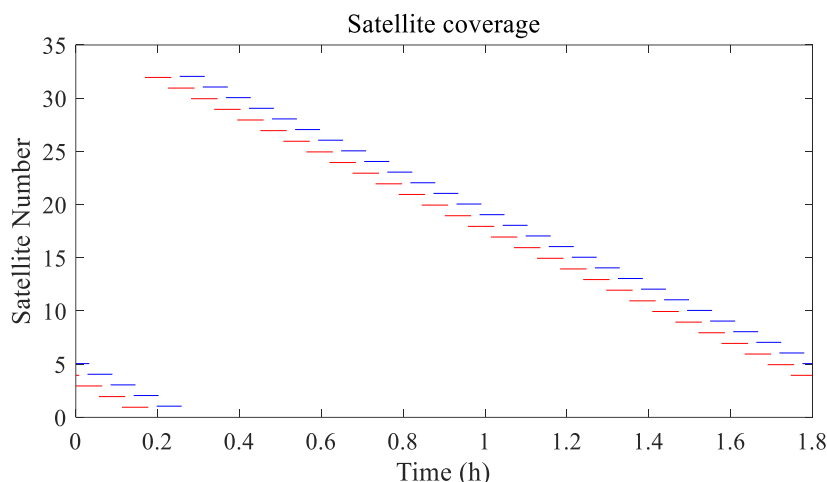


Figura 8.5 - Cobertura da constelação baixa equatorial, a 800 km de altitude, para terminais em Juiz de Fora (azul) e Manaus (vermelho).

8.4 Órbita MEO

Uma constelação de comunicação em órbita de média altitude (MEO - *Medium Earth Orbit*) apresenta diversas vantagens em relação às órbitas já analisadas. A depender da altitude, um único satélite consegue estabelecer contato com todo o território brasileiro. Contudo, atingir esta órbita pode ser significativamente mais caro do que as órbitas baixas, em virtude da necessidade de lançadores mais energéticos, capazes de injetar satélites em órbitas MEO. Após alguns estudos e simulações, obteve-se uma solução adequada com uma constelação equatorial formada por 6 satélites a uma altitude de 8100 km. Os satélites da constelação O3b e O3b mPOWER utilizam também essa órbita, porém a 8063 km de altitude (2 e 3). A constelação proposta oferece cobertura temporal completa tanto na região norte, com uma elevação de antena de 40°, como também na região sul, com elevação de 20°. A Figura 8.6 mostra os tempos de contato de um suposto terminal em Manaus (vermelho) e em Porto Alegre (azul), para um intervalo de 8 horas, que compreende pouco mais de um período orbital completo. Na ordenada encontra-se o identificador numérico dos satélites da constelação, de 1 a 6.

Além do maior custo de lançamento essa órbita exige do satélite uma maior blindagem dos componentes eletrônicos para evitar os efeitos nocivos da radiação, uma vez que a dosagem radioativa nesta altitude é mais elevada do que aquela encontrada em órbitas baixas por situar-se dentro do cinturão de Van Allen, com elétrons livres e prótons capturados. A radiação reduz a vida útil dos componentes eletrônicos e provoca comutações no conteúdo das memórias de computadores. A blindagem reduz as degradações provocadas pelas partículas energéticas, porém não consegue mitigar seus efeitos por completo. Ademais, quanto maior for a necessidade de blindagem maior será a massa empregada nela, o que encarece ainda mais o projeto e o lançamento. A Figura 8.7 apresenta o perfil de radiação de prótons nas altitudes orbitais, com energia superior a 0,1 MeV. A radiação depende de diversos fatores, como o vento solar, a atividade solar, a latitude do local, entre diversos outros. Nesta figura, o ponto vermelho corresponde à altitude da constelação MEO proposta aqui.

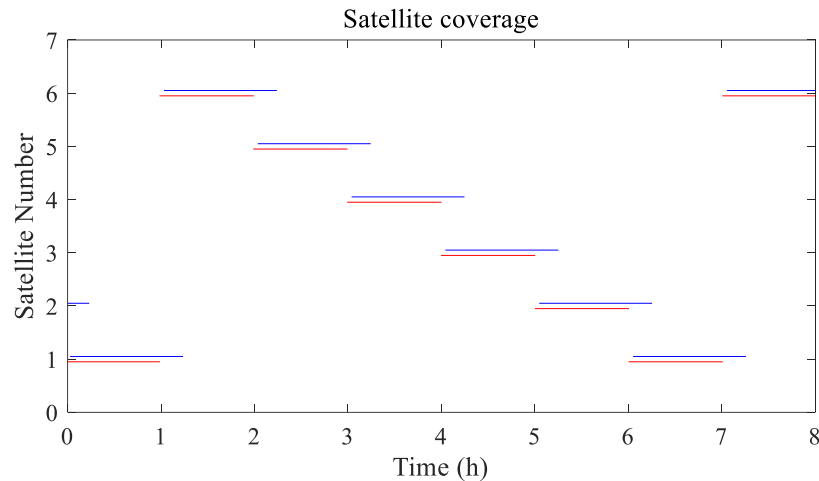


Figura 8.6 - Cobertura da constelação MEO, para terminais em Porto Alegre (azul) e Manaus (vermelho).

Deve ser mencionado, além disso, que poucos lançadores conseguem atingir órbitas equatoriais de forma eficiente. Entre estes poucos, o Ariane e o GLSV indiano se destacam, em virtude de possuírem bases de lançamento próximas à linha do equador. Alguns sistemas de lançamento podem ser deslocados para regiões mais equatoriais, e outros, como o Falcon 9 da SpaceX, conseguem efetuar manobras durante o voo para atingir órbitas equatoriais, mesmo partindo de latitudes moderadas.

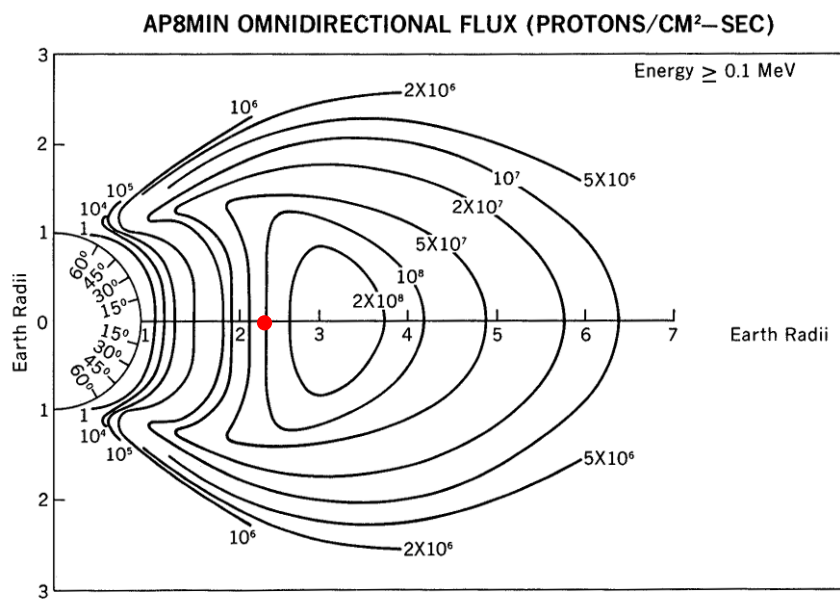


Figure 65. AP8MIN R-λ Plot of Constant Intensity Flux Contours with an Energy of ≥ 0.1 MeV

Figura 8.7 - Número de prótons fornecido pelo AP8MIN, com energia superior a 0.1 MeV.

9 Arquitetura de comando, controle e comunicações

A arquitetura de comando, controle e comunicações da Constelação BR utilizará as estações *gateway*, as estações de monitoramento e controle e a rede terrestre de comunicações para o fornecimento de acesso à internet para os usuários do sistema e para o monitoramento e controle dos segmentos espacial e solo da missão.

9.1 Região de cobertura das comunicações solo-satélite

Nesta seção serão consideradas as constelações equatoriais com satélites nas altitudes de 800 km, 2.000 km e 8.100 km analisadas na seção 3.

A Tabela 9.1 indica as regiões de visibilidade de um satélite da Constelação com ângulo de elevação mínimo na faixa $5^\circ - 40^\circ$ e altitudes de órbita de 800 km, 2.000 km e 8.100 km.

Tabela 9.1: Regiões de visibilidade em função da elevação mínima do observador no solo.

Elevação mínima ($^\circ$)	Raio da região de visibilidade * (km)		
	H = 800 km	H = 2.000 km	H = 8.100 km
5	2.530,0	3.971,6	6.564,4
10	2.109,4	3.499,2	6.043,3
15	1.744,9	2.961,3	5.545,5
20	1.490,3	2.708,0	5.070,1
25	1.264,7	2.379,3	4.616,2
30	1.078,7	2.087,7	4.182,5
35	923,2	1.827,9	3.767,8
40	790,8	1.594,7	3.370,4

* - Medido sobre a superfície da Terra.

A Tabela 9.1 mostra que a área da região de visibilidade de um satélite a determinada altitude aumenta com a diminuição do ângulo de elevação mínimo. Esta área atinge o seu valor máximo para o ângulo de elevação mínimo de 0° , condição em que o satélite é visto no horizonte local do ponto de localização de um observador no solo.

A região de visibilidade não se confunde com a região de cobertura ou *footprint* dos sensores embarcados no satélite. Considerando-se o mesmo ângulo de elevação mínimo, a região de cobertura está contida na região de visibilidade e a sua área é menor ou igual à área da região de visibilidade. No caso da comunicação entre o satélite e o solo, a região de cobertura corresponde à superfície no solo capaz de receber os sinais irradiados pela antena embarcada.

A comunicação com o satélite com ângulos de elevação altos tem a vantagem da maior probabilidade de evitar o bloqueio ou a atenuação do sinal por obstáculos próximos ou distantes da localização da estação em solo. A menor distância entre a estação e o satélite nestas condições também tem a vantagem de apresentar menor atenuação do sinal. A principal desvantagem é a redução do tamanho da região que permite a visada do satélite com ângulos elevados.

A Figura 9.1 representa as posições geográficas de quatro usuários (A, B, C e D) do sistema espacial Constelação BR e três possibilidades para a localização das regiões de cobertura, para

um determinado valor de ângulo de elevação mínimo, de três satélites adjacentes da Constelação.

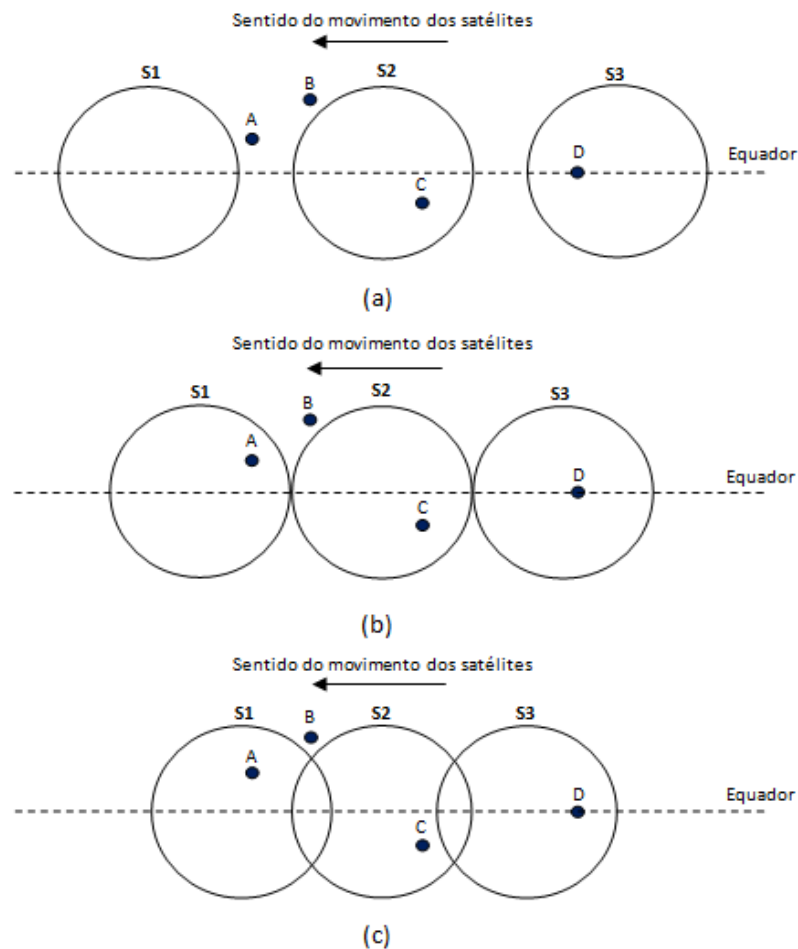


Figura 9.1 - Possibilidades de posicionamento relativo das regiões de cobertura dos satélites adjacentes da Constelação BR.

As três possibilidades ilustradas correspondem a diferentes quantidades de satélites na Constelação acarretando respectivamente um gap, ou uma justaposição, ou uma superposição parcial das regiões de cobertura.

A Figura 9.1(a) mostra que, no instante de tempo considerado, os usuários A e B não têm acesso ao segmento espacial da Constelação e os usuários C e D têm acesso por meio dos satélites S2 e S3, respectivamente.

Observando-se o sentido de movimento dos satélites S1, S2 e S3 indicado na Figura 9.1(a) percebe-se que há um instante de tempo posterior em que os usuários A e B passam a ter acesso ao satélite S2, o usuário C perde seu acesso ao segmento espacial e o usuário D continua com acesso ao satélite S3.

Na situação ilustrada na Figura 9.1 (b) os usuários A, C e D têm acesso ao segmento espacial por meio dos satélites S1, S2 e S3, respectivamente, e o usuário B está sem acesso. Em um instante posterior o usuário A se encontra no limite da região de cobertura do satélite S1, os usuários B e C têm acesso ao satélite S2 e o usuário D ao satélite S3. Nota-se que nesta configuração das coberturas satelitais o usuário D, localizado na linha do equador, tem acesso permanente ao segmento espacial.

A superposição das regiões de cobertura apresentada na Figura 9.1 (c) mostra que os usuários A, C e D têm acesso permanente ao segmento espacial e o usuário B obtém acesso somente durante determinados períodos de tempo em função do movimento dos satélites da Constelação. Constata-se que para que um usuário tenha acesso permanente ele deve estar localizado na faixa delimitada pelos pontos de intersecção das coberturas dos satélites adjacentes, denominada de *street of coverage*. Esta região é simétrica com relação ao ground track que é a linha traçada no solo pelo deslocamento dos pontos de subsatélite da Constelação. No caso das órbitas equatoriais a *ground track* corresponde à linha do equador.

Como a Constelação BR deve prover o serviço de acesso à internet continuamente a usuários nas Regiões 1 e 2 (seção 7.2.3) conclui-se que cada uma dessas regiões deve ser coberta pela *street of coverage* da subconstelação LEO, ou da subconstelação MEO, ou por ambas.

A Figura 9.2 mostra novamente a situação das regiões de cobertura dos satélites da Figura 9.1 (c) identificando alguns parâmetros de interesse para a discussão que se segue.

