



ANÁLISE DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO LEO / MEO PARA OPTIMIZAR A TRANSMISSÃO DE DADOS NA AVIAÇÃO

RODRIGUES, TAYNA G. (1); REIS, ANTONIO D. (2); VELEZ, FERNANDO J. (3)

(1) Instituto de Telecomunicações e UBI, E-mail: gurupy.rodriques@ubi.pt

(2) Universidade da Beira Interior, E-mail: adreis@ubi.pt

(3) Instituto de Telecomunicações e UBI, E-mail: fjv@ubi.pt

RESUMO

Este trabalho consiste em estudar e analisar um conjunto de modelos de comunicação entre satélites e aviões, explorando novas tecnologias LEO (Low Earth Orbit)/ MEO (Medium Earth Orbit). Por muitas décadas, os aviões dependiam só de sistemas de comunicações no solo, como o NDB (Non-Directional Beacon), cujas estações terrestres transmitem numa só direcção, e o VOR (Very high frequency Omnidirectional radio Range), cujas estações transmitem em todas as direcções. Estes sistemas, operam na banda dos 118 MHz – 137 MHz, estão a ficar obsoletos e, sobretudo nos vãos transcontinentais, têm vindo a ser substituídos por comunicações via satélite. Estas comunicações já possibilitam que os passageiros possam utilizar telemóveis a bordo. A órbita terrestre é a rota de movimento dos satélites naturais ou artificiais em volta da Terra. Há quatro tipos de órbitas para satélites de comunicação que são: GEO (Geostationary Earth Orbit), com uma altitude de 36000 km da Terra, LEO, com uma altitude de 500km a 1500 km, MEO, com uma altitude de 10400 km e a HEO (Highly Elliptical Orbit), com uma altitude elíptica, entre 1000 km (próximo) e 39000 km. Esta investigação foca-se nas comunicações de satélites LEO / MEO, assim como na integração com as futuras redes 5G. Através de uma simulação com a ferramenta Ansys STK, cujo objectivo é analisar os parâmetros críticos da ligação ascendente (UL) e também ligação descendente (DL), num contexto de comunicação de satélite para avião e de avião para satélite, respetivamente, estudou-se como diferentes condições meteorológicas afetam a comunicação. Verificou-se que a degradação na qualidade da comunicação apenas ocorreu logo após o satélite começar a comunicação com o avião e imediatamente antes de ocorrer o handover. Foram sugeridas também técnicas de mitigação, como a utilização de satélites redundantes, técnicas de modulação adaptativa, diversidade de frequência.

Palavras-chave: Comunicação, Órbitas, Satélites LEO, Aviões.

ABSTRACT

This work consists of studying and analyzing some models of communications between satellites and aircraft by exploring new LEO (Low Earth Orbit) / MEO (Medium Earth Orbit) technologies. For many decades, aircraft have relied solely on ground-based communications systems, such as the NDB (Non-Directional Beacon), whose ground stations transmit in only one direction, and the VOR (Very high frequency Omnidirectional radio Range), whose stations transmit in all directions. These systems, which operate in the 118 MHz - 137 MHz band, are becoming obsolete and, especially on transcontinental flights, have been replaced by satellite communications. These communications already allow passengers to use cell phones on board. Earth orbit is the route of movement of natural or artificial satellites around the Earth. There are four types of orbits for communication satellites: GEO (Geostationary Earth Orbit) with an altitude of 36000 km from Earth, LEO with an altitude of 500km to 1500 km, MEO with an altitude of 10400 km and HEO (Highly Elliptical Orbit) with an elliptical altitude between 1000 km (near) and 39000 km. This research focuses on LEO / MEO satellite communications, as well as integration with future 5G networks. Through a simulation with the Ansys STK tool, the aim has been to analyze the critical parameters of the uplink (UL) and downlink (DL), in a context of satellite-to-airplane and airplane-to-satellite communication affected by different weather conditions. It was found that the degradation in communication quality only occurred shortly after the satellite began communicating with the plane and just before the handover occurred. Mitigation techniques such as redundant satellites, adaptive modulation techniques and frequency diversity have been suggested.

Keywords: Communication, Orbits, LEO Satellites, Airplanes.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho pretende analisar e estudar os sistemas de comunicação para transmissão de dados entre satélites e aeronaves. As tentativas de voar começaram na antiguidade, com a observação dos pássaros, sendo difícil determinar quem exatamente descobriu o avião. No entanto, dois grandes marcos na história da aviação foram fundamentais: em 1903, os irmãos Wright construíram um protótipo controlado, motorizado, mais pesado que o ar e capaz de voar com piloto a bordo; e em 1906, Santos Dumont, um dos pioneiros da aviação, fez o primeiro voo público de um avião, o 14-Bis, que decolou por seus próprios meios, o primeiro com motor a gasolina, e portanto sem auxílio externo no Campo de Bagatelle, em Paris. Em 1922, Gago Coutinho e Sacadura Cabral, num hidroavião, realizaram a primeira travessia aérea do Atlântico Sul, de Portugal para o Brasil.

A necessidade de estabelecer orientações, com rotas dirigidas para o destino, surgiu logo no início da navegação aérea. As rotas iniciais

tinham desvios em zigzag consideráveis, para permitirem pousos intermédios de abastecimento, entre a origem e o destino.