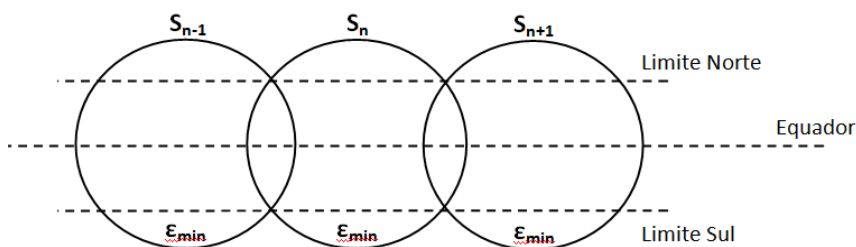


Figura 9.2 - Street of coverage da Constelação BR.

Como a Constelação foi assumida como equatorial, os limites Norte e Sul da *street of coverage* correspondem aos paralelos de latitude Norte e Sul, respectivamente. ϵ_{min} é o ângulo de elevação mínimo das regiões de cobertura consideradas na figura.

Inspecionando-se a Figura 9.2 constata-se que o requisito de serviço contínuo faz com que a Constelação não atenda aos potenciais usuários localizados na região externa à *street of coverage*. O aumento da *street of coverage* requer o aumento da intersecção das regiões de cobertura de cada satélite e, conseqüentemente, do número de satélites. Alternativamente, esse aumento pode ser conseguido, mantendo-se o número de satélites, diminuindo-se o valor de ϵ_{min} o que acarreta, como visto acima, um aumento da região de visibilidade possibilitando também o aumento da região de cobertura.

Desta forma é necessária uma solução de compromisso entre o número de satélites da constelação e o requisito do ângulo de elevação mínimo nas fronteiras da *street of coverage*. Essa solução de compromisso é mais importante para a *street of coverage* das subconstelações LEO cujos satélites possuem regiões de cobertura menores que os satélites da subconstelação MEO, como mostrado na Tabela 9.1.

Conforme os requisitos preliminares da seção 7.2.3, a Região 1 é delimitada pelos paralelos 20° Sul e Norte e a Região 2 é delimitada ao sul pelo paralelo 34°.

Ainda conforme a Seção 7.2.3, o ângulo de elevação mínimo nos limites das Regiões 1 e 2 deve ser 20° e 10°, respectivamente.

A Figura 9.3 apresenta os limites da *street of coverage* (“*Maximum latitude*”) em função do ângulo de elevação mínimo (“*Minimum elevation angle*”) para subconstelações LEO (altitude 2.000 km) com 15 a 20 satélites.

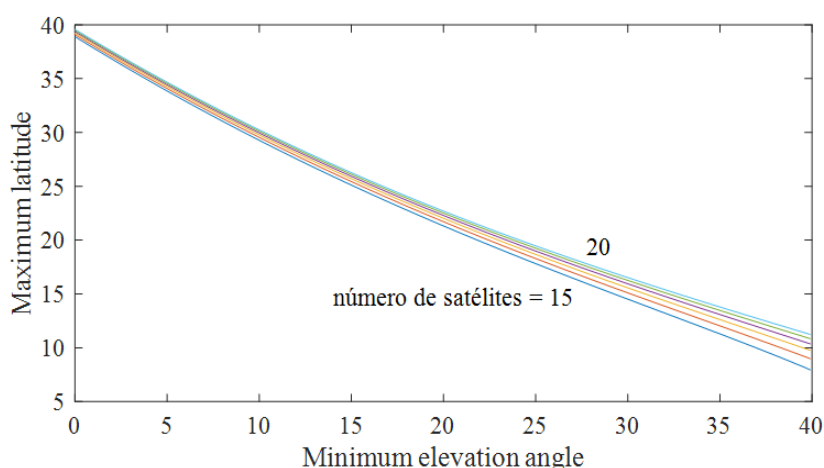


Figura 9.3 - Limites da street of coverage da subconstelação LEO (H = 2.000 km).

Inspecionando-se a Figura 9.3 verifica-se que o requisito de ângulo de elevação mínimo de 20° na fronteira da Região 1 (latitude 20°) requer a quantidade de 16 satélites na subconstelação. Na realidade, conforme a Figura 9.3, o requisito é atendido até para uma latitude um pouco maior que 20°.

Ainda com base na Figura 9.3, verifica-se que a Região 2 (latitude 34°) também é coberta continuamente pelas subconstelações LEO, mas apenas se for aceito ângulo de elevação mínimo de aproximadamente 5°.

Analogamente ao apresentado acima, a Figura 9.4 apresenta os limites da *street of coverage* em função do ângulo de elevação mínimo para as subconstelações MEO (altitude 8.100 km) com 5 a 9 satélites.

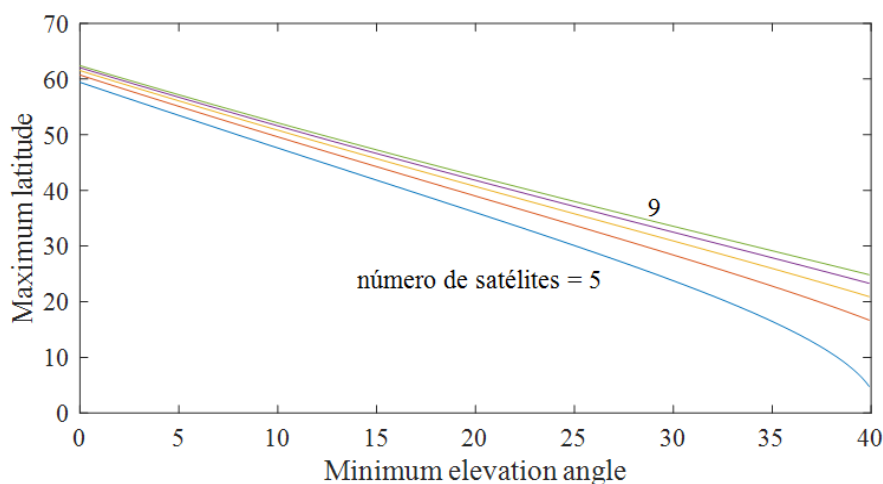


Figura 9.4 - Limites da street of coverage da subconstelação MEO ($H = 8.100$ km).

Inspecionando-se a Figura 9.4 verifica-se que o requisito de ângulo de elevação mínimo de 10° na fronteira da Região 2 (latitude 34°) é atendido com folga. Na realidade, este requisito é atendido até a latitude de aproximadamente 48° com a quantidade de 5 satélites na subconstelação. Conforme a Figura 9.4, o ângulo de elevação mínimo na fronteira da Região 2 é um pouco maior que 20° para a subconstelação com 5 satélites.

Ainda com base na Figura 9.4, verifica-se que a Região 1 (latitude 20°) é coberta pela subconstelação MEO com 5 satélites com ângulo de elevação mínimo de aproximadamente 33° .

No caso da constelação em órbita baixa, a 800 km, os limites da *street of coverage* variam pouco, uma vez que esta órbita utiliza 32 satélites, e a inclusão de mais um satélite ou a remoção de um deles não afeta substancialmente estes limites. A Figura 9.5 apresenta os limites em função da elevação mínima, para constelações formadas por 30, 32, 34 e 36 satélites uniformemente distribuídos na órbita, na qual se nota pouca variação destes limites com o número de satélites.

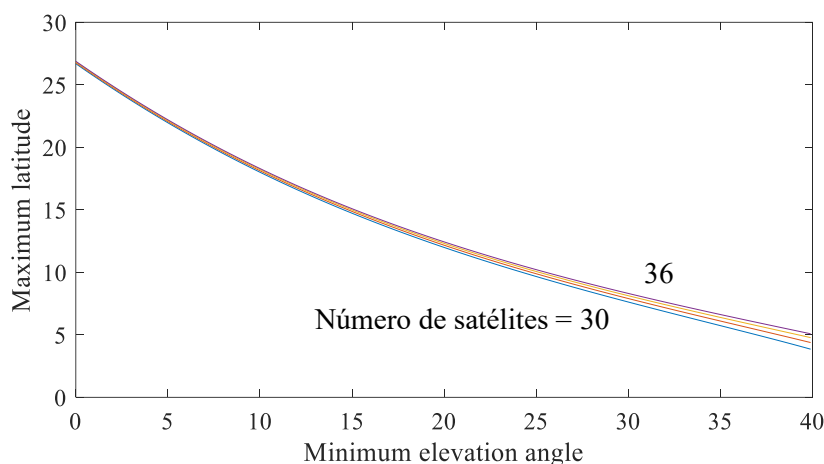


Figura 9.5 - Limites da street of coverage da constelação LEO ($H = 800$ km).

Inspecionando-se a Figura 9.5 verifica-se que o requisito de ângulo de elevação mínimo de 20° na fronteira da Região 1 (latitude 20°) não é atendido. O ângulo de elevação mínimo nessa fronteira é aproximadamente $7,5^\circ$.

Considerando-se 5° como o ângulo de elevação mínimo aceitável constata-se, com base na Figura 4.5, que a Região 2 (latitudes entre 20° e 34°) não é, praticamente, coberta por esta subconstelação.

É importante notar do exposto acima que, como a região de cobertura da Constelação BR é a *street of coverage* de cada subconstelação, não há necessidade de que as antenas embarcadas irradie para fora dessa região. Na realidade, é preferível que elas irradie somente para a *street of coverage*, com área menor que a da região de visibilidade, porque isto possibilita o emprego de antenas com ganho maior o que é benéfico para a qualidade das comunicações solo-satélite.

Note-se, também, que a missão da Constelação BR pode ser revisada futuramente de forma a incluir serviços secundários que não requeiram acesso contínuo ao segmento espacial e que cubram, por exemplo, toda a região de visibilidade da subconstelação LEO, incluindo a região externa à sua *street of coverage*. Dois exemplos de utilização da cobertura ampliada são o serviço de mensagem em tempo quase real e a internet das Coisas (IoT – *internet of Things*). Esses serviços necessitariam da inclusão de cargas úteis secundárias apropriadas nos satélites da subconstelação.

9.2 Largura de banda dos enlaces do usuário

O sistema de comunicações espacial Constelação BR deve permitir o acesso rápido dos seus usuários a diversos serviços da internet. O equipamento digital do usuário (computador, *tablet*,

smartphone) troca as informações ou dados digitais necessários para a navegação na internet com o Terminal do Usuário (TU) da Constelação BR.

Para enviar dados para a internet (*upload*) o TU utiliza as informações oriundas do equipamento digital para processar um sinal de radiofrequência (RF) que é transmitido para o segmento espacial por meio do “enlace de subida do usuário”. Uma característica importante deste enlace é a sua largura da banda de frequências a qual depende do processamento realizado (tipo de modulação, emprego de códigos corretores de erros, encriptação, adaptação de protocolos da internet etc.) e da taxa (“velocidade”) dos dados de *upload*.

Analogamente, para receber dados da internet (*download*) o TU processa o sinal de RF recebido do segmento espacial por meio do “enlace de descida do usuário” gerando as informações que são enviadas para o equipamento digital. Este enlace também tem como uma das suas características importantes a largura da banda de frequências a qual depende do processamento realizado pelo segmento espacial (tipo de modulação, emprego de códigos corretores de erros, encriptação, adaptação de protocolos da internet etc.) e da taxa dos dados de *download*.

Quanto maior for a taxa de dados de *upload* e *download*, mantidas as demais características e os processamentos, maior será a largura de banda dos enlaces de subida e descida do usuário, respectivamente.

A largura total da banda de frequências utilizada pelo segmento espacial é limitada e, no Brasil, regulamentada pela ANATEL. Esta banda tem que ser rateada entre todos os usuários passíveis de estarem conectados simultaneamente ao segmento espacial (“capacidade do segmento”) e, como será visto nas próximas seções, são empregadas diversas técnicas para otimizar o produto “capacidade do sistema X largura da banda de frequências do usuário”.

A Tabela 9.2 relaciona a taxa de dados (para *upload* ou *download*) do equipamento digital do usuário com a largura da banda de frequências (BW) do enlace (subida ou descida) considerando o tipo de modulação e a taxa do código corretor de erros que são os dois fatores de maior impacto neste parâmetro. Nesta tabela assumiu-se que a modulação e a codificação para a correção de erros (modcod) são conformes às normas de transmissão digital de sinais DVB-S2 [30] e DVB-S2X [31]. Na tabela, Γ é a eficiência espectral da modulação e codificação associada, em $\text{bits} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, e E_s/N_0 é a mínima relação Energia do símbolo / Densidade espectral de ruído, em dB, necessária para a operação QEF (*Quasi Error Free*). A operação QEF corresponde a BER (*Bit Error Rate*) de 10^{-10} . Os valores de largura de banda da tabela foram obtidos das taxas de símbolo assumindo-se filtragem dos dados digitais com um filtro coseno levantado (*raised cosine*) com *roll off* de 0,2. Os modcods da Tabela 9.2 foram listados apenas como uma possibilidade de aplicação na missão Constelação BR, não sendo o resultado da aplicação de nenhum critério técnico específico.

Tabela 9.2 - Taxa de dados e largura de banda dos enlaces do usuário.

TAXA DE DADOS (Mbps)	QPSK 5/6, $\Gamma = 1,654663$, $(E_s/N_0) = 5,18$ dB		8PSK 5/6, $\Gamma = 2,478562$, $(E_s/N_0) = 9,35$ dB		16APSK 5/6, $\Gamma = 3,300184$, $(E_s/N_0) = 11,61$ dB		32APSK 5/6, $\Gamma = 4,119540$, $(E_s/N_0) = 14,28$ dB		64APSK 5/6, $\Gamma = 4,936939$, $(E_s/N_0) = 16,55$ dB	
	TAXA DE SÍMBOLOS (Mps)	BW (MHz)	TAXA DE SÍMBOLOS (Mps)	BW (MHz)	TAXA DE SÍMBOLOS (Mps)	BW (MHz)	TAXA DE SÍMBOLOS (Mps)	BW (MHz)	TAXA DE SÍMBOLOS (Mps)	BW (MHz)
5	3,02	3,63	2,02	2,42	1,52	1,82	1,21	1,46	1,01	1,22
10	6,04	7,25	4,03	4,84	3,03	3,64	2,43	2,91	2,03	2,43
15	9,07	10,88	6,05	7,26	4,55	5,45	3,64	4,37	3,04	3,65
20	12,09	14,50	8,07	9,68	6,06	7,27	4,85	5,83	4,05	4,86
25	15,11	18,13	10,09	12,10	7,58	9,09	6,07	7,28	5,06	6,08
30	18,13	21,76	12,10	14,52	9,09	10,91	7,28	8,74	6,08	7,29
35	21,15	25,38	14,12	16,95	10,61	12,73	8,50	10,20	7,09	8,51
40	24,17	29,01	16,14	19,37	12,12	14,54	9,71	11,65	8,10	9,72
45	27,20	32,64	18,16	21,79	13,64	16,36	10,92	13,11	9,12	10,94
50	30,22	36,26	20,17	24,21	15,15	18,18	12,14	14,56	10,13	12,15

Inspecionando-se a Tabela 9.2 constata-se que a largura de banda de frequências dos enlaces diminui com o aumento da ordem da modulação digital, o que é um comportamento desejável. Todavia, modulações de ordem mais alta requerem relação sinal-ruído maiores para o mesmo desempenho do enlace e isto implica no aumento da potência efetiva irradiada pelo transmissor (maior potência de transmissão, maior ganho da antena transmissora ou ambos).

A largura da banda de frequências do enlace do usuário de subida será denominada de BW_U_s e a largura da banda de frequências do enlace do usuário de descida será denominada de BW_U_d .

Pode-se, por exemplo, fazer $BW_U_s = 2,5$ MHz para acomodar o sinal do enlace de subida com modcod 8PSK 5/6 e taxa de dados de *upload* de 5 Mbps. Analogamente, pode-se definir $BW_U_d = 11$ MHz para acomodar o sinal do enlace de descida com modcod 32APSK e taxa de dados de *download* de 35 Mbps.

No cálculo de enlaces, a figura de mérito normalmente utilizada para a avaliação da qualidade do sinal demodulado é a relação Energia do bit / Densidade espectral de ruído (E_b/N_0). A Tabela 9.3 apresenta os valores de E_b/N_0 requeridos para a operação QEF das modulações da Tabela 9.2, calculados utilizando-se a expressão $(E_b/N_0) = (E_s/N_0) - 10 \cdot \log(\Gamma)$.

Tabela 9.3: E_b/N_0 para operação QEF dos modcods da Tabela 9.2.

MODCOD	(E_s/N_0) (dB)	Γ (bits.s-1.Hz-1)	(E_b/N_0) (dB)
QPSK 5/6	5,18	1,654663	2,99
8PSK 5/6	9,35	2,478562	5,41
16APSK 5/6	11,61	3,300184	6,42
32APSK 5/6	14,28	4,119540	8,13
64APSK 5/6	16,55	4,936939	9,61

9.3 Avaliação preliminar dos enlaces do usuário

O objetivo desta seção é a avaliação preliminar das figuras de mérito EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) e G/T (*Antenna Gain / Noise Temperature*) dos enlaces de subida e descida do usuário considerando-se as bandas de frequências passíveis de serem utilizadas nesta aplicação.

Consultando-se, de forma preliminar, a Resolução ANATEL 772/2025 (“Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil – PDFF”) [113] verifica-se que as bandas de frequências 10,7 – 11,7 GHz e 13,8 – 14,8 GHz podem ser utilizadas nos enlaces de descida e subida, respectivamente, do Serviço Fixo por Satélite no qual se enquadra o serviço de comunicação a ser fornecido pela Constelação BR. Essas bandas de frequências fazem parte da chamada banda Ku.

Em outra consulta à mesma referência constata-se que as bandas de frequências 19,7 – 21,2 GHz e 27,0 – 28,5 GHz também podem ser utilizadas nos enlaces de descida e subida, respectivamente, do Serviço Fixo por Satélite. Essas bandas de frequências fazem parte da banda denominada de Ka.

A confirmação efetiva da possibilidade do uso das bandas de frequências acima no tipo de missão espacial da Constelação BR demanda um estudo mais aprofundado da regulamentação da ANATEL devido à sua complexidade, não se descartando a necessidade de consultas formais a esta agência.

Um dos passos necessários para a avaliação dos enlaces desta seção é a determinação da temperatura de ruído do sistema de recepção do Terminal do Usuário (TU) e do *transponder* embarcado no satélite.

A recepção pelo TU dos sinais do enlace de descida pode ocorrer nas bandas 10,7 – 11,7 GHz ou 19,7 – 21,2 GHz dependendo da escolha da banda Ku ou Ka, respectivamente, para o enlace de descida do usuário.

Analogamente, a recepção pelo *transponder* embarcado dos sinais do enlace de subida pode ocorrer nas bandas 13,8 – 14,8 GHz ou 27,0 – 28,5 GHz dependendo da escolha da banda Ku ou Ka, respectivamente, para o enlace de subida do usuário.

Inicialmente serão consideradas essas duas bandas, Ku e Ka, para os enlaces do usuário para que posteriormente se verifique qual é a melhor solução para os enlaces com as subconstelações LEO e MEO uma vez que a distância TU-satélite é bastante diferente nos dois tipos de órbita.

A Tabela 9.4 indica valores típicos de temperatura de ruído da antena (T_A) e do LNA (*Low Noise Amplifier*) (T_{LNA}) para os sistemas de recepção (RX) do TU e do *transponder* dos satélites nas bandas Ku e Ka.

Tabela 9.4: Temperaturas de ruído típicas para as antenas e LNAs de solo e embarcados.

Enlace	Frequências (GHz)	RX do TU		RX do transponder	
		T _A (K)	T _{LNA} (K)	T _A (K)	T _{LNA} (K)
Descida	10,7 – 11,7	50	71	--	--
	19,7 – 21,2	75	71	--	--
Subida	13,8 – 14,8	--	--	295	120
	27,0 – 28,5	--	--	295	202

No processo de avaliação preliminar dos enlaces desta seção, são consideradas as temperaturas de ruído de sistema obtidas dos dados da Tabela 9.4 e os ganhos das antenas de recepção são considerados nulos para se obter os valores de G/T. Nos pontos de transmissão, a potência dos transmissores é assumida como 1 W e os ganhos das antenas transmissoras são considerados nulos resultando em EIRP de 0 dBW. São calculadas as relações E_b/N_0 para os enlaces de subida e descida nestas condições e verifica-se se o valor mínimo de E_b/N_0 para cada tipo de modulação (Tabela 9.3) foi, ou não, atingido. Caso não seja, a EIRP e a G/T do sistema de recepção de cada enlace são ajustados para se obter o desempenho E_b/N_0 desejado. Esse ajuste é guiado por várias considerações como, por exemplo, a potência máxima viável dos transmissores no caso da EIRP e a cobertura da antena de recepção no caso da G/T.

A Tabela 9.5 mostra as distâncias satélite-TU (*slant range*) máximas para os satélites nas órbitas LEO e MEO e ângulos de elevação mínimos de 5°, 10° e 20°. A distância é máxima quando o TU está na fronteira da região de visibilidade correspondente ao ângulo de elevação mínimo considerado. A distância é mínima quando o TU está localizado no ponto de subsatélite do satélite com o qual ele se comunica e é igual à altitude do satélite.

Tabela 9.5: Distâncias TU-satélite em função da altitude e ângulo de elevação mínimo.

Elevação mínima	H = 800 km	H = 2.000 km	H = 8.100 km
	Distância máxima (km)	Distância máxima (km)	Distância máxima (km)
5°	2.783,9	4.905,0	12.453,6
10°	2.366,9	4.436,8	11.937,1
20°	1.768,7	3.672,7	10.997,9

Serão consideradas as seguintes condições para a avaliação preliminar do enlace do usuário de subida:

- 1) Frequência da portadora: 14,8 GHz (Ku) / 28,5 GHz (Ka);
- 2) Taxa de dados (*upload*): 10 Mbps
- 3) Modulação, codificação, taxa de símbolos e banda do sinal: conforme Tabela 9.2;
- 4) Potência do transmissor do Terminal do Usuário: 1 W;

- 5) Ganho da antena do TU: 0 dBi;
- 6) Temperatura de ruído do sistema de recepção embarcado: conforme Tabela 9.4;
- 7) Ganho da antena do sistema de recepção embarcado: 0 dBi;
- 8) E_b/N_0 requerida para cada modcod para operação QEF: conforme Tabela 9.3;
- 9) Distâncias TU-satélite: conforme Tabela 9.5;
- 10) Total de perdas do canal de transmissão (exceto a Perda do Espaço Livre): 6 dB.

Observando-se as condições acima foram obtidos os valores da PEL (Perda do Espaço Livre) e da Margem da E_b/N_0 listados na Tabela 9.6 (Margem da $E_b/N_0 = (E_b/N_0)_{calculada} - (E_b/N_0)_{requerida}$).

Tabela 9.6: Margens da E_b/N_0 no enlace do usuário de subida.

EL. MIN.	MOD	BW (MHZ)	800 km				2.000 km				8.100 km			
			14,8 GHz		28,5 GHz		14,8 GHz		28,5 GHz		14,8 GHz		28,5 GHz	
			PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)
90°	QPSK	7,25	173,0	-51,3	179,6	-57,8	181,9	-59,3	187,6	-65,7	194,0	-71,4	199,7	-77,9
	8PSK	4,84		-53,7		-60,2		-61,7		-68,2		-73,8		-80,3
	16APSK	3,64		-54,8		-61,2		-62,7		-69,2		-74,9		-81,3
	32APSK	2,91		-56,5		-62,9		-64,4		-70,9		-76,6		-83,1
	64APSK	2,43		-58,0		-64,4		-65,9		-72,4		-78,1		-84,5
20°	QPSK	7,25	180,8	-58,2	186,5	-64,7	187,2	-64,5	192,8	-71,0	196,7	-74,1	202,4	-80,5
	8PSK	4,84		-60,6		-67,1		-67,0		-73,4		-76,5		-83,0
	16APSK	3,64		-61,6		-68,1		-68,0		-74,5		-77,5		-84,0
	32APSK	2,91		-63,4		-69,8		-69,7		-76,2		-79,2		-85,7
	64APSK	2,43		-64,9		-71,3		-71,2		-77,7		-80,7		-87,2
10°	QPSK	7,25	183,3	-60,7	189,0	-67,2	188,8	-66,2	194,5	-72,7	197,4	-74,8	203,1	-81,3
	8PSK	4,84		-63,2		-69,6		-68,6		-75,1		-77,2		-83,7
	16APSK	3,64		-64,2		-70,6		-69,6		-76,1		-78,2		-84,7
	32APSK	2,91		-65,9		-72,4		-71,4		-77,8		-79,9		-86,4
	64APSK	2,43		-67,4		-73,9		-72,8		-79,3		-81,4		-87,9
5°	QPSK	7,25	184,7	-62,1	190,4	-68,6	189,7	-67,1	195,4	-73,5	197,8	-75,2	203,5	-81,6
	8PSK	4,84		-64,6		-71,0		-69,5		-76,0		-77,6		-84,0
	16APSK	3,64		-65,6		-72,1		-70,5		-77,0		-78,6		-85,1
	32APSK	2,91		-67,3		-73,8		-72,2		-78,7		-80,3		-86,8
	64APSK	2,43		-68,8		-75,3		-73,7		-80,2		-81,8		-88,3

Na avaliação preliminar do enlace do usuário de descida serão consideradas as seguintes condições:

- 1) Frequência da portadora: 11,7 GHz (Ku) / 21,2 GHz (Ka);
- 2) Taxa de dados (*download*): 50 Mbps
- 3) Modulação, codificação, taxa de símbolos e banda do sinal: conforme Tabela 9.2;
- 4) Potência da portadora transmitida pelo satélite: 1 W;
- 5) Ganho da antena transmissora do satélite: 0 dBi;
- 6) Temperatura de ruído do sistema de recepção do TU: conforme Tabela 9.4;
- 7) Ganho da antena do sistema de recepção do TU: 0 dBi;
- 8) E_b/N_0 requerida para cada modcod para operação QEF: conforme Tabela 9.3;
- 9) Distâncias TU-satélite: conforme Tabela 9.5;
- 10) Total de perdas do canal de transmissão (exceto a Perda do Espaço Livre): 6 dB.

Observando-se as condições acima foram obtidos os valores da PEL (Perda do Espaço Livre) e da Margem da E_b/N_0 listados na Tabela 9.7 (Margem da $E_b/N_0 = (E_b/N_0)_{calculada} - (E_b/N_0)_{requerida}$).

Tabela 9.7: Margens da E_b/N_0 no enlace do usuário de descida.

EL. MIN.	MOD	BW (MHZ)	800 km				2.000 km				8.100 km			
			11,7 GHz		21,2 GHz		11,7 GHz		21,2 GHz		11,7 GHz		21,2 GHz	
			PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)
90°	QPSK	36,26	171,9	-50,9	177,0	-56,9	179,8	-58,9	185,0	-64,8	192,0	-71,0	197,1	-77,0
	8PSK	24,21		-53,3										
	16APSK	18,18		-54,3										
	32APSK	14,56		-56,1										
	64APSK	12,15		-57,5										
20°	QPSK	36,26	178,8	-57,8	183,9	-63,8	185,1	-64,1	190,3	-70,1	194,6	-73,7	199,8	-79,6
	8PSK	24,21		-60,2										
	16APSK	18,18		-61,2										
	32APSK	14,56		-63,0										
	64APSK	12,15		-64,4										
10°	QPSK	36,26	181,3	-60,3	186,5	-66,3	186,8	-65,8	191,9	-71,8	195,3	-74,4	200,5	-80,4
	8PSK	24,21		-62,8										
	16APSK	18,18		-63,8										
	32APSK	14,56		-65,5										
	64APSK	12,15		-67,0										
5°	QPSK	36,26	182,7	-61,7	187,9	-67,7	187,6	-66,7	192,8	-72,6	195,7	-74,7	200,9	-80,7
	8PSK	24,21		-64,2										
	16APSK	18,18		-65,2										
	32APSK	14,56		-66,9										
	64APSK	12,15		-68,4										

Nas seções sobre a carga útil e o terminal do usuário serão considerados os ajustes dos parâmetros EIRP e G/T do Terminal do Usuário e do *transponder* embarcado necessários para tornar a Margem da E_b/N_0 positiva ou nula a partir dos resultados obtidos na presente seção.

9.4 Avaliação preliminar dos enlaces da estação *gateway*

Os enlaces de subida e descida da estação *gateway* são avaliados assumindo-se que as suas larguras de banda finais correspondem às larguras de banda dos enlaces de descida e subida, respectivamente, do terminal do usuário. Essa hipótese é compatível com o uso de uma portadora separada para cada usuário do sistema (SCPC – *Single Carrier Per Channel*).

Como os enlaces da estação *gateway* têm que transportar os sinais de todos os usuários que podem utilizar o sistema simultaneamente, as suas larguras de banda representam um gargalo para a capacidade do sistema e por isto é importante que estas larguras de banda sejam as maiores possíveis. Por este motivo só foi considerada a banda Ka na qual, potencialmente, pode-se chegar a larguras de banda contínuas acima de 3 GHz o que, em princípio, não acontece com a banda Ku.

O método da avaliação preliminar é o mesmo utilizado na seção anterior para os enlaces do usuário.

São consideradas as seguintes condições para a avaliação preliminar do enlace do *gateway* de subida:

- 1) Frequência da portadora: 28,5 GHz (Ka);
- 2) Taxa de dados (*upload*): 50 Mbps
- 3) Modulação, codificação, taxa de símbolos e banda do sinal: conforme Tabela 9.2;
- 4) Potência da portadora transmitida pelo *gateway*: 1 W;
- 5) Ganho da antena do *gateway*: 0 dBi;
- 6) Temperatura de ruído do sistema de recepção embarcado: conforme Tabela 9.4;
- 7) Ganho da antena do sistema de recepção embarcado: 0 dBi;
- 8) E_b/N_0 requerida para cada modcod para operação QEF: conforme Tabela 9.3;
- 9) Distâncias *gateway*-satélite: conforme Tabela 9.5;
- 10) Total de perdas do canal de transmissão (exceto a Perda do Espaço Livre): 6 dB.

Observando-se as condições acima foram obtidos os valores da PEL (Perda do Espaço Livre) e da Margem da E_b/N_0 listados na Tabela 9.8 (Margem da $E_b/N_0 = (E_b/N_0)_{calculada} - (E_b/N_0)_{requerida}$).

Tabela 9.8: Margens da E_b/N_0 no enlace da gateway de subida em 28,5 GHz.