Na década de 1940, surgiu a navegação orientada por radiofrequência, começou pela NDB (Non Directional Beacon), que é uma rádio AM no solo que, em vez de AM, transmite sinais de grau em grau entre 0° e 360°. Depois foi inventada a VOR (VHF Omnidirectional Range) que é omnidirecional, de maior alcance e de maior precisão que a anterior. Ela permite que o piloto escolha um rumo. Baseia-se em torres terrestres estrategicamente colocadas nas rotas desejadas. Foi criado o HFDL (High Frequency Data Link) que é um protocolo de ligação de dados entre estações terrestres e aeronaves. A banda VHF de Telecomunicações Aeronáuticas (118-137 MHz) tem 760 canais, cada um ocupando 25 kHz, ou seja, $118 + 760 \times 0.025 = 137$ MHz. A banda FM (87.5-108 MHz) pode criar espúrias e interferir. Apresenta-se uma torre terrestre, ou de solo, de controlo de tráfego aéreo na Figura 1 [1].



Figura 1 Estação de solo VOR na Alemanha, extraída de [44]

As estações de solo não podem ser colocadas nos mares profundos. Então nos anos 1950 surgiu a navegação inercial, que usava a direção de rotação da Terra e o giroscópio. Depois foi usada a navegação inercial e auxílio do GPS principiante. Só depois, surgiu o GPS (Global Position Satellite) que foi desenvolvido após a guerra do Golfo, como se apresenta na Figura 2 [2].

Posteriormente, surgiu o PBN (Performance Base Navegation) que é um aperfeiçoamento do GPS. As aeronaves foram tendo cada vez mais autonomia de voo, percorrendo longas distâncias sem abastecimento. Simultaneamente, surgiram mais variedades de satélites para além dos GEO (Geostationary Earth Orbit), por exemplo, LEO (Low Earth Orbit) e MEO (Medium Earth Orbit).

Neste trabalho, para além de se abordarem as torres terrestres, dá-se uma atenção adicional às comunicações por satélite LEO, com especial destaque para a constelação Starlink de Elon Musk. Aborda-se como as condições atmosféricas afetam a comunicação de canal descendente (*downlink*) e canal ascendente (*uplink*). Finalmente, discutem-se os resultados e apresentam-se as conclusões.



Figura 2 Comunicação de estações de solo e aeronaves, através de satélite

2. COMUNICAÇÕES, CAMADAS ATMOSFÉRICAS E CLIMA

Os satélites recebem e transmitem em frequências da banda L (1.530 GHz a 1.6605 GHz), quando se comunicam com as aeronaves, e em frequências da banda C (3.76 GHz a 6.425 GHz) quando se comunicam com estações de solo. A UIT (União Internacional de Telecomunicações) está preocupada com a possível interferência do 5G.

Há vários tipos de interferências, tais como as ondas electromagnéticas do sol, interferência de outros satélites, e terrestres, casuais e intencionais. Destacamos as interferências das camadas atmosféricas e do clima. Mais recentemente, na banda intermédia (acima de 7 GHz), que é também utilizada para comunicações via satélite, por exemplo, a banda Ku, também se começam a suportar comunicações celulares.

2.1. As camadas atmosféricas afectam as comunicações

As ondas em radiofrequência quando atravessam as camadas atmosféricas, apresentadas na Figura 3 [3], sofrem perturbações, nomeadamente interferências. A ionosfera é transparente para estas frequências, mas pode reflectir ondas de rádio.

Os satélites LEO estão em órbita a uma altura entre 500 km a 1500 km e um período de revolução de 1h 30m a 2h. Os MEO estão a uma altura de 10400 km e um período de revolução de 6h. Os GEO estão a uma altura de 36000 km e um período de revolução de 23h 56m, ou seja, fixo em relação à Terra.

2.2. As condições meteorológicas afectam as comunicações

As condições climáticas podem interferir tanto no sinal terra – satélite como no sinal satélite - aeronave. A maioria das aeronaves civis voa na troposfera, onde na parte mais baixa podem haver nuvens, como se apresenta na Figura 4 [4]. A chuva intensa pode interferir nas comunicações entre a estação terrestre, o satélite e a aeronave.



Figura 3 As ondas em radiofrequência atavessam diversas camadas até ao satélite [47]

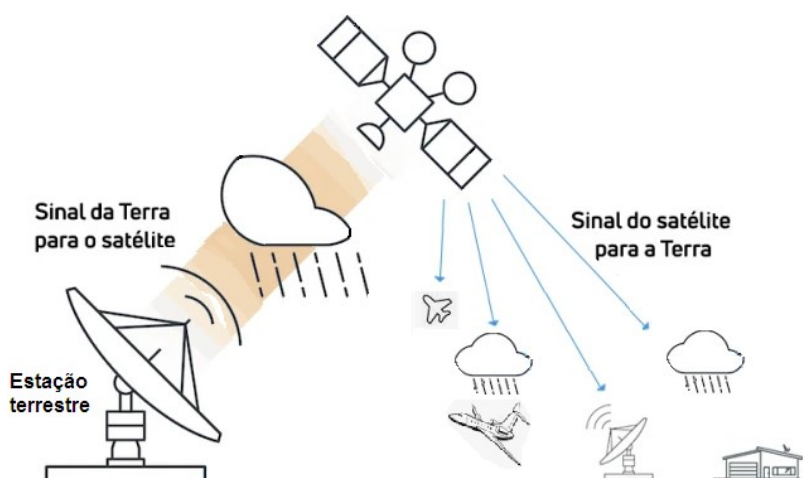


Figura 4 O clima, nomeadamente a chuva, pode afectar as comunicações

3. IMPACTO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS NAS COMUNICAÇÕES

As comunicações entre satélites e aeronaves são directamente influenciadas pelas condições atmosféricas. Diversos fenómenos, como chuva, nuvens densas, neblina e distúrbios ionosféricos, afectam a propagação das ondas de rádio, comprometendo a integridade dos links de comunicação. Em especial, em frequências mais altas como as bandas Ku e Ka (entre 27 e 40 GHz), os efeitos das condições atmosféricas podem ser significativos e imprevisíveis [5], [6], [7]. A Figura 5 representa as camadas da atmosfera, os fenómenos atmosféricos que tem impacto na comunicação ocorrem maioritariamente na troposfera, a exceção do fenómeno da cintilação ionosférica [5]. Estes fenómenos serão explicados ao longo desta secção.