EL. MÍN.	MOD	BW (MHZ)	800 km		2.000 km		8.100 km	
			PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)
90°	QPSK	36,26	179,6	-64,8	187,6	-72,7	199,7	-84,9
	8PSK	24,21		-67,2		-75,2		-87,3
	16APSK	18,18		-68,2		-76,2		-88,3
	32APSK	14,56		-69,9		-77,9		-90,0
	64APSK	12,15		-71,4		-79,4		-91,5
20°	QPSK	36,26	186,5	-71,7	192,8	-78,0	202,4	-87,5
	8PSK	24,21		-74,1		-80,4		-90,0
	16APSK	18,18		-75,1		-81,5		-91,0
	32APSK	14,56		-76,8		-83,2		-92,7
	64APSK	12,15		-78,3		-84,7		-94,2
10°	QPSK	36,26	189,0	-74,2	194,5	-79,7	203,1	-88,2
	8PSK	24,21		-76,6		-82,1		-90,7
	16APSK	18,18		-77,6		-83,1		-91,7
	32APSK	14,56		-79,4		-84,8		-93,4
	64APSK	12,15		-80,8		-86,3		-94,9
5°	QPSK	36,26	190,4	-75,6	195,4	-80,5	203,5	-88,6
	8PSK	24,21		-78,0		-82,9		-91,0
	16APSK	18,18		-79,0		-84,0		-92,1
	32APSK	14,56		-80,8		-85,7		-93,8
	64APSK	12,15		-82,2		-87,2		-95,3

Na avaliação preliminar do enlace da *gateway* de descida serão consideradas as seguintes condições:

- 1) Frequência da portadora: 21,2 GHz (Ka);
- 2) Taxa de dados (*download*): 10 Mbps
- 3) Modulação, codificação, taxa de símbolos e banda do sinal: conforme Tabela 9.2;
- 4) Potência da portadora transmitida pelo satélite: 1 W;
- 5) Ganho da antena transmissora do satélite: 0 dBi;
- 6) Temperatura de ruído do sistema de recepção do *gateway*: conforme Tabela 9.4, dados do Terminal do Usuário;
- 7) Ganho da antena do sistema de recepção do *gateway*: 0 dBi;
- 8) E_b/N_0 requerida para cada modcod para operação QEF: conforme Tabela 9.3;
- 9) Distâncias *gateway*-satélite: conforme Tabela 9.5;
- 10) Total de perdas do canal de transmissão (exceto a Perda do Espaço Livre): 6 dB.

Observando-se as condições acima foram obtidos os valores da PEL (Perda do Espaço Livre) e da Margem da E_b/N_0 listados na Tabela 9.9 (Margem da $E_b/N_0 = (E_b/N_0)_{calculada} - (E_b/N_0)_{requerida}$).

Tabela 9.9: Margens da E_b/N_0 do enlace da gateway de descida em 21,2 GHz.

EL. MÍN.	MOD	BW (MHZ)	800 km		2.000 km		8.100 km	
			PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)	PEL (dB)	MARGEM E_b/N_0 (dB)
90°	QPSK	36,26	177,0	-56,9	185,0	-64,8	197,1	-77,0
	8PSK	24,21		-59,3		-67,3		-79,4
	16APSK	18,18		-60,3		-68,3		-80,4
	32APSK	14,56		-62,0		-70,0		-82,1
	64APSK	12,15		-63,5		-71,5		-83,6
20°	QPSK	36,26	183,9	-63,8	190,3	-70,1	199,8	-79,6
	8PSK	24,21		-66,2		-72,5		-82,1
	16APSK	18,18		-67,2		-73,6		-83,1
	32APSK	14,56		-68,9		-75,3		-84,8
	64APSK	12,15		-70,4		-76,8		-86,3
10°	QPSK	36,26	186,5	-66,3	191,9	-71,8	200,5	-80,4
	8PSK	24,21		-68,7		-74,2		-82,8
	16APSK	18,18		-69,7		-75,2		-83,8
	32APSK	14,56		-71,5		-76,9		-85,5
	64APSK	12,15		-72,9		-78,4		-87,0
5°	QPSK	36,26	187,9	-67,7	192,8	-72,6	200,9	-80,7
	8PSK	24,21		-70,1		-75,1		-83,2
	16APSK	18,18		-71,2		-76,1		-84,2
	32APSK	14,56		-72,9		-77,8		-85,9
	64APSK	12,15		-74,4		-79,3		-87,4

Nas seções sobre a carga útil e a estação *gateway*, serão considerados os ajustes dos parâmetros EIRP e G/T do *gateway* e do *transponder* embarcado necessários para tornar a Margem da E_b/N_0 positiva ou nula a partir dos resultados obtidos na presente seção.

9.5 Avaliação preliminar dos enlaces de TM&TC

Os enlaces de subida e descida da comunicação de serviço ou TM&TC requerem taxa de dados relativamente baixa (1 – 2 Mbps). De forma conservadora, pode ser considerada a taxa de dados de 5 Mbps e o uso da modulação de ordem baixa QPSK. Dessa forma, os dados da Tabela 9.2 para o modcod QPSK 5/6 podem ser utilizados na avaliação dos enlaces. Os valores típicos de temperatura de ruído do sistema para os equipamentos de solo e embarcados operando na banda S, tradicional para esta aplicação, são apresentados na Tabela 9.10.

Tabela 9.10: Temperaturas de ruído típicas para as antenas e LNAs de solo e embarcados.

Enlace	Frequências (MHz)	RX da est. Terrena		Rx do transponder	
		T _A (K)	T _{LNA} (K)	T _A (K)	T _{LNA} (K)
Descida	2.200 – 2.290	10	40	--	--
Subida	2.025 – 2.120	--	--	295	75

A Tabela 9.11 sumariza as condições para a avaliação dos enlaces de subida e descida na banda S.

Tabela 9.11: Condições para a avaliação dos enlaces de serviço na banda S.

Condição	Enlace subida	Enlace descida
Frequência da portadora	2.120 MHz	2.290 MHz
Taxa de dados	5 Mbps	5 Mbps
Modcod	QPSK 5/6	QPSK 5/6
Taxa de símbolos	3,02 Mbps	3,02 Mbps
Largura de banda do enlace	3,63 MHz	3,63 MHz
Potência da portadora	1 W	1 W
Ganho da antena transmissora	0 dBi	0 dBi
Ganho da antena receptora	0 dBi	0 dBi
Temperatura de ruído do sistema	370 K	50 K
E _b /N ₀ requerida	2,99 dB	2,99 dB
Distância estação TM&TC-satélite	Tabela 4.5	

A Tabela 9.12 apresenta a avaliação preliminar dos enlaces de subida e descida de serviço na banda S.

Tabela 9.12: Margens da E_b/N₀ dos enlaces de serviço na banda S.

Enlace	EL.	800 km		2.000 km		8.100 km	
	Mínima	PEL (dB)	Margem E _b /N ₀ (dB)	PEL (dB)	Margem E _b /N ₀ (dB)	PEL (dB)	Margem E _b /N ₀ (dB)
SUBIDA	90°	157,0	-30,9	165,0	-38,9	177,1	-51,0
	20°	163,9	-37,8	170,3	-44,2	179,8	-53,7
	10°	166,5	-40,3	171,9	-45,8	180,5	-54,4
	5°	167,9	-41,8	172,8	-46,7	180,9	-54,8
DESCIDA	90°	157,7	-22,9	165,7	-30,9	177,8	-43,0
	20°	164,6	-29,8	170,9	-36,1	180,5	-45,7
	10°	167,1	-32,3	172,6	-37,8	181,2	-46,4
	5°	168,5	-33,7	173,5	-38,6	181,6	-46,7

Nas seções sobre a plataforma espacial e a estação de monitoramento e controle serão considerados os ajustes dos parâmetros EIRP e G/T destes elementos necessários para tornar a Margem da E_b/N_0 positiva ou nula a partir dos resultados obtidos na presente seção.

9.6 Plano de frequências das comunicações

O plano de frequências com a distribuição dos canais dos enlaces de subida e descida dos usuários e das estações *gateways* é o delineado na Tabela 9.13 assumindo-se as menores larguras de banda para os canais dos usuários e taxas de dados de 10 Mbps e 50 Mbps para *upload* e *download*, respectivamente.

Tabela 9.13: Plano básico de frequências e larguras de banda dos usuários e gateway.

Segmento	Enlace	Portadora	Bw usuário	Bw total	Bw transponder
Usuário	Subida	Ku	2,5 MHz	-	12,5 MHz
	Descida		15 MHz	750 MHz	75 MHz
Gateway	Subida	Ka	-	1.500 MHz	75 MHz
	Descida		-	-	12,5 MHz

Os canais de subida e descida, dos usuários e dos gateways, também conterão as informações para sinalização e controle de acesso dos usuários ao sistema espacial.

10 Carga útil

Há várias alternativas a serem exploradas na definição da carga útil da Constelação BR.

A primeira questão é a escolha de cargas transparentes (*bent pipe*) ou cargas regenerativas que realizam maior processamento dos sinais recebidos pelo satélite. A concepção da missão com o uso de estações *gateway* para a comunicação satelital com “um salto” e a ausência de enlaces intersatélites indicam, no primeiro momento, como a melhor escolha o uso de cargas transparentes.

Outra questão é a escolha de antenas com múltiplos feixes ou de feixe único para os enlaces do usuário. Essa definição passa pela densidade dos usuários na região coberta pelo feixe total da antena, forma de acesso múltiplo dos usuários ao sistema, complexidade e custo dos equipamentos embarcados. Também faz parte dessa escolha a definição da técnica de *hand over* dos sinais dos usuários e da estação *gateway* entre os satélites que cobrem uma determinada área.

A análise preliminar de enlaces da seção 9 indica que será necessário o uso de antenas com múltiplos feixes e ganhos altos para se obter o “fechamento” dos enlaces.

Serão utilizadas a banda Ku, para os enlaces de subida e descida dos usuários e a banda Ka para os enlaces de subida e descida das estações *gateway*.

11 Plataforma espacial

A definição dos requisitos da plataforma espacial depende do avanço das definições da carga útil como, por exemplo, a potência DC requerida, precisão de apontamento, massa e dimensões da carga útil, bem como das órbitas escolhidas. Estes parâmetros estarão disponíveis apenas quando houver um projeto preliminar dos satélites da Constelação. Contudo, algumas alternativas podem ser sugeridas e discutidas, para as possibilidades de órbita selecionadas.

11.1 Órbita LEO

As constelações em órbita baixa, a 800 km e a 2000 km de altitude, deverão possuir 32 e 18 satélites, respectivamente. Essas quantidades encontram-se no limite entre as possibilidades de lançamento simples ou múltiplo, isto é, um ou vários satélites por lançador. Uma vez que a altitude de 2000 km exige um maior alcance do foguete, quando comparado com órbitas abaixo de 1000 km, deve-se esperar lançamentos simples para esta Constelação. No caso de lançamento múltiplo, a necessidade de compactar os satélites para cumprir as restrições de volume disponível na coifa irá dirigir a solução para um forte requisito de redução da massa dos satélites, obrigando, possivelmente, a ficar abaixo de 500 kg. Com tal massa é também provável que até 5 satélites possam ser colocados em órbita simultaneamente. Uma massa mais realista para esta versão deve situar-se entre 500 e 1200 kg. Ainda assim pode-se colocar em órbita com facilidade pelo menos 2 satélites a cada lançamento, sem necessidade de compactação.

Exceto pela carga útil, todos os demais subsistemas deste satélite devem ser convencionais, ou seja: suprimento de energia, responsável pela geração de potência por meio de painéis fotovoltaicos, baterias e conversores; sistema estrutural, que define a geometria e o leiaute dos equipamentos de bordo; sistema de telemetria e telecomando, responsável por coletar informações dos demais subsistemas para envio para solo, e recebimento, interpretação e execução dos comandos providos da estação de controle em terra; e o subsistema de controle de atitude, que mantém o apontamento do satélite e suas antenas na direção especificada. As exigências de apontamento dos satélites para cumprir missões de comunicação não são severas; em geral o direcionamento de antenas tolera erros no apontamento da ordem de 1 grau, mesmo nas antenas de alto ganho. Por outro lado, conseguem-se facilmente apontamentos de atitude inferiores a 0,1 grau com equipamentos de controle comuns e utilizados rotineiramente, como rodas de reação, sensores de estrela, bobinas magnéticas de torque e giroscópios, além de um receptor de sinais de posicionamento GPS para determinação de órbita. O dimensionamento das rodas de reação e, em menor escala, também as bobinas de torque dependem da massa e da inércia do satélite, e deve ser algo entre 3 e 5 kg cada roda, com um total de 18 a 30 kg para o subsistema todo. Deve-se mencionar que os satélites deverão contar com sistema de propulsão, para ajuste da fase entre eles na órbita e, eventualmente, também para manobrar o satélite para reentrada na atmosfera ao término da vida útil. A massa do sistema de suprimento de energia é fortemente influenciada pela exigência de potência do transponder de carga-útil. Painéis articulados, extensíveis e giratórios provavelmente serão necessários, o que aumenta a massa, os custos, e reduz a confiabilidade pelo uso de mecanismos que podem apresentar falhas em

órbita. Sugere-se que o subsistema de telemetria e comando utilize transmissores na banda S tanto para transmissão de telemetria quanto para recepção de comandos.

Infelizmente, a falta de definição de boa parte do satélite impede que se possa ter uma boa estimativa dos custos. Estima-se, porém, que para os satélites a serem utilizados na órbita de LEO de 800 km tenha um custo individual aproximado de 20 milhões de dólares, totalizando um custo parcial da constelação para essa altitude de 640 milhões de dólares. Considerando que até cinco satélites podem ser colocados em órbita por lançamento a um custo individual (de lançamento) de 50 milhões de dólares, o custo de lançamento para essa constelação chega a 350 milhões de dólares. Assim, para a produção e lançamento de 32 satélites a serem colocados em órbita LEO com 800 km de altitude estima-se um custo total de 990 milhões de dólares.

Para a opção de utilizar uma órbita LEO de 2000 km de altitude, o custo individual estimado dos 18 satélites planejados para essa opção é de 30 milhões de dólares, totalizando um custo de produção dos satélites de 540 milhões de dólares. Levando em conta que cada lançamento seja capaz de colocar cinco desses satélites em órbita a um custo de 60 milhões de dólares, o custo de lançamento esperado é de 240 milhões. Portanto, o custo total estimado para fabricação e lançamento de 18 satélites a uma órbita de 2000 km seria de 780 milhões de dólares.

Essas estimativas foram baseadas no custo de satélites similares em massa ou em finalidade, como o Amazônia e o Starlink, contando, é claro, com a redução do custo devido à escala de produção. Os custos de manutenção, operação em solo e roteamento dos sinais são praticamente impossíveis de serem estimados no atual estágio de definição.

11.2 Órbita MEO

Caso a opção selecionada seja a constelação na órbita MEO (8.100 km), haverá um aumento no custo e na massa dos satélites. Os satélites O3b mPower, com massa de 1700 kg, poderão ser tomados em exemplo, mas suas características são distintas daquelas necessárias à constelação proposta aqui. Os requisitos relaxados adotados nesta solução apontam na direção de uma massa entre 1200 e 1500 kg, exigindo, portanto, lançamento individual ou duplo, a depender do lançador escolhido. Embora seja bastante difícil estabelecer um custo para esta versão, é provável que se consiga produzir os seis satélites a um custo individual de 60 milhões de dólares cada, sem incluir serviços de inserção em órbita. Esta versão possui os mesmos subsistemas das constelações a 800 km ou 2000 km de altitude, apenas majorados em massa, dimensões e custo, em virtude da necessidade de um aumento significativo na potência do transmissor. O custo de produção dos seis satélites chegaria a 360 milhões de dólares. Para a inserção desses satélites em órbita, seriam necessários três lançamentos com dois satélites por vez, que, a um custo por lançamento de 80 milhões de dólares, implica em um custo total de lançamento de 240 milhões de dólares. Finalmente, o custo total estimado de fabricação e lançamento desses seis satélites a serem colocados em órbita seria de 600 milhões de dólares.

11.3 Órbita GSO:

Como já mencionado, satélites geoestacionários são amplamente utilizados em comunicação, tal como o SGDC. A altitude geoestacionária de 36.000 km possui igualmente vantagens para sistemas de comunicação, particularmente naquilo que se refere ao custo dos terminais, uma vez que as antenas são fixas e de baixo custo. Embora seja possível utilizar antenas móveis para comunicação com satélites GEO, o seu custo sobe significativamente. O maior obstáculo desta solução é a necessidade de alta potência, tanto dos transmissores do satélite, quanto daqueles baseados em solo. O número e usuários que podem ser atendidos simultaneamente é também limitado, pelo fato de que o satélite pode cobrir todo o território nacional, com possibilidade de haver centenas de milhares de clientes interessados no serviço. Esta limitação praticamente torna a órbita GEO inviável para atendimento de internet em áreas remotas.

Em termos dos custos associados, a fabricação de um único satélite seria de 150 milhões de dólares. Devido às dimensões superiores, o custo para lançar esse satélite seria de 100 milhões de dólares. Essas estimativas totalizariam o custo em 250 milhões de dólares, o que pode parecer consideravelmente mais barato do que as outras opções de órbitas já apresentadas, porém deve-se levar em conta o limite em número de usuários atendidos, além de não contemplar adequadamente a dificuldade do fornecimento de internet em áreas remotas.

Estão sintetizados na Tabela 11.1 os valores estimados para os custos dos satélites e seus respectivos lançamentos nas órbitas apresentadas. Não foram considerados custos de projeto, dos terminais e custos de controle e operação da constelação, apenas de manufatura.

Tabela 11.1 Custos das constelações para serviço de internet apresentadas neste relatório.

Parâmetro	LEO 800	LEO 2.000	MEO	GSO
Vida útil (anos)	5	5	5	10
Número total de satélites	32	18	6	1
Custo do satélite (milhões de dólares)	20	30	60	150
<i>Custo da constelação (milhões de dólares)</i>	640	540	360	150
Custo de cada lançamento (milhões de dólares)	50	60	80	100
Número de satélites por lançamento	5 [†]	5 [†]	2	1
Número de lançamentos necessários	7	4	3	1
<i>Custo total de lançamento (milhões de dólares)</i>	350	240	300	150
Custo total da constelação (milhões de dólares)	990	780	600	250

[†]A depender do grau de compactação obtido na plataforma.

12 Terminais do usuário

Os terminais do usuário terão acesso direto ao segmento espacial da Constelação BR. Haverá pelo menos dois tipos de terminal: um visando operação portátil, transportado por uma pessoa e para operação na Região 1, e outro também portátil, para ser instalado em locais fixos, provavelmente com dimensões maiores e antenas de maior ganho e potência, para operação principalmente na Região 2.

Como visto na Seção 4, os terminais poderão operar na banda Ku ou Ka, na qual se espera possa ser utilizada a banda total de até 3 GHz correspondente à largura de banda de 40 *transponders* passíveis de serem transmitidos simultaneamente pela estação *gateway*.

Assumindo-se que os enlaces de descida do usuário usarão a banda total de 750 MHz (suposta compatível com o uso de portadoras na banda Ku) a distribuição do sinal com 3 GHz de largura de banda deve utilizar a multiplexação de frequências (sub-bandas da banda total de 750 MHz) e multiplexação espacial (uso de diversos feixes na antena de transmissão embarcada).

A banda instantânea de 750 MHz acima acomoda de 50 a 60 usuários com terminais com largura de banda de 12 – 15 MHz (velocidade de acesso de 50 Mbps).

A análise preliminar dos enlaces do usuário da seção 9.3 para as bandas Ku e Ka indicam uma questão potencial a ser resolvida que é o emprego de antenas de alto ganho nos terminais de usuários. Antenas diretivas requerem o rastreamento dos satélites para a manutenção da comunicação o que torna os terminais mais complexos e mais caros.

13 Segmento solo

O segmento solo da Constelação BR consistirá nas estações *gateway*, nas estações de monitoramento e controle e no centro de operações da missão, conectado às estações por meio da rede de comunicações terrestre.

13.1 Estações *gateway*

Conforme o conceito de missão da Constelação BR visto na seção 7.2.4, as estações *gateway* fazem a interface entre os satélites e o provedor do acesso à internet no solo.

Para realizar a sua função é necessário que a *gateway* e os usuários atendidos estejam no *footprint* do mesmo satélite devido à ausência de enlaces intersatélites. Como o *ground track* da Constelação é a linha do equador, os *gateways* devem estar localizados próximas a esta linha e próximas a um centro urbano para facilitar o acesso à rede de comunicações terrestre. Locais naturalmente candidatos para abrigar um *gateway* são, portanto, as cidades de Manaus, Belém, São Luís, Teresina e Fortaleza. A cidade de Alcântara, no Maranhão, apesar de pequena também apresenta as condições para localização de um *gateway* devido à existência da infraestrutura de comunicações terrestres para suporte à estação terrena do INPE.

As localidades dos extremos leste e oeste brasileiros são, respectivamente, Ponta do Seixas, na Paraíba, e Nascente do Rio Moa, no Acre. As coordenadas geográficas dessas localidades são, respectivamente, (7° 09' 18'' S, 34° 47' 34'' O) e (7° 32' 09'' S, 73° 59' 26'' O). A diferença entre as duas longitudes é 39° 11' 52'' o que equivale à distância aproximada de 4.363 km.

Inspecionando-se a Tabela 9.1 e a Figura 9.2 constata-se que, dependendo da subconstelação (800 km, 2.000 km ou 8.100 km) e do ângulo de elevação mínimo requerido, podem ser necessários dois ou três *footprints* para a cobertura da extensão Leste-Oeste do Brasil. No caso de três *footprints*, seriam necessárias pelo menos duas estações *gateways* localizadas adequadamente para garantir a comunicação de todos os usuários localizados na região de cobertura com pelo menos um *gateway*.

A cidade de Manaus se impõe com uma localização obrigatória de uma estação *gateway* para garantir a comunicação com os usuários localizados na parte oeste da região Amazônica, próximos da fronteira com o Peru, Colômbia e Venezuela, no caso de uma subconstelação LEO (800 km ou 2.000 km). Como consequência, a segunda *gateway* poderia estar localizada em Belém ou São Luís/Alcântara. Essa definição depende de um estudo mais detalhado das regiões de cobertura do satélite considerando as localizações geográficas das localidades.

As estações *gateway* devem possuir duas antenas capazes de rastrear a passagem dos satélites garantindo, desta forma, a qualidade do enlace de radiofrequência com os equipamentos embarcados. Uma antena rastreia o satélite que está se afastando (i.e., aumentando a distância satélite-*gateway*) e perdendo cobertura, e a outra antena rastreia o satélite que está se aproximando (i.e., diminuindo a distância satélite-*gateway*) e aumentando a cobertura.

O par de equipamentos receptor/transmissor conectado a cada uma das duas antenas permite a comunicação simultânea com o satélite que está se afastando do *gateway* e com o que está se aproximando dela de forma a permitir a comutação das regiões de cobertura dos satélites individuais no momento apropriado.

A estação *gateway* deve receber a soma dos sinais de RF de cada *transponder* com largura de banda assumida de 75 MHz. Assumindo-se a possibilidade do uso de 1,5 GHz de largura de banda na banda Ka, verifica-se que o enlace de descida do *gateway* comporta 20 *transponders*. A capacidade de download de dados pode ser aumentada se forem usadas duas polarizações ortogonais, cada uma transmitindo os sinais de 20 *transponders*. Como cada *transponder* comporta os sinais de 5 ou 6 terminais de usuários (com velocidade de acesso de 50 Mbps) a capacidade instantânea é de 200 – 240 terminais.

No sentido inverso, do solo para o espaço, são transmitidos os sinais de 40 *transponders*, 20 em cada polarização ortogonal.

Os enlaces de subida e descida do *gateway* também incluem canais de banda estreita (~1 MHz) para sinalizações e controle do acesso dos terminais de usuário ao sistema. Essas funções deverão ser executadas por equipamentos de processamento sediados no *gateway* e cuja configuração é controlada pelo centro de operações da missão.

Os *gateways* também utilizam a rede terrestre de comunicações para enviar informações de seu desempenho e configuração para o centro de operações da missão e para receber dele comandos para, por exemplo, mudança da sua configuração.

13.2 Estação de monitoramento e controle

A estação de monitoramento e controle (também chamadas de TT&C – *Telemetry, Tracking and Command*) é responsável por rastrear cada satélite da Constelação, receber suas telemetrias e enviar comandos. Desta forma a saúde e a configuração dos satélites podem ser monitoradas e controladas.

Como o monitoramento e controle não precisam ser contínuos basta, em princípio, apenas uma estação deste tipo com localização geográfica dentro da região de cobertura dos satélites. Eventualmente poderá ser instalada uma segunda estação para redundância e maior confiabilidade das operações.

Como visto na seção 9.5, o enlace de comunicação entre o segmento espacial e a estação de monitoramento e controle ocorre na banda S. As informações de telemetria recebidas do segmento são enviadas para o centro de operações da missão por meio da rede terrestre de comunicações. Esta rede também viabiliza o envio de telecomandos do centro para a estação de monitoramento e controle de onde eles são transmitidos para o segmento espacial.

As estações em pauta devem permitir enlaces de comunicação de alta qualidade para garantir a comunicação com os satélites mesmo no caso de condições adversas como, por exemplo, apontamento inadequado da antena embarcada, queda de potência ou de sensibilidade dos

equipamentos embarcados. Por este motivo, a antena da estação de monitoramento e controle é de grandes dimensões resultando em alto ganho o que melhora a EIRP e a sensibilidade.

Como o funcionamento destas estações é razoavelmente padronizado e o seu custo de implantação é alto elas não precisam ser um ativo da Constelação BR e suas funções podem ser contratadas como um serviço de terceiros (*Ground Station As A Service*). O INPE, por exemplo, possui estações TT&C em Cuiabá (latitude 15° 35' 45'' Sul), dentro da região de cobertura da Constelação BR.

13.3 Centro de operações da missão

O centro de operações da missão abriga o pessoal, os equipamentos (essencialmente computadores e suas interfaces homem-máquina e de comunicação) e os *softwares* necessários para monitorar e controlar o segmento espacial, as estações *gateways* e as suas interfaces com os terminais dos usuários e com a rede de comunicações terrestre.

O controle e monitoramento do segmento espacial utilizam as estações de monitoramento e controle como forma de acesso aos satélites.

14 Operações da missão

A equipe de pessoas das operações de missão da Constelação BR é responsável pela operação das estações de monitoramento e controle dos satélites e das estações *gateway*.

Essa equipe pode estar concentrada em uma localidade geográfica ou distribuída pelo território nacional a depender do número e localização das estações de controle e *gateways* que vierem a ser definidas pela arquitetura da missão e do grau de automatismo dessas estações.

O centro de operação da missão não precisa estar geograficamente próximo das estações físicas que abrigam as antenas e os equipamentos de radiofrequência para acesso aos satélites.

É importante notar que o Brasil já tem longa experiência nesta área, resultado da atuação do “Centro de Rastreo e Controle de Satélites” do INPE [118] em várias missões espaciais como, por exemplo, o SCD-1 e os vários satélites do programa CBERS – *China-Brazil Earth Resources Satellites*.

15 Segmento do lançador

A missão Constelação BR deverá utilizar lançadores disponíveis no mercado internacional, pela inexistência de lançador nacional com capacidade de injetar em órbita satélites de médio e grande porte.

Para identificar os lançadores específicos mais adequados para a missão é necessário, minimamente, avançar a definição das órbitas que serão utilizadas, a quantidade total de satélites e por plano orbital, as dimensões físicas e a massa dos satélites,

Admitindo, como realçado anteriormente, que a massa de cada satélite fique entre 500 e 1500 kg, tanto o Ariane francês quanto o indiano GLVS seriam fortes candidatos, em virtude da baixa latitude de suas bases de lançamento, ambos podem ser utilizados em lançamentos individuais, duplos, ou ainda múltiplos, caso se opte por satélites compactos em órbita LEO. No caso do Ariane, em sua versão 6 ele pode colocar em órbita LEO até 20 toneladas [119], o que poderia viabilizar a colocação em órbita da constelação toda em um único lançamento, caso se adote uma geometria que permita o empilhamento dos satélites na coifa. O custo estimado do Ariane é de 120 milhões de dólares. Por sua vez, o GLVS consegue entregar em órbita LEO até 2500 kg, a um custo de 47 milhões de dólares [120].

16 Domínio das tecnologias necessárias

A solução apresentada neste relatório para um sistema de oferta de internet por satélites em órbita baixa não introduz e não requer tecnologias tidas como estado da arte, ou ainda em desenvolvimento. Na verdade, diversos satélites com características similares já foram postos em órbita e cumprem sua missão com o desempenho esperado. Contudo existem alguns desafios que requerem uma maior atenção, por serem tecnologias recentes e ainda não totalmente dominadas no país. As próximas seções irão cobrir alguns destes desafios.

16.1 Plataforma orbital

O país detém o conhecimento necessário para especificar e projetar a plataforma como um todo, porém restrito apenas ao INPE, com experiência no projeto do satélite Amazônia, e a empresa Visiona, que especificou e acompanhou o projeto do SGDC (Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas). Outras empresas e instituições especificaram e projetaram apenas nano satélites, e não podem ser consideradas como candidatas a um projeto deste porte. Não se deve esperar que a iniciativa para uma constelação de satélites de internet em órbita baixa parta de uma destas empresas, ou, mais improvável ainda, que alguma empresa nacional venha a investir seus próprios recursos em uma constelação similar a esta que está sendo proposta neste relatório. Cabe, portanto, ao poder público analisar a viabilidade e o retorno social advindo da execução deste projeto antes de torná-lo realidade.

Caso uma empresa nacional assuma a responsabilidade pela execução do projeto (com verbas públicas, obviamente), haveria duas alternativas para o desenvolvimento da plataforma: pode-se encomendar toda ela em empresas do exterior com reconhecida experiência (Hughes, Boeing, Astrium, Thales Alenia etc.), ou atuar como *prime contractor*, encomendando os subsistemas em empresas nacionais (quando habilitadas para isso) ou no exterior. Nesta segunda hipótese, existem empresas no Brasil que poderiam assumir o projeto de alguns subsistemas, incluindo a carga útil. Entre estes subsistemas que poderiam ser nacionalizados, citam-se o suprimento de energia, o de telemetria e comando e o sistema estrutural junto com o controle térmico. No presente momento o nível de TRL atingido pelo sistema de controle de atitude e o de propulsão no país não permite afirmar que ambos poderiam ser nacionalizados. Certamente, há empresas com domínio tecnológico para projetar o sistema de controle de atitude, mas todos os sensores, atuadores e, eventualmente, também o computador, teriam que ser encomendados no exterior. O software de controle, parte crítica do projeto, sem dúvida pode ser realizado domesticamente. Quanto ao propulsor, existem poucas informações e evidências de que poderia ser produzido aqui. Sabe-se que o INPE, no passado, investiu e chegou a construir protótipos de propulsores iônicos, mas não se atingiu um nível de maturidade tecnológica suficiente para embarcar em satélites.