3.1. Atenuação pela chuva

A chuva é um dos maiores desafios enfrentados pelas comunicações via satélite, causando uma severa atenuação do sinal, particularmente nas bandas de frequência mais elevadas. Esse fenómeno ocorre quando as gotas de chuva absorvem e dispersam as ondas de rádio, resultando em uma perda substancial de potência do sinal quando se propaga entre o satélite e a aeronave [7], [8], [9], [10].

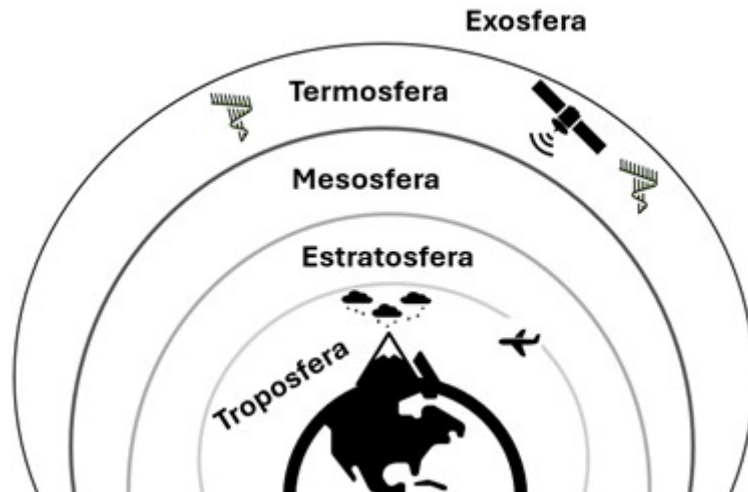


Figura 5 Impacto das condições atmosféricas nas comunicações

Regiões tropicais, que experimentam chuvas intensas e frequentes, sofrem os maiores impactos. Nesses locais, as comunicações por satélite podem ser significativamente interrompidas, com a atenuação causada pela chuva levando a longos períodos de desvanecimento do sinal [8]. Em regiões temperadas, embora a intensidade das chuvas seja menor, ainda podem ocorrer interferências, especialmente durante tempestades ou chuvas persistentes ao longo do voo, o que resulta em degradação da qualidade da ligação (link) de comunicação entre satélites e aeronaves [10].

A atenuação causada pela chuva pode ser calculada utilizando a lei de Beer-Lambert para a absorção de ondas eletromagnéticas, adaptada para a propagação de ondas de rádio. A fórmula da atenuação específica da chuva (em dB/km) é dada por:

$$A_{\text{chuva}}(\text{dB}) = kR^{\alpha}d \quad (1)$$

onde A_{chuva} é a atenuação total, em dB; k é um coeficiente que depende da frequência e do tipo de chuva; R é a taxa de precipitação, em mm/h; α é um expoente que varia com a frequência; d é a distância do percurso do sinal na chuva, em km.

3.2. Cobertura por nuvens e neblina

A cobertura por nuvens e a neblina também têm impacto na qualidade das comunicações satélite-aeronave, especialmente em frequências mais altas, como as bandas Ka e Ku [11]. Nuvens densas, particularmente em altitudes elevadas, absorvem e dispersam as ondas de rádio, reduzindo a intensidade do sinal que chega à aeronave [12]. A neblina, semelhante às nuvens densas, pode aumentar a dispersão das ondas de rádio e, em situações extremas, levar a perdas notáveis de sinal [13].

3.3. Distúrbios ionosféricos

A ionosfera, que fica entre 60 e 1000 km de altitude, contém partículas carregadas que afetam a propagação das ondas de rádio, especialmente em frequências mais baixas, como as bandas L e UHF, mas também impacta frequências mais altas em certas condições [14]. Durante períodos de intensa atividade solar, ou em regiões de baixa latitude, a ionosfera pode sofrer distúrbios que resultam em degradação severa dos sinais de comunicação entre satélites e aeronaves [15], [16].

3.4. Efeitos troposféricos e cintilação

A troposfera, a camada mais baixa da atmosfera, afeta diretamente as comunicações via satélite, especialmente as que operam em frequências mais altas, como as bandas Ku e Ka [17]. O vapor d'água, gases atmosféricos e partículas em suspensão na troposfera podem causar a absorção e dispersão do sinal, resultando em degradação significativa da comunicação entre satélites e aeronaves [6].

4. TECNOLOGIAS PARA MINIMIZAR OS IMPACTOS METEOROLÓGICOS

À medida que a dependência da comunicação via satélite na aviação aumenta, diversas tecnologias e estratégias de mitigação foram desenvolvidas para enfrentar os impactos adversos das condições atmosféricas. Com base nas técnicas abordadas para mitigar os impactos das condições meteorológicas na comunicação satélite-aeronave, é possível fazer uma análise comparativa das principais soluções desenvolvidas. Essa comparação baseia-se em parâmetros como eficiência, robustez, complexidade de implementação e custos, com foco em garantir a continuidade e a qualidade da comunicação, mesmo em condições adversas. A seguir, discutimos as principais abordagens tecnológicas aplicadas.