16.2 Sistema ISL

No presente estágio de definição da constelação, ainda não se dispõe de informações que permitam identificar a necessidade de um sistema de comunicação intersatélite (*Inter-Satellite Link*, ou ISL). Certamente a utilização de elos de comunicação entre os satélites permitiria

aumentar a velocidade de comunicação entre usuários sem necessidade de recorrer a retransmissores (*gateways*) em solo. Além disso, o sistema ISL seria de fácil implantação em uma constelação formada por apenas um plano orbital, como na constelação proposta aqui. Tanto um sistema de transmissão por radiofrequência quanto por laser seria igualmente útil, mas sem dúvida o sistema a laser seria mais vantajoso por permitir alta velocidade de comunicação. Desconhece-se se o Brasil possui grupos de pesquisa ou empresas que estejam desenvolvendo comunicação por laser, mas parece improvável. Pelo menos duas empresas no exterior fornecem comunicadoras a laser para satélites, conforme relatado no Produto 1, aparentemente sem restrições à importação.

16.3 Antenas *Phased Array*

Entre as tecnologias emergentes utilizadas nas constelações existentes, as antenas que utilizam *phased array* certamente estão entre as mais desafiadoras. Embora este tipo de antena esteja em uso prático desde a década de 1940, quando foi utilizada para auxílio de navegação em radares de solo [116], a tecnologia para permitir alta densidade de componentes para ajuste das fases, devido às altas frequências do sinal da portadora, só foi atingida em anos recentes. Assim como a tecnologia ISL, não se dispõe de informações que permitam assegurar que exista o domínio na concepção, projeto e construção deste tipo de antena no Brasil, exceto por alguns pesquisadores na Universidade Federal de Santa Maria (RS) [117]. Deve-se ressaltar que as matrizes de antenas com regulagem dinâmica de fase podem ser utilizadas tanto no satélite quanto no terminal do usuário em solo e nas estações de roteamento (*gateways*), de onde se infere que o domínio desta tecnologia pelo país é imperativo. Diversas empresas no exterior produzem antenas *phased array*, mas poucas delas estão capacitadas a oferecer antenas para satélites. Entre estas últimas estão a Intellian [121] e a Mi-Wave [122].

16.4 Transponder embarcado

Devido à concepção da missão Constelação BR que não requer o uso de enlaces intersatélites, a solução mais adequada para a realização do *transponder* da carga útil é do tipo transparente ou *bent pipe*.

Nesse tipo de transponder, o espectro dos sinais oriundos do solo por meio dos enlaces de subida dos usuários é transladado em frequência, os sinais convertidos são amplificados e transmitidos para a estação *gateway* em terra. O caminho inverso, para enviar para os usuários os sinais recebidos da estação *gateway*, utiliza o mesmo processamento. As empresas espaciais nacionais da área de equipamentos de micro-ondas possuem o domínio tecnológico necessário para o desenvolvimento e fabricação desse tipo de equipamento, mesmo com o uso das frequências mais altas das bandas Ku e Ka consideradas na concepção da missão Constelação BR.

16.5 Transponder da estação *gateway*

O *transponder* da estação *gateway* é bastante similar ao *transponder* embarcado, mas possui blocos adicionais de demodulação e modulação das portadoras de radiofrequência. Os sinais demodulados digitais são encaminhados para a rede terrestre de comunicações. No sentido inverso, os sinais provenientes desta rede são utilizados na modulação de uma portadora de radiofrequência e transmitidos para os satélites.

De forma análoga aos transponders embarcados, as empresas nacionais dominam as tecnologias necessárias para o desenvolvimento e fabricação desses equipamentos.

17 Considerações finais

As constelações com grande número de satélites em órbitas baixas ou médias apresentam grandes desafios em vários aspectos, como aqueles relacionados à regulamentação, a compatibilidade com outros sistemas de comunicações satelitais e terrestres existentes, o acesso e o custo de novas tecnologias, o gerenciamento operacional, e o financeiro, dentre outros. As Seções anteriores indicaram, por meio das referências, o grande esforço regulatório para a implantação de um sistema dessa magnitude, com profundo impacto no tempo de aprovação desses sistemas por parte dos órgãos responsáveis no país. Comumente 3 anos ou mais são necessários até que se tenha uma decisão favorável ao empreendimento pelos órgãos regulatórios. Parte desse esforço tem que ser repetido em cada país em que a constelação irá operar.

Os satélites da constelação têm o desafio tecnológico de atenderem o alto desempenho requerido além de baixo custo e configuração adequada que permita o lançamento de grandes grupos em um mesmo lançamento. Isso é necessário não só pela disponibilidade limitada da quantidade global de lançamentos, mas também pela necessidade de se colocar em órbita grande quantidade de satélites em período de tempo relativamente reduzido. A fabricação dos satélites em quantidade e velocidade muito maiores que as demandas do setor espacial até o momento também são um grande desafio. Diversas constelações construíram suas próprias fábricas de satélite para resolver essa questão, como, por exemplo, a Starlink, Kuiper e OneWeb.

O custo total de implantação do projeto, entre 250 e 990 milhões de dólares, é um grande desafio empresarial e praticamente todas as constelações apresentadas neste documento, com exceção da Starlink, enfrentaram, em um momento ou outro, limitação no capital disponível para o desenvolvimento do projeto. Os altos valores envolvidos limitam bastante o número de investidores globais que podem participar desse tipo projeto e, em alguns casos, os governos de países acabam fazendo parte daqueles projetos considerados estratégicos (O3b, OneWeb, Telesat, Spacesail, SatNet, por exemplo). Alguns componentes tecnológicos necessários às constelações e produzidos por poucos fornecedores globais também representam um obstáculo para o projeto e implantação dessas enormes constelações.

A disponibilidade de lançadores para o lançamento em escala dos satélites é limitada e talvez até represente um dos gargalos para os projetos atualmente em curso, sem mencionar os custos e desafios operacionais envolvidos. A Starlink é uma exceção porque possui seus próprios lançadores e está desenvolvendo um lançador (Starship) com grande capacidade de lançamento.

Em resumo, a Starlink é a única constelação efetivamente operacional que enfrentou e conseguiu superar todos os obstáculos necessários para estabelecer um sistema de internet em órbita baixa, com pequena latência e capacidade de transmissão e custo similares à das redes de fibra óptica. As demais constelações operacionais apresentam limitação de cobertura para clientes globais ou atendem ao usuário corporativo ou institucional. Os aspectos do projeto e implantação dessas constelações sumarizados nesta seção explicam, em grande parte, a situação atual.

Em vista das soluções para fornecimento de internet por satélite analisadas, foram apresentadas neste documento a definição e a concepção iniciais de uma missão espacial nacional (Constelação BR) cujo objetivo primário é fornecer serviço de acesso rápido à internet para os habitantes da região Norte e da parte norte das regiões Nordeste e Centro-Oeste; e como objetivo secundário a oferta desse serviço em condições de operação levemente degradadas para todo o território nacional.

Foram definidas arquiteturas de missão alternativas para a implantação da Constelação BR incluindo três arranjos orbitais e duas faixas de frequências para a carga útil. A avaliação preliminar dos enlaces de comunicação indicou que o principal desafio da concepção apresentada é a identificação no mercado internacional de antenas embarcadas com múltiplos feixes para as bandas Ku e Ka e de antenas portáteis de solo com alto ganho e capacidade de rastreamento satelital automático para aplicação nos terminais dos usuários.

As alternativas para a arquitetura de missão precisam ser agora aprofundadas por meio de estudos de detalhamento dos seus grandes blocos componentes e da pesquisa de disponibilidade no mercado internacional dos itens tecnológicos chave de forma a eleger a melhor solução para a missão observando-se os objetivos e restrições estabelecidos inicialmente.

O primeiro ponto fundamental das ações de aprofundamento é a definição exata das sub-bandas de frequência das bandas Ku e Ka que podem ser efetivamente utilizadas pela Constelação BR por meio de consultas formais à ANATEL. O plano de frequências detalhado por meio dessas consultas afeta toda a concepção da carga útil e das estações *gateway* bem como a quantidade de usuários do sistema de comunicações em elaboração.

18 Referências

- 1 Labrador, V. Development of satellite communication. In: Britannica. Acesso em 2025. <https://www.britannica.com/technology/satellite-communication/Development-of-satellite-communication>.
- 2 Richter, F. Streaming Hits 40% of U.S. TV Usage for the First Time. In Statista. Acesso em 2025. <https://www.statista.com/chart/25381/tv-consumption-in-the-us-by-channel/>
- 3 Kulu, E. Satellite Constellations - 2024 Survey, Trends and Economic Sustainability. 75th International Astronautical Congress (IAC 2024), Milan, Italy, 14-18 October 2024. IAC-24.E6.1.13. https://www.newspace.im/assets/Constellations-2024_ErikKulu_IAC2024.pdf
- 4 Cho, M.; Graziani, F. Lean satellite Concept. SSC16-P2=09. https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?params=/context/smallsat/article/3509/&path_info=SSC16_P2_09.pdf. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7208447>
- 5 Wikipedia. Iridium satellite constellation. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Iridium_satellite_constellation
- 6 Wikipedia. Global Positioning System. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- 7 Wikipedia. Molniya orbit. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Molniya_orbit
- 8 Wikipedia. Tracking and Data Relay Satellite System. Acesso em 2025 https://en.wikipedia.org/wiki/Tracking_and_Data_Relay_Satellite_System
- 9 Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС (Centro de Consumidores de Aplicativos GLONASS - Centro de informação e análise para apoio à navegação e tempo de coordenadas). Acesso em 2025 <https://glonass-iac.ru/en/map/>
- 10 Iridium Communications Inc. Iridium. Acesso em 2025. <https://www.iridium.com/network/>
- 11 Wikipedia. O3b mPower – Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/O3b_mPOWER
- 12 SES. Discover our global coverage. Acesso em 2025. <https://www.ses.com/our-coverage/#/explore/search?type=satellite&q=constellation-1>
- 13 Wikipedia. Phased Array Antennas. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Phased_array
- 14 RFMicrotech. Antennas and Phased Array. Acesso em 2025. <https://rfmicrotech.com/products-smart-solutions/antennas-and-phased-arrays/>
- 15 Eutelsat OneWeb. Experience Eutelsat OneWeb. Acesso em 2025. <https://oneweb.net/>
- 16 Wikipedia. Eutelsat OneWeb. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Eutelsat_OneWeb#OneWeb_satellite_constellation
- 17 Wikipedia. Starlink. Acesso em 2025. <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>
- 18 eoPortal. Starlink Satellite Constellation. Acesso em 2025 <https://www.eoportal.org/satellite-missions/starlink#eop-quick-facts-section>
- 19 N2YO.com. Globalstar Satellites. Acesso em 2025 <https://www.n2yo.com/satellites/?c=17&p=0>
- 20 Wikipedia. Globalstar. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Globalstar#SPOT_LL_C
- 21 Wikipedia. Lynk Global. https://en.wikipedia.org/wiki/Lynk_Global
- 22 Wikipedia. Orbcomm. <https://en.wikipedia.org/wiki/Orbcomm#Satellites>

- 23 Wikipedia. Galileo (satellite navigation). Acesso em 2025. [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(satellite_navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation))
- 24 ESA. Galileo Initial Services. Acesso em 2025. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2016/12/Galileo_Initial_Services
- 25 Wikipedia. BeiDou. Acesso em 2025. <https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou>
- 26 Wikipedia. EchoStar. Acesso em 2025. <https://en.wikipedia.org/wiki/EchoStar>
- 27 Wikipedia. Hughes Network Systems. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Hughes_Network_Systems
- 28 Our World in Data. Annual number of objects launched into space. Acesso em 2025. <https://ourworldindata.org/grapher/yearly-number-of-objects-launched-into-outer-space?time=2000..2024#explore-the-data>
- 29 Wikipedia. Orbcomm (satellite). Acesso em 2025. [https://en.wikipedia.org/wiki/Orbcomm_\(satellite\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orbcomm_(satellite))
- 30 Wikipedia. Inmarsat. Acesso em 2025. <https://en.wikipedia.org/wiki/Inmarsat>
- 31 Wikipedia. SES (company). Acesso em 2025. [https://en.wikipedia.org/wiki/SES_\(company\)](https://en.wikipedia.org/wiki/SES_(company))
- 32 Wikipedia. Intelsat. Acesso em 2025. <https://en.wikipedia.org/wiki/Intelsat>
- 33 Intelsat. Coverage Maps. Acesso em 2025. <https://www.intelsat.com/fleetmaps/>
- 34 Clarus Network Group. Starlink Overview. Acesso em 2025 <https://www.clarus-networks.com/technology/>
- 35 Wikipedia. Telesat. Acesso em 2025. <https://en.wikipedia.org/wiki/Telesat>
- 36 Telesat. LEO Network. Acesso em 2025. <https://www.telesat.com/leo-satellites/>
- 37 Wall, M. China launches 1st batch of satellites for planned 14,000-strong megaconstellation (video). In Space.com. <https://www.space.com/china-first-launch-internet-satellite-megaconstellation>
- 38 Wikipedia. Project Kuiper. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Project_Kuiper
- 39 Chaudhry, A. U.; Yanikomeroglu, H. Laser Inter-Satellite Links in a Starlink Constellation. IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol 16, N. 2, pp. 48-56, June 2021. DOI: 10.1109/MVT.2021.3063706.
- 40 Mynaric. Condor MK3. Acesso em 2025. <https://mynaric.com/products/space/condor-mk3/>
- 41 Wikipedia. Laser Communication in Space. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_communication_in_space
- 42 Tesat. SCOT80. Acesso em 2025. <https://www.tesat.de/products>
- 43 Kaushal, H.; Jain, V.K.; Kar, S. Free Space Optical Communication (Optical Networks). Springer, 1st ed., 2017. ISBN-10-8132236890.
- 44 Starlink. Satellite technology. <https://www.starlink.com/technology>
- 45 Youtube. Trubey, P. “Starlink Technology. https://www.youtube.com/watch?v=b_uYOE_gMTQ
- 46 Satellitemap.space. Starlink. Acesso em 2025. <https://satellitemap.space/?constellation=starlink>
- 47 Starlink. Availability Map. Acesso em 2025. <https://www.starlink.com/map>
- 48 Starlink. Starlink direct to cell. Acesso em 2025. <https://www.starlink.com/business/direct-to-cell>