4.1. Diversidade de frequências

A diversidade de frequência é essencial para mitigar a atenuação causada por fenômenos como chuva, nuvens e distúrbios atmosféricos. A transmissão simultânea de sinais em diferentes bandas de frequência permite que, se uma banda for severamente degradada por condições meteorológicas, outra banda pode continuar a transmissão [18].

4.2. Técnicas de correção de erros

As técnicas de correção de erros são fundamentais para garantir a integridade dos dados transmitidos, especialmente em condições atmosféricas adversas. Dois métodos amplamente utilizados na comunicação satélite-aeronave são os códigos Reed-Solomon (RSCC) e os algoritmos de correção antecipada de erros (Forward Error Correction, FEC).

O código Reed-Solomon (RSCC) adiciona bits redundantes ao fluxo de dados, permitindo que o receptor detecte e corrija erros sem a

necessidade de retransmissão. Esse método é altamente eficaz para mitigar os efeitos da chuva e da cintilação ionosférica, garantindo que a comunicação continue mesmo com degradações temporárias no sinal. A capacidade de correção de erros aumenta a robustez da comunicação, mas ao custo de maior complexidade computacional [19].

4.3. Algoritmos de controlo de potência

Os algoritmos de controlo de potência ajustam dinamicamente a potência de emissão com base nas condições atmosféricas, como chuva intensa ou cintilação ionosférica [18], sendo fundamentais para compensar a atenuação da chuva, ajustando a potência de emissão em tempo real para garantir que a qualidade do sinal [10].

4.4. Ligações de satélites redundantes

A utilização de ligações de satélite redundantes é uma estratégia eficaz para garantir a continuidade da comunicação em condições meteorológicas adversas [20]. Em sistemas críticos, como os utilizados na aviação, é comum ter várias ligações de satélite disponíveis, permitindo que o sistema realize *handover* para uma ligação de recurso (backup) quando o principal for severamente degradado por atenuação, cintilação ou distúrbios ionosféricos [20].

5. DESAFIOS EM ABERTO E TENDÊNCIAS FUTURAS

Com base na análise anterior, é possível identificar desafios ainda não resolvidos e áreas promissoras para futuras pesquisas e inovações tecnológicas na comunicação satélite-aeronave. À medida que a dependência de satélites cresce, surgem novas exigências para garantir a continuidade da comunicação, especialmente sob condições meteorológicas adversas. Além disso, a utilização de, por exemplo, Inteligência Artificial (IA) ou redes híbridas oferece soluções potenciais para superar esses desafios.

5.1. Equilíbrio entre eficiência energética e intensidade do sinal

Um dos maiores desafios enfrentados pelos sistemas de comunicação via satélite é o equilíbrio entre a eficiência energética e a intensidade do sinal, especialmente em frequências altas, como Ku e Ka, onde a atenuação pela chuva é significativa [21]. Em situações meteorológicas adversas, há a necessidade de aumentar a potência de transmissão para compensar as perdas de sinal, o que, por sua vez, pode elevar o consumo de energia de forma considerável [22].

5.2. Redes híbridas de satélites e terrestres

As redes híbridas, que combinam componentes de satélite e terrestres, são outra tendência emergente para expandir a cobertura global, especialmente em regiões remotas e oceânicas, onde a infraestrutura terrestre é limitada [13], [23].

Este tipo de rede oferece flexibilidade para alternar entre ligações de Frequência de Rádio (Radio Frequency, RF) e óptica de espaço livre (Free Space Optics, FSO), dependendo das condições atmosféricas, o que melhora a confiabilidade e a eficiência energética dos sistemas [13], [23], [24].

Estas redes também permitirão uma conectividade contínua, reduzindo as lacunas de comunicação e suportando aplicações de mobilidade aérea urbana (UAM) e veículos aéreos não tripulados (UAVs) [13].

5.3. Inteligência artificial e otimização preditiva

O uso de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (ML) está emergindo como uma solução chave para otimizar o desempenho dos sistemas de comunicação satélite-aeronave. Modelos preditivos de IA podem ser usados para prever as condições atmosféricas e ajustar preventivamente os parâmetros da ligação, como potência de emissão, modulação e codificação [9], [25], [26]. Isso é particularmente útil em regiões tropicais, onde a atenuação pela chuva e cintilação troposférica são frequentes e imprevisíveis.

5.4. Expansão da cobertura global com constelações LEO

As constelações de satélites LEO desempenharão um papel central na expansão da conectividade global, oferecendo uma combinação de baixa latência e ampla cobertura. Isso é especialmente relevante para a comunicação satélite-aeronave em regiões oceânicas e polares, onde os satélites geoestacionários (GEO) têm limitações [27], [28]. A *Figura 6* apresenta a distinção entre as diferentes camadas de satélites.

Essas constelações enfrentam desafios relevantes, como a necessidade de handover frequente entre satélites e estações terrestres [29].

5.5. Desafios e oportunidades em ambientes remotos

Um desafio persistente é garantir uma comunicação ininterrupta em espaços aéreos remotos e oceânicos, onde a infraestrutura terrestre é limitada ou inexistente. A integração de redes híbridas satélite-terrestre e a expansão de constelações LEO são soluções promissoras para cobrir essas áreas [13], [23].

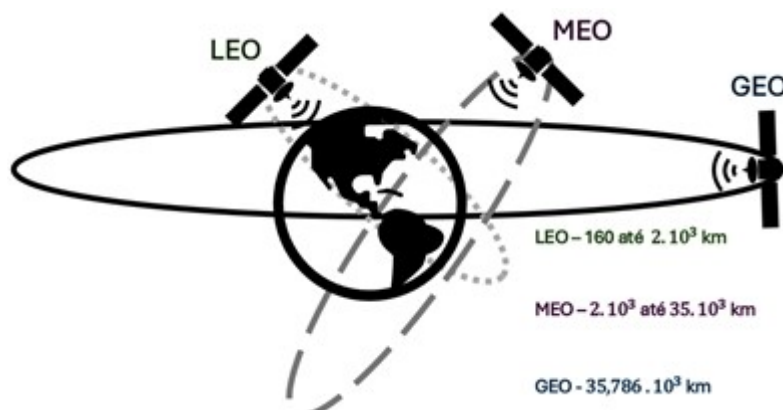


Figura 6 Diferentes satélites: LEO, MEO e GEO

No entanto, a manutenção de handovers confiáveis entre satélites e a otimização da rede para minimizar a latência e a perda de pacotes são áreas críticas de investigação futura [29].

6. RESULTADOS

Foram feitas simulações com o Ansys STK integrando parâmetros da tecnologia 5G-NR, que usa orbitas LEO para analisar desempenho métricos de ligação ascendente e descendente. Os satélites LEO estão mais próximos das aeronaves, então os sinais podem ser mais fracos (potência de emissão inferior), exigem menor direcionalidade, mas precisam duma constelação com um número mais levado de satélites. Os GEO estão mais distantes das aeronaves, então precisam de sinais mais fortes, exigem maior direcionalidade, mas necessitam de poucos satélites. Os MEO estão numa situação intermédia.

A simulação foi desenvolvida para simular um ambiente dinâmico, onde a interação entre o satélite e a aeronave lida com variações climáticas comuns e desfavoráveis, representando as circunstâncias reais que acontecem em voos de longa distância.

6.1 Comunicação de canal descendente

Na Tabela 1, foram estabelecidos os parâmetros do downlink entre o satélite e a aeronave, utilizando uma frequência de 12.5 GHz na banda Ku. O satélite foi configurado com um emissor de EIRP de 35 dBW, assegurando que o sinal alcance a aeronave com a potência correta, mesmo após atenuações decorrentes da distância e do clima. A velocidade de transmissão foi mantida em 16 Mb/s e a modulação selecionada foi QPSK. Foi selecionada uma largura de banda de 20 MHz para assegurar uma transmissão eficiente e livre de congestionamento. Com um G/T de 20 dB/K, o receptor da aeronave funciona em um ambiente com menos ruído devido à temperatura mais baixa do céu, o que aumenta a sensibilidade e eficácia na recepção do sinal. A análise da comunicação de canal descendente entre o satélite e a aeronave foi realizada com a aplicação de filtros de condições meteorológicas utilizando modulação QPSK.

Na Figura 7, num cenário que levou em conta o efeito de condições meteorológicas como chuva e neblina e empregou modulação QPSK, a EIRP manteve-se estável em 35 dBW, enquanto a frequência recebida exibiu oscilações suaves decorrentes do efeito Doppler. A potência recebida foi consideravelmente reduzida pelas condições meteorológicas adversas, levando a uma queda na qualidade do sinal, especialmente nos estágios iniciais da simulação.

Tabela 1 Parâmetros usados na simulação da ligação descendente

Emissor	Frequência = 12.5 GHz	Recetor	Frequência = 12.5 GHz
	EIRP = 35 dBW		G/T = 20 dB/K
	Data rate = 16Mb/s		Modulação - QPSK
	Largura de Banda = 20MHz		

10 Oct 2024 19:55:58

Aircraft-Aircraft1-Sensor-Sensor1-Receiver-Receiver1-To-Satellite-STARLINK-1183_45088-Transmitter-Transmitter1: Link Budget