- 49 Krebs, G. Gunter's diverse Homepages. Acesso em 2025. https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v2-mini.htm
- 50 Eric, R. SpaceX CEO Elon Musk reveals next-generation Starlink satellite details. In Teslarati. Acesso em 2025 <https://www.teslarati.com/spacex-elon-musk-next-gen-starlink-satellite-details/>
- 51 Shiller, D. IR Lasers Link 9,000 Starlink Satellites And Move 42 Million GB Per Day. In Light Now. Acesso em 2025. <https://www.lightnowblog.com/2024/02/ir-lasers-link-9000-starlink-satellites-and-move-42-million-gb-per-day/>
- 52 Posh, M. Starlink's Inter-Satellite Laser Links Are Setting New Record With 42 Million GB Per Day. In Hackaday.com. Acesso em 2025. <https://hackaday.com/2024/02/05/starlinks-inter-satellite-laser-links-are-setting-new-record-with-42-million-gb-per-day/>
- 53 Reddit. Any guess about the bandwidth of each Starlink V2.0 mini satellite? Acesso em 2025. https://www.reddit.com/r/SpaceXLounge/comments/11c66ut/any_guess_about_the_bandwidth_of_each_starlink/
- 54 Starlink. Roam with Starlink. Acesso em 2025. <https://www.starlink.com/roam>
- 55 NSSDCA. Starlink 1010. NASA SPACE SCIENCE DATA COORDINATED ARCHIVE. Acessado em 16/09/2023. Disponível em: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=2019-074D>
- 56 Pultarova, T. Starlink satellites: Facts, tracking and impacts on astronomy. Last updated June 04, 2025. Disponível em: <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>. Acessado em 07/06/2025.
- 57 Handmer, C. J. Casey Handmer's Blog: Starlink is a very big deal. November 2, 2019. Acessado em 02/03/2025. Disponível em: <https://caseyhandmer.wordpress.com/2019/11/02/starlink-is-a-very-big-deal/>
- 58 Federal Communications Commission - FCC 18-38 – Memorandum Opinion, Order and Authorization. March 29, 2018. Acessado em 07/06/25. Disponível em <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-18-38A1.pdf>
- 59 Space Exploration Holdings. SpaceX Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. November 15, 2016. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20161115-00118/1158350> . Acessado em 07/06/2025.
- 60 Wall, M. SpaceX's Prototype internet Satellites Are Up and Running. February 22, 2018. Acessado em: 07/06/2025. Disponível em: <https://www.space.com/39785-spacex-internet-satellites-starlink-constellation.html>
- 61 Space Exploration Holdings. SpaceX Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. November 18, 2018. Acessado em 07/06/2025. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083/1569860>
- 62 Federal Communications Commission - FCC 21-48 – Order and Authorization and Order on Reconsideration. April 27, 2021. Acessado em 07/06/25. Disponível em: https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-21-48A1_Rcd.pdf

- 63 Space Exploration Holdings. SpaceX Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. April 17, 2020. Acessado em 07/06/2025. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20200417-00037>
- 64 Space Exploration Holdings. SpaceX Gen2 Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. May 26, 2020. Acessado em 07/06/2025. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20200526-00055/2378671.pdf>
- 65 Federal Communications Commission - FCC 21-48 – Order and Authorization and Order on Reconsideration. April 27, 2021. Acessado em 07/06/25. Disponível em: https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-21-48A1_Rcd.pdf
- 66 Space Exploration Holdings. SpaceX Gen2 Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. August 18, 2021. Acessado em 07/06/2025. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-AMD-20210818-00105>.
- 67 Space Exploration Holdings. SpaceX Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. July 25, 2022. Acessado em 07/06/2025. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20220725-00074>
- 68 Space Exploration Holdings. SpaceX Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. September 6, 2022. Acessado em 07/06/2025. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20220906-00100>
- 69 Federal Communications Commission - FCC 22-91 – Order and Authorization. December 1, 2022. Acessado em 07/06/25. Disponível em: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-22-91A1.pdf>
- 70 Space Exploration Holdings. SpaceX Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. February 7, 2023. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-AMD-20230207-00021>
- 71 Space Exploration Holdings. SpaceX Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. February 7, 2023. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20230207-00021>
- 72 Space Exploration Holdings. SpaceX Gen2 Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. February 7, 2023. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-AMD-20230207-00022>
- 73 Space Exploration Holdings. SpaceX Gen2 Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. February 7, 2023. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20230207-00022>
- 74 Space Exploration Holdings. SpaceX Gen2 Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. March 22, 2023. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20230322-00062>
- 75 Space Exploration Holdings. SpaceX Gen2 Non-Geostationary Satellite System – Attachment A – Technical Information to Supplement SCHEDULE S. April 22, 2023d. Disponível em: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20230322-00062>
- 76 Federal Communications Commission - DA 24-1193 – Order and Authorization. November 26, 2024. Disponível em: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-24-1193A1.pdf>

- 77 Federal Communications Commission - DA 24-222 – Order and Authorization. March 8, 2024. Disponível em: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-24-222A1.pdf>
- 78 Wikipedia. Time-division multiple access. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Time-division_multiple_access.
- 79 Wikipedia. Viasat (American company). Acesso em 2025. [https://en.wikipedia.org/wiki/Viasat_\(American_company\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Viasat_(American_company))
- 80 Beck, R. The Low Satellite Life Expectancy of Starlink's Network. LinkedIn. July 7, 2025. <https://www.linkedin.com/groups/8266818/?highlightedUpdateUrn=urn%3Ali%3AgroupPost%3A8266818-7347905979079884801&q=highlightedFeedForGroups>
- 81 Pekhterev, S. The Bandwidth of the Starlink Constellation ... and the assessment of its potential subscriber base in the USA. SatMagazine, Nov. 2021. <http://www.satmagazine.com/story.php?number=1026762698#>
- 82 Puchol, M. Starlink Coverage Tracker. Acesso em 2025. <https://starlink.sx/>
- 83 H3. H3 indexes points and shapes into a hexagonal grid. Acesso em 2025. <https://h3geo.org/>
- 84 Veloso, T. Starlink no Brasil: saiba local das 22 estações terrestres. In: Tecnoblog. Setembro 2024. Acesso em 2025. <https://tecnoblog.net/noticias/starlink-estacoes-terrestres-brasil/>
- 85 Possebon, S. Constelação OneWeb já está ativa no Brasil e Eutelsat vê novo mercado B2B via satélites. Atualizado em 24/01/2024. Acessado em 07/06/2025. Disponível em: <https://teletime.com.br/23/01/2024/constelacao-oneweb-ja-esta-ativa-no-brasil-e-eutelsat-ve-novo-mercado-para-servicos-b2b-via-satelites/>.
- 86 Jones, A. Space News: China kicks off Guowang megaconstellation with Long March 5B launch. December 6, 2024. Acessado em 02/03/2025. Disponível em: <https://spacenews.com/china-kicks-off-guowang-megaconstellation-with-long-march-5b-launch/>.
- 87 Wikipedia. E-Space. Acessado em 01/07/2025. Disponível em: <https://en.m.wikipedia.org/wiki/E-Space>.
- 88 E-SPACE. E-SPACE Bridging Earth and Space. Acessado em 01/07/2025. <https://www.e-space.com/>.
- 89 Jones, A. Space News: First launch of Long March 8A sends second group of Guowang megaconstellation satellites into orbit. February 11, 2025. Acessado em 02/03/2025. Disponível em: <https://spacenews.com/first-launch-of-long-march-8a-sends-second-group-of-guowang-megaconstellation-satellites-into-orbit/>.
- 90 Wikipedia. Van Allen radiation belt. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt.
- 91 Wikipedia. O3b. Acesso em 2025. <https://en.wikipedia.org/wiki/O3b>
- 92 Wikipedia. Medium Earth Orbit. Acesso em 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Medium_Earth_orbit.
- 93 Terra. <https://www.terra.com.br/noticias/impacto-da-suspensao-da-starlink-no-brasil,cc5817483f9fedb8ded1dbb155ba4e56oysxrze0.html> . Acesso em 2025.
- 94 Telebrás. <https://www.telebras.com.br/telebras-sat/conheca-o-sgdc/> . Acesso em 2025.

- 95 Contrato Telebrás – Viasat
- 96 Saturação do SGDC
- 97 HughesNet. <https://www.ofertahughesnet.com.br/internet-via-satelite> . Acesso em 2025.
- 98 HughesNet. <https://www.hughesnet.com.br/internet-rural> . Acesso em 2025.
- 99 Viasat. <https://www.viasat.com/pt-br/internet-residencial/> . Acesso em 2025.
- 100 internetSat. <https://www.internetsat.com.br/isat2> . Acesso em 2025.
- 101 Vivo. <https://vivo.com.br/para-empresas/produtos-e-servicos/servicos-essenciais/ultrabanda-larga/internet-satelite> . Acesso em 2025.
- 102 Claro. <https://www.claro.com.br/claro-rural?srsId=AfmBOorP34o86dov23b15MAeFaV5sjwFV-chPLISQvaiKUdcK48hEDVO> . Acesso em 2025.
- 103 Telesíntese. <https://telesintese.com.br/embratel-amplia-o-ipsat-servico-de-banda-larga-via-satelite/> . Acesso em 2025.
- 104 Telebrás. <https://www.telebras.com.br/telebras-sat/> . Acesso em 2025.
- 105 Hughes Brasil. <https://www.hughes.com.br/novidades/86> . Acesso em 2025.
- 106 SES. <https://www.ses.com/pt/press-release/claro-brasil-estendera-servicos-moveis-de-4g-e-5g-em-toda-regiao-amazonica-com-o-o3b> . Acesso em 2025.
- 107 Teletime. <https://teletime.com.br/23/01/2024/constelacao-oneweb-ja-esta-ativa-no-brasil-e-eutelsat-ve-novo-mercado-para-servicos-b2b-via-satelites/> . Acesso em 2025.
- 108 GoGo Brasil. <https://gogoair.com.br/aviacao-executiva/redes-de-satelite/oneweb/> . Acesso em 2025.
- 109 Starlink. https://www.starlink.com/?srsId=AfmBOooLDIX6Z22s04I0gfJmkk-I18r_nTFA3rRng96KETA06EKbm7il . Acesso em 2025.
- 110 Lightspeed. <https://telesintese.com.br/autorizado-o-sistema-de-satelite-telesat-lightspeed-no-brasil/> . Acesso em 2025.
- 111 Telesíntese. <https://telesintese.com.br/governo-espera-inicio-da-operacao-da-spacesail-no-brasil-em-2026/> . Acesso em 2025.
- 112 LARSON, Wiley J, WERTZ, James R. (Ed.). **Space Mission Analysis and Design**. 2. ed. Torrance: Microcosm; Dordrecht/Boston/London: Kluwer, *Copyright* 1992. 865 p.
- 113 ANATEL. <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2025/2001-resolucao-772> . Acesso em 2025.

- 114 Wikipedia. Ariane 6. https://en.wikipedia.org/wiki/Ariane_6 . Acesso em 2025
- 115 Wikipedia. Geosynchronous Satellite Launch Vehicle. https://en.wikipedia.org/wiki/Geosynchronous_Satellite_Launch_Vehicle . Acesso em 2025
- 116 Wikipedia. Phased array. https://en.wikipedia.org/wiki/Phased_array . Acesso em 2025.
- 117 Castro, F. C. C. Notas de Aula. Disponível em <https://www.fccdecastro.com.br/download.html>, e https://www.fccdecastro.com.br/pdf/CE_Aula16a18_15122020.pdf. Acesso em 2025
- 118 Centro de Rastreo e Controle de Satélites. Disponível em: <http://www.inpe.br/crc/> Acesso em 2025.
- 119 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).
- 120 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 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X).** ETSI EN 302 307-2 V1.3.1 (2021-07).
- 121 Intellian (Eutelsat – OneWeb). <https://intelliantech.com/en/home#>. Acesso em 2025.
- 122 Mi-Wave. Phased Array Systems. <https://www.miww.com/phased-array-systems/>. Acesso em 2025.

19 Apêndice A

Entendendo as órbitas

Para atingir uma órbita ao redor da Terra, um satélite deve ser impulsionado para atingir a altitude desejada, e, em seguida, acelerado para a velocidade orbital, que pode variar entre 28000 km/h (equivalente a Mach 23) a 350 km de altitude e 11000 km/h em órbitas geoestacionárias. Embora a velocidade necessária para a órbita decresça com a altitude, o incremento de energia para levar o satélite até uma altitude maior sobrepuja significativamente a redução da velocidade. Para cada altitude existe uma velocidade específica que estabelece uma órbita circular, denominada de órbita de excentricidade nula. Se a velocidade for superior a esta a órbita se torna elíptica, como é apresentado na Figura A.1, com o centro da Terra coincidindo com um dos focos da elipse. O ponto da elipse mais próximo da Terra é denominado de perigeu (P , na figura), enquanto o ponto mais afastado é apogeu (A). A velocidade do satélite varia ao longo da órbita, sendo máxima no perigeu e mínima no apogeu. A distância do centro da elipse (C) até o apogeu ou perigeu é conhecida como semieixo maior da órbita, a . Da mesma forma, a distância de C até a elipse na direção perpendicular ao semieixo maior é conhecida como semieixo menor, b . A excentricidade orbital, e , pode ser obtida por relação geométrica em função de ambos os semieixos, ou a partir do conhecimento do raio do perigeu (r_p - distância entre o centro da Terra, F_1 , e o perigeu) e do raio do apogeu (r_a - distância entre F_1 e A). Igualmente o comprimento entre C e F_1 , ou entre C e F_2 é dado pelo produto entre o semieixo maior e a excentricidade, $a e$. O ângulo f , conhecido como anomalia verdadeira, permite localizar o satélite, S , num determinado ponto de sua órbita. Relações trigonométricas relacionam a anomalia verdadeira com o ângulo da anomalia excêntrica, u (não mostrado na figura) e essa se relaciona com o tempo por meio da equação de Kepler que associa a anomalia excêntrica com a anomalia média. Assim, para saber a posição do satélite num dado instante, calcula-se a anomalia média, M , que varia linearmente com o tempo, em seguida resolve-se a equação de Kepler para obter a anomalia excêntrica, e, a seguir, calcula-se a anomalia verdadeira. Portanto, conhecendo-se a anomalia média, o semieixo maior e a excentricidade orbital se define a posição do satélite no plano da órbita.

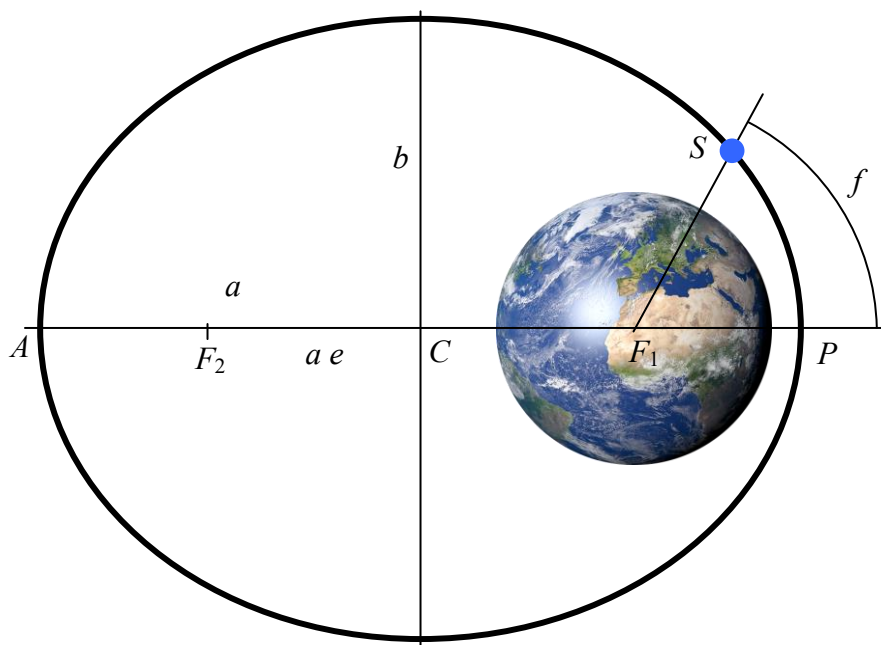


Figura A.1 – Órbita elíptica de um satélite ao redor da Terra.