Time (UTC)	EIRP (dBW)	Rcvd. Frequency (GHz)	Rcvd. Iso. Power (dBW)	Flux Density (dBW/m ²)	g/T (dB/K)	C/No (dB*Hz)	Bandwidth (kHz)	C/N (dB)	Eb/No (dB)	BER
23 Sep 2024 19:39:55.134	35.000	12.500207	-239.248	-195.854477	20.000000	9.350777	16000.000	-62.6904	-62.6904	4.945861e-01
23 Sep 2024 19:40:55.000	35.000	12.500188	-148.271	-104.876867	20.000000	100.328387	16000.000	28.2872	28.2872	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:41:55.000	35.000	12.500163	-147.428	-104.033820	20.000000	101.171434	16000.000	29.1302	29.1302	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:42:55.000	35.000	12.500129	-146.657	-103.262634	20.000000	101.942620	16000.000	29.9014	29.9014	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:43:55.000	35.000	12.500084	-146.041	-102.546871	20.000000	102.558383	16000.000	30.5172	30.5172	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:44:55.000	35.000	12.500027	-145.689	-102.294806	20.000000	102.910448	16000.000	30.8692	30.8692	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:45:55.000	35.000	12.499966	-145.711	-102.317036	20.000000	102.888218	16000.000	30.8470	30.8470	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:46:55.000	35.000	12.499915	-146.081	-102.687462	20.000000	102.517792	16000.000	30.4766	30.4766	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:47:55.000	35.000	12.499874	-146.687	-103.293321	20.000000	101.911933	16000.000	29.8707	29.8707	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:48:55.000	35.000	12.499843	-147.435	-104.040901	20.000000	101.164353	16000.000	29.1232	29.1232	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:49:55.000	35.000	12.499816	-148.254	-104.860215	20.000000	100.345039	16000.000	28.3038	28.3038	1.000000e-30
23 Sep 2024 19:50:55.000	35.000	12.499797	-232.817	-189.423066	20.000000	15.782188	16000.000	-56.2590	-56.2590	4.991321e-01
23 Sep 2024 19:50:59.601	35.000	12.499796	-234.786	-191.391940	20.000000	13.813314	16000.000	-58.2279	-58.2279	4.993081e-01
23 Sep 2024 21:23:03.111	35.000	12.500114	-228.221	-184.826964	20.000000	20.378290	16000.000	-51.6629	-51.6629	4.985267e-01
23 Sep 2024 21:24:03.000	35.000	12.500083	-148.781	-105.386831	20.000000	99.818423	16000.000	27.7772	27.7772	1.000000e-30
23 Sep 2024 21:25:03.000	35.000	12.500047	-148.489	-105.095125	20.000000	100.110129	16000.000	28.0689	28.0689	1.000000e-30
23 Sep 2024 21:26:03.000	35.000	12.500009	-148.354	-104.959997	20.000000	100.245257	16000.000	28.2041	28.2041	1.000000e-30
23 Sep 2024 21:27:03.000	35.000	12.499970	-148.406	-105.012377	20.000000	100.192877	16000.000	28.1517	28.1517	1.000000e-30
23 Sep 2024 21:28:03.000	35.000	12.499933	-148.629	-105.234814	20.000000	99.970440	16000.000	27.9292	27.9292	1.000000e-30
23 Sep 2024 21:29:03.000	35.000	12.499900	-221.370	-177.976312	20.000000	27.228742	16000.000	-44.8125	-44.8125	4.967981e-01
23 Sep 2024 21:29:28.718	35.000	12.499887	-217.559	-174.205281	20.000000	30.999973	16000.000	-41.0412	-41.0412	4.949956e-01

Figura 7 Relatório do link budget da ligação descendente com filtro de condições meteorológicas e com modulação QPSK

No entanto, os valores médios de C/N₀ e Eb/N₀, mesmo oscilando, apontaram para períodos de aprimoramento na qualidade do sinal. A BER oscilou bastante, apresentando valores bastante altos em circunstâncias desfavoráveis, mas também alcançando valores próximos a zero em circunstâncias mais favoráveis, evidenciando que a comunicação oscilou entre níveis de desempenho insatisfatórios e quase perfeitos.

6.2 Comunicação de canal ascendente

Conforme apresentado na Tabela 2, foram estabelecidos os parâmetros para a conexão entre a aeronave e o satélite, levando em conta uma frequência de 14 GHz, comum na banda Ku, que possibilita a transmissão de grandes volumes de dados. A aeronave teve sua Potência Isotrópica Efetiva Radiada (EIRP) ajustada para 45 dBW, assegurando um sinal apropriado, e a velocidade de transmissão foi estabelecida em 16 Mb/s. No satélite, o quociente entre o Ganho e a Temperatura do Ruído (G/T) foi definido em 14.4 dB/K, espelhando a elevada temperatura do ruído relacionada com a observação da Terra. A capacidade do receptor de processar o sinal sem congestionamentos foi garantida pela largura de banda de 20 MHz.

Tabela 2 Parâmetros usados na simulação da ligação ascendente

Emissor	Frequência = 14 GHz	Recetor	Frequência = 14 GHz
	EIRP = 45dBW		G/T = 14.4 dB/K
	Data rate = 16Mb/s		Modulação - QPSK
			Largura de Banda - 20MHz

Analisou-se a comunicação de canal ascendente entre a aeronave e o satélite com filtro para condições desfavoráveis, como a chuva e interferências troposféricas, empregando modulação QPSK. O desempenho da ligação é crucial para avaliar a viabilidade da comunicação, levando em conta a potência emitida, a atenuação no espaço livre e o efeito das condições climatéricas.

Na Figura 8, considerou-se o filtro para condições meteorológicas desfavoráveis e modulação QPSK.

10 Oct 2024 20:37:37

Aircraft-Aircraft-Transmitter-Transmitter1-To-Satellite-STARLINK-11111_DTC_59764-Receiver-Receiver1: Link Budget

Time (UTC)	EIRP (dBW)	Rcvd. Frequency (GHz)	Rcvd. Iso. Power (dBW)	Flux Density (dBW/m ²)	g/T (dB/K)	C/N ₀ (dB*Hz)	Bandwidth (kHz)	C/N (dB)	E _b /N ₀ (dB)	BER
23 Sep 2024 23:54:40.029	45.000	14.000128	-312.793	-268.414574	14.400000	-69.793681	16000.000	-141.8349	-141.8349	5.000000e-01
23 Sep 2024 23:55:40.000	45.000	14.000072	-137.357	-92.979002	14.400000	105.641892	16000.000	33.6007	33.6007	1.000000e-30
23 Sep 2024 23:56:40.000	45.000	14.000008	-137.135	-92.756482	14.400000	105.864412	16000.000	33.8232	33.8232	1.000000e-30
23 Sep 2024 23:57:40.000	45.000	13.999944	-137.271	-92.893088	14.400000	105.727806	16000.000	33.6866	33.6866	1.000000e-30
23 Sep 2024 23:58:40.000	45.000	13.999885	-299.231	-254.872330	14.400000	-56.293836	16000.000	-128.2930	-128.2930	4.999999e-01
23 Sep 2024 23:58:55.743	45.000	13.999871	-310.701	-266.323031	14.400000	-67.702138	16000.000	-139.7433	-139.7433	4.999999e-01
24 Sep 2024 01:24:25.744	45.000	14.000335	-292.701	-248.323230	14.400000	-49.702337	16000.000	-121.7435	-121.7435	4.999999e-01
24 Sep 2024 01:25:25.000	45.000	14.000335	-136.224	-91.845651	14.400000	106.775243	16000.000	34.7340	34.7340	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:26:25.000	45.000	14.000334	-134.046	-89.667837	14.400000	108.953057	16000.000	36.9119	36.9119	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:27:25.000	45.000	14.000329	-131.163	-86.784487	14.400000	111.836406	16000.000	39.7952	39.7952	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:28:25.000	45.000	14.000306	-127.022	-82.633411	14.400000	115.987483	16000.000	43.9463	43.9463	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:29:25.000	45.000	14.000160	-121.104	-76.725685	14.400000	121.895208	16000.000	49.8540	49.8540	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:30:25.000	45.000	13.999766	-122.762	-78.383523	14.400000	120.237370	16000.000	48.1962	48.1962	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:31:25.000	45.000	13.999684	-128.335	-83.957090	14.400000	114.663804	16000.000	42.6226	42.6226	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:32:25.000	45.000	13.999669	-132.054	-87.678837	14.400000	110.945056	16000.000	38.9039	38.9039	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:33:25.000	45.000	13.999665	-134.704	-90.380619	14.400000	108.294876	16000.000	36.2537	36.2537	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:34:25.000	45.000	13.999664	-136.742	-92.364237	14.400000	106.256657	16000.000	34.2155	34.2155	1.000000e-30
24 Sep 2024 01:35:07.216	45.000	13.999665	-302.364	-257.985760	14.400000	-59.364866	16000.000	-131.4061	-131.4061	4.999999e-01

Figura 8 Link budget da ligação ascendente com filtro de condições atmosféricas e com modulação QPSK

O sistema apresentou um desempenho mais estável em relação a C/N₀, C/N e E_b/N₀, apesar dos valores negativos iniciais, e imediatamente antes do handover, indicarem uma deterioração do sinal. Novamente, a BER variou entre valores altos, indicando uma comunicação insatisfatória em determinados momentos, e valores quase nulos, sinalizando uma transmissão quase impecável.

7. CONCLUSÕES

Esta pesquisa estudou minuciosamente a interação entre satélites e avião, concentrando-se principalmente nas constelações de satélites LEO, como a Starlink, e como as condições climáticas afetam a qualidade do sinal tanto no uplink quanto no downlink. A simulação que integrou a tecnologia 5G-NR possibilitou uma análise completa de indicadores de desempenho em várias circunstâncias.

Os achados demonstram como as condições meteorológicas afetam a qualidade do link em ambas as direções de comunicação, a modulação QPSK apresentou variações significativas na flutuações iniciais e antes do handover, quando houve deterioração no sinal na BER, C/N₀ e E_b/N₀.

A análise das altitudes dos satélites LEO, MEO e GEO destaca a vantagem da proximidade dos satélites LEO na comunicação com aeronaves, apesar da necessidade de maior número de satélites e menor potência de emissão. Constelações LEO, como a Starlink, reduzem a latência, mas exigem infraestrutura robusta para garantir cobertura contínua. Já os satélites GEO, com menor necessidade de unidades para cobrir grandes áreas, enfrentam desafios de latência e demandam maior potência de emissão.

A diversidade de frequência é um método eficiente para minimizar interrupções de sinal, particularmente em bandas suscetíveis à atenuação pela chuva, como Ku e Ka. Ao transmitir em várias frequências ao mesmo tempo, os sistemas asseguram uma comunicação estável em situações meteorológicas desfavoráveis. Porém, essa estratégia requer um planejamento metucioso e pode elevar a complexidade e os gastos com infraestrutura [18].

Os algoritmos de controle de potência são essenciais para ajustar a emissão de sinal em resposta a condições atmosféricas adversas, como chuva intensa ou cintilação ionosférica. Embora eficazes para manter a qualidade da comunicação, o aumento da potência pode elevar o consumo de energia, especialmente em satélites de órbita baixa, onde os recursos são limitados [18], [20].

As técnicas de correção de erros, como RSCC, FEC e AMC, são essenciais para mitigar erros de transmissão causados por condições atmosféricas. O AMC se destaca por ajustar a modulação e codificação em tempo real, otimizando a comunicação conforme as condições do canal. No entanto, essas técnicas demandam maior capacidade computacional e podem enfrentar limitações em cenários de rápidas mudanças climáticas [19], [20].

Por fim, a implementação de conexões de satélite redundantes proporciona maior confiabilidade, particularmente em sistemas vitais como o gerenciamento do tráfego aéreo. Essas conexões de backup asseguram a continuidade da comunicação, mesmo em circunstâncias meteorológicas desfavoráveis [20].