Uma vez estabelecida uma órbita, o seu plano e seus parâmetros tendem a permanecer fixos no espaço e no tempo. Resta agora estabelecer as direções deste plano em relação a um sistema de coordenadas. Como pode ser visto na Figura A.2, recorre-se a um sistema inercial X - Y - Z no qual o plano orbital será definido. Este sistema possui o plano X - Y coincidente com o plano do Equador terrestre, mas ao contrário da Terra, que gira ao redor do eixo polar Z , este sistema permanece fixo no espaço. O plano da órbita intercepta a superfície da Terra no círculo denotado por PO na figura, e este círculo intercepta o plano do equador em dois pontos opostos, denominados de nodos: nodo ascendente, quando a órbita cruza o equador do sul para o norte, e nodo descendente, quando cruza em sentido reverso. O ângulo entre o eixo inercial X e a reta que passa pelo nodo ascendente define mais um elemento orbital, que é a ascensão reta do nodo ascendente, Ω . Em seguida tem-se o ângulo entre o plano orbital e o plano do equador, conhecido como inclinação orbital, i , medida entre o eixo polar Z e o eixo normal ao plano orbital, z . Finalmente o perigeu da órbita, P , pode ser localizado a partir do nodo ascendente pelo ângulo do argumento do perigeu, ω . Os parâmetros são denominados de elementos keplerianos, e constituem: o semieixo maior da órbita, a , a excentricidade, e , a inclinação, i , a ascensão reta do nodo ascendente, Ω , o argumento do perigeu, ω , e a anomalia média, M .

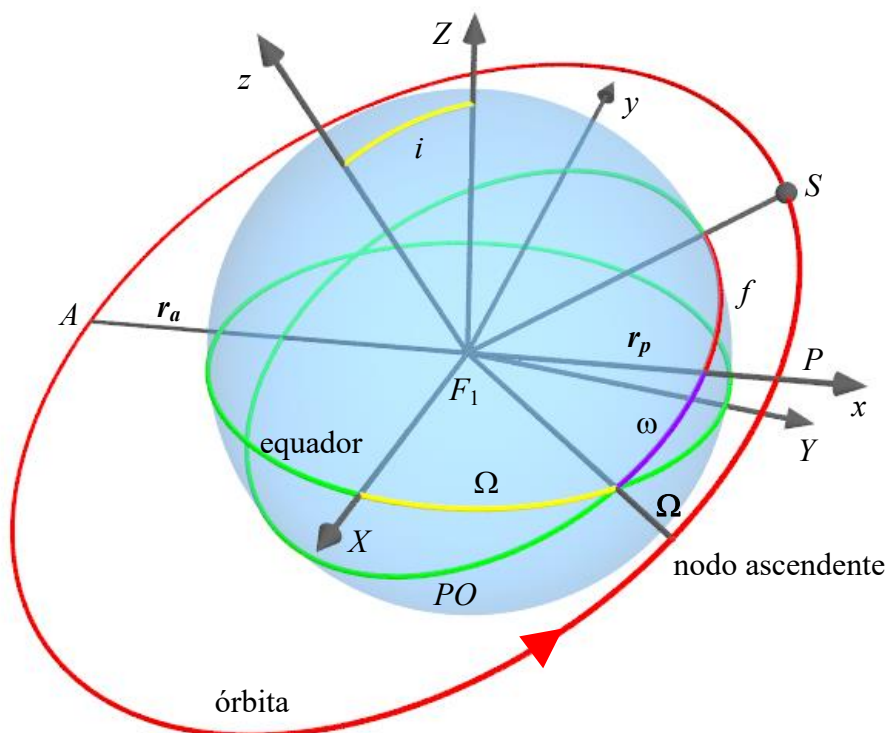


Figura A.2 – Órbita de um satélite terrestre no espaço.

Cumprе salientar que os elementos orbitais permanecem fixos no tempo apenas em circunstâncias especiais, raramente encontradas. De fato, influências gravitacionais do Sol e da Lua, aliados a variações na distribuição de massa da Terra, como o achatamento dos polos, e diversos outros efeitos que incluem o arrasto atmosférico fazem com que todos os elementos variem ao longo do tempo, em maior ou menor grau. A depender dos requisitos operacionais impostos ao satélite, poderão ser necessárias correções na órbita, por meio de propulsores, para mantê-los dentro de limites preestabelecidos.

20 Apêndice B

Satélites de custo reduzido (*lean*)

O termo *lean* foi empregado inicialmente pela fabricante de autos Toyota (4, que visava a produção de veículos com qualidade, baixo custo e prazo curto de entrega. Satélites costumeiramente são produzidos buscando a perfeição, em detrimento do custo e, quase sempre, excedendo os prazos alocados ao projeto. A redução do custo em constelações de comunicação veio da adoção de produção em larga escala (milhares de unidades), e pela utilização de componentes “de prateleira”, isto é, comerciais provindos da indústria automobilística, ao invés de componentes customizados como normalmente os satélites são produzidos. As unidades são submetidas a testes simplificados, mas alguns são retirados da linha de produção, e passam por testes exaustivos para garantir uniformidade e para detectar eventuais problemas na linha. Esta alternativa de produção tem uma contrapartida: satélites *lean* apresentam uma maior taxa de falhas, com tempo de vida útil mais reduzida, quando comparados aos satélites projetados na forma usual. Este problema é contornado pela rápida reposição em órbita para substituir as unidades defeituosas. Não é difícil constatar que a redução no preço conseguida com componentes industriais permite o lançamento de até 10 satélites pelo preço de um produzido com componentes qualificados espacialmente. Como resultado deste processo o obstáculo do custo de uma constelação composta por milhares de satélites de comunicação foi substancialmente reduzido.

21 Apêndice C

Redes de antenas faseadas

Devido às grandes distâncias envolvidas na comunicação por meio de radiodifusão, é natural que se recorra a amplificadores de sinal e antenas de alto ganho para compensar as perdas ocorridas no trajeto. Antenas parabólicas são amplamente utilizadas em torres de transmissão de sinais de telefonia móvel e internet. Quando se trata de satélites, além das distâncias serem ainda maiores, os sinais gerados ou retransmitidos em órbita são de baixa potência, pela pouca disponibilidade de geração remota de energia. As antenas, neste caso, precisam ser maiores e mais eficientes, atingindo, por vezes, dezenas de metros de diâmetro. Ainda que se considere que antenas substancialmente menores possam ser empregadas com as tecnologias atuais, ainda assim a comunicação com satélites em órbita baixa irá requerer um sistema de acompanhamento, ou rastreamento, do satélite ao sobrevoar um usuário ou uma estação receptora. Por sua vez, os sistemas de apontamento de antenas dependem de motores elétricos para movimentar e direcionar o sinal ao satélite. Este movimento é relativamente lento, impedindo com isto um rápido redirecionamento da antena para outro satélite da constelação. A solução deste problema consiste na utilização de redes de antenas faseadas (*Phased Array Antennas*). Este dispositivo é composto por um conjunto de pequenas antenas, cada qual transmitindo o mesmo sinal, porém defasados no tempo por um intervalo previamente determinado por um sistema de controle eletrônico. Com isso, como pode ser visto à esquerda da Figura C.1, o sinal transmitido ou recebido por cada uma das antenas combina-se adicionalmente às demais, formando uma frente de onda que pode ser orientada a qualquer direção. Quanto maior a defasagem no tempo entre as antenas, mais inclinada será a frente de onda. Uma rede de antenas faseadas possui pequenas antenas alinhadas em dois sentidos num plano, para com isso direcionar o feixe para qualquer direção no espaço. Este tipo de antena possui diversas qualidades: não precisa de sistema motor para direcionar o feixe de ondas, apresenta redirecionamento de sinal praticamente instantâneo, e é altamente compacto e de tamanho reduzido. Ademais, circuitos integrados para controle da fase podem ser facilmente comprados, e com custo reduzido.

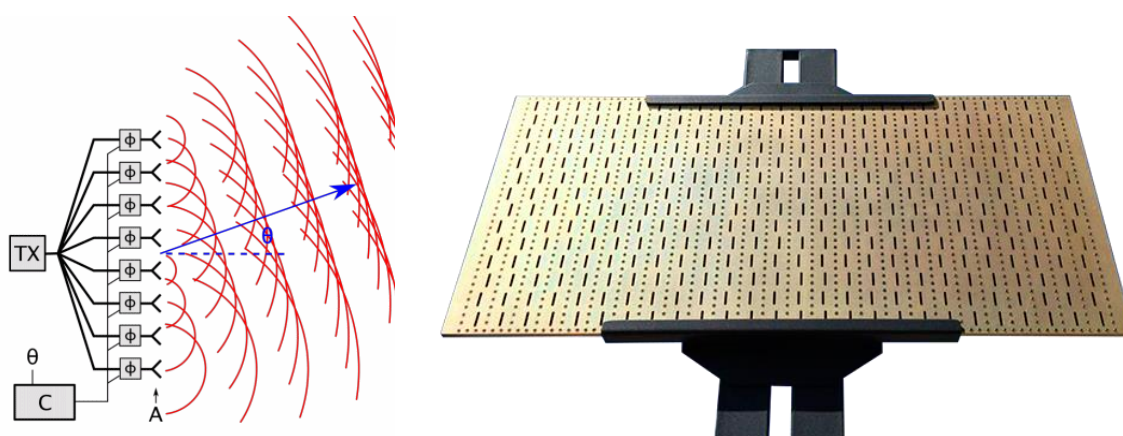


Fig. C.1 – Ondas em uma rede de antenas faseadas (a) e antena plana. [13, 14].

22 Apêndice D

Elo óptico intersatélite

A alta velocidade e baixa latência atingida pelas constelações em órbita baixa estão fortemente baseadas na comunicação intersatélite por meio de feixe de laser óptico, denominada de *Optical Intersatellite Link* (OISL), capaz de criar uma rede conectando qualquer satélite da constelação com outro que esteja em seu campo de visibilidade [41]. Os satélites podem ser equipados com dois, três ou quatro destes sistemas de comunicação, o que permite estender a rede por dezenas de satélites. A capacidade de tráfego atingida por este sistema pode chegar a mais de 10 Gbps. Quando comparados com sistemas tradicionais de comunicação em rádio frequência, o OISL apresenta várias vantagens [39]:

- apresenta alta taxa de transferência de dados,
- dispensa o uso de antenas, o que reduz o tamanho e massa do equipamento,
- elimina interferências de outras fontes por utilizar feixes estreitos de comunicação,
- aumenta a segurança da informação por limitar o espalhamento do feixe,
- requer pequena potência para transmissão,
- elimina a necessidade de registro de frequências de rádio para comunicação.

A interconexão entre satélites reduz substancialmente a latência da informação. Uma conexão entre duas cidades afastadas, como, por exemplo, São Paulo e Nova Iorque, passa por diversas estações de roteamento em terra, redes de fibra óptica e, eventualmente, até um satélite GEO, aumentando sensivelmente a latência. Estima-se que a redução de 1 milissegundo no tempo de acesso a dados representa uma vantagem que pode valer de 100 milhões de dólares em um ano para uma agência de corretagem na bolsa de valores, e alguns milissegundos podem atingir cifras de alguns bilhões de dólares [39]. Pode ser demonstrado que um elo espacial com satélites em órbita baixa apresenta uma latência menor do que uma rede de fibra óptica em solo a partir de distâncias superiores a 3000 quilômetros.

Existem diversas empresas que produzem comunicadores por feixe de laser entre satélites, (Figuras D.1 e D.2) mas as informações a respeito dos produtos são escassas, ou simplesmente inexistentes.



Fig. D.1 – Condor MK3 (a) e OISL (b), ambos produzidos pela Mynaric. Fontes: [39, 40].



Fig. D.2 – SCOT80 OISL produzido pela Tesat, até 100 Gbps, até 8000 km [42].

Os equipamentos podem ser produzidos com apenas o transmissor, apenas o receptor ou ambos, mas todas as constelações utilizam OISL bidirecional. Devido à pequena largura do feixe de laser, o apontamento do emissor deve ser muito preciso, considerando-se distâncias de milhares de quilômetros entre este e o receptor. Não se conseguiu obter informações sobre a divergência do feixe emitido, porém sabe-se que transmissores podem ajustar esta divergência, e tornar o feixe mais estreito ou mais largo. O apontamento do emissor pode ser realizado por movimento de redirecionamento do satélite, ou, mais comumente, por direcionamento do próprio feixe de laser. Pode-se notar que alguns equipamentos (Figura D.1) possuem gôndolas (*gimbal*) motorizados que permitem direcionar o feixe dentro de certos limites. Outros (Figura D.2 TBC), produzem o direcionamento do feixe óptico a partir de espelhos internos movidos por pequenos motores. A técnica empregada pelo receptor pode também variar, mas a mais comum é o emprego de uma matriz de detectores semelhante a uma câmera digital, sensível ao comprimento de onda do emissor, e com filtros ópticos para eliminação de ruídos. Contudo, o estabelecimento da intercomunicação entre dois equipamentos é um processo complexo que pode demandar até dezenas de segundos [39], conhecido como aquisição, rastreamento e apontamento (ATP – *Acquisition, Tracking and Positioning*).

O processo ATP tem início com o emissor enviando um feixe com uma determinada divergência em uma trajetória espiral ou zigzag que percorre a área de um possível receptor [43]. Quando este feixe atinge o telescópio do receptor, ele cria uma pequena imagem na matriz de detectores. As coordenadas deste ponto na imagem fornecem ao receptor a direção do emissor. Neste instante o receptor comanda seu emissor para direcionar seus espelhos de forma a enviar um feixe estreito de reconhecimento em direção ao emissor. Agora o sistema de recepção do emissor reconhece o feixe oriundo do receptor, utilizando o mesmo processo descrito no receptor, e canaliza seu feixe em direção a ele. O elo é então criado, e a movimentação de qualquer um deles no campo de visada do outro irá fazer com que a imagem do emissor no detector do receptor se movimente também. Os espelhos são então redirecionados para a nova posição garantindo a continuidade da comunicação entre eles. É claro que o processo ATP é distinto entre os diversos fabricantes, mas todos eles seguem estratégias semelhantes.

Como mencionado na seção 3, as constelações de satélites para serviço de internet adotam órbitas LEO com simetria geométrica e manutenção de fase. Esta simetria permite afirmar que os satélites que ocupam o mesmo plano orbital tenham também uma direção fixa entre eles, tanto à frente quanto para trás no sentido do movimento orbital. É bastante evidente que o elo entre os OISL no mesmo plano orbital seja mais perene, e menos sujeito a alterações de direção no seu campo de visada, bastando, para isto, que cada satélite tenha dois OISL: um direcionado à frente e outro direcionado para trás. Por outro lado, por mais útil que esta conexão intersatélite possa ser, ela impede a comunicação entre diferentes planos orbitais. Para isso será necessário acrescentar mais dois OISL: um à direita e outro à esquerda do satélite. Contudo, o tempo necessário para a ATP de ambos será maior, uma vez que pode haver uma significativa diferença na posição entre satélites em planos orbitais vizinhos. Conexões entre planos vizinhos são denominadas de interorbitais, enquanto conexões no mesmo plano são denominadas de intraorbitais. Por sua vez, as conexões interorbitais podem ser próximas, para planos orbitais adjacentes ou próximos, e conexões cruzadas para os planos orbitais que cruzam em direções descendentes um plano com satélites na parte ascendente da órbita (ou vice-versa). As conexões cruzadas tendem a ser de curta duração porque a velocidade relativa entre os satélites é muito maior, porém são importantes para garantir uma baixa latência [39]. Em vista disto, costuma-se nomear as conexões interorbitais e próximas como sendo permanentes, e as conexões cruzadas como sendo temporárias.