Portanto, através da simulação, conclui-se que a seleção do tipo de modulação e a configuração do sistema de comunicação são fortemente influenciadas pelo ambiente atmosférico. O uso de modulação mais sofisticada, como o QPSK, aliado ao planejamento meticuloso da constelação de satélites, a utilização de links redundantes e modulação adaptativa, é crucial para garantir uma comunicação estável e eficiente, mesmo em condições climáticas desfavoráveis. Esta pesquisa auxilia no entendimento das variáveis que impactam as comunicações satélite-aeronave, estabelecendo uma base para futuras linhas de melhorias e progressos neste campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a AGI pela licença concedida para uso do Ansys STK e pela autorização do uso das imagens geradas no software, ao Instituto de Telecomunicações, a Universidade da Beira Interior e à FCT/MCTES que financiou este trabalho através de fundos nacionais e quando aplicável cofinanciado por fundos comunitários no âmbito do projeto com referência UIDB/EEA/50008/2020 e identificador DOI <https://doi.org/10.54499/UIDB/50008/2020>.

REFERÊNCIAS

- [1] Estações terrestres, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/93/VORTAC_TGO_Aichtal_Germany_01.JPG/1280px-VORTAC_TGO_Aichtal_Germany_01.JPG
- [2] Satélites, <https://resource.stratus.com/wp-content/uploads/civil-aviation-administration-of-chinas-air-traffic-management-bureau-01.jpg>
- [3] Camadas atmosféricas, <https://s4.static.brasilecola.uol.com.br/be/2024/01/mesosfera-camadas-atmosfera.jpg>
- [4] Clima, <https://news.viasat.com/pt-br/blog/como-o-clima-pode-afetar-as-comunicacoes-por-satelite>

- [5] M. Biscarini et al., « Weather-forecast based RMOP link-budget approach experimentation: data-transfer optimization at Ka-band with Hayabusa-2 satellite mission support », in 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, Germany: IEEE, mars 2021, p. 1-5. doi: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411369.
- [6] E. Martini, A. Freni, L. Facheris, et F. Cuccoli, « Impact of tropospheric scintillation in the Ku/K bands on the communications between two LEO satellites in a radio occultation geometry », IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 44, no 8, p. 2063-2071, août 2006, doi: 10.1109/TGRS.2006.872143.
- [7] D. A. Ogunsona, J. S. Ojo, A. G. Ashidi, et M. O. Ajewole, « Characterization of rain fade dynamics for Ku band satellite communication systems in a tropical location », J. Phys. Conf. Ser., vol. 2034, no 1, p. 012006, oct. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2034/1/012006.
- [8] A. A. Gözütok, « Assessment of Rain Attenuation in Satellite Telecommand Signals Using Numerical Weather Prediction Model and Artificial Neural Networks », in 2024 32nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Mersin, Turquie: IEEE, mai 2024, p. 1-4. doi: 10.1109/SIU61531.2024.10600755.
- [9] A. Ferdowsi et D. Whitefield, « Deep Learning for Rain Fade Prediction in Satellite Communications », 2021, arXiv. doi: 10.48550/ARXIV.2110.00695.
- [10] R. Li, J. Ning, et S. Wang, « Uplink Power Compensation of Rain Attenuation on Satellite Communication », in 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Harbin, China: IEEE, janv. 2019, p. 742-743. doi: 10.1109/ICEICT.2019.8846393.
- [11] Usha. A, « Simulation of Different Cloud Attenuation Methods », in 2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT), Trichirappalli, India: IEEE, avr. 2023, p. 1-5. doi: 10.1109/ICEEICT56924.2023.10157966.
- [12] T. E. Arijaje, T. V. Omotosho, A. P. Aizebeokhai, et S. O. Akinwumi, « Tropospheric attenuation on Satellite-aircraft propagation: A concise review », IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 665, no 1, p. 012067, mars 2021, doi: 10.1088/1755-1315/665/1/012067.
- [13] M. Nafees, S. Huang, J. Thompson, et M. Safari, « Leveraging Hybrid UAV Relays in Adverse Weather for FSO Link Capacity Maximization », in 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Austin, TX, USA: IEEE, avr. 2022, p. 178-183. doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771966.
- [14] K. Davies et E. K. Smith, « Ionospheric effects on satellite land mobile systems », IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 44, no 6, p. 24-31, déc. 2002, doi: 10.1109/MAP.2002.1167260.
- [15] V. P. Pashintsev, M. V. Peskov, N. V. Kiselev, D. A. Mikhailov, et D. V. Dukhovnyi, « Analysis of noise immunity of satellite communications under small-scale ionospheric disturbances and time-selective fading of received signals », Egypt. J. Remote Sens. Space Sci., vol. 26, no 4, p. 1036-1045, déc. 2023, doi: 10.1016/j.ejrs.2023.11.002.
- [16] S. Raghunath et D. V. Ratnam, « Detection of Low-Latitude Ionospheric Irregularities From GNSS Observations », IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., vol. 8, no 11, p. 5171-5176, nov. 2015, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2496201.
- [17] C. Y. Chen et M. J. Singh, « Comparison of tropospheric scintillation prediction models of the Indonesian climate », Earth Planets Space, vol. 66, no 1, p. 64, déc. 2014, doi: 10.1186/1880-5981-66-64.
- [18] F. Zhang, Y. Zuo, et H. Sun, « Techniques of rain fade countermeasures in Ka-band satellite communication on ships », in 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Wuzhen: IEEE, août 2017, p. 1-3. doi: 10.1109/ICOON.2017.8121382.
- [19] R. Samy et A. Mahran, « Efficient Decoding of RSCC over Ka-band Satellite Channel in Severe Weather Conditions », in 2020 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG), Cairo, Egypt: IEEE, juill. 2020, p. 203-207. doi: 10.1109/ICEENG45378.2020.9171745.

- [20] H. Liu, Y. You, L. Shi, et H. Zhang, « Multi-domain united link adaptation technique in high-throughput satellite communication system », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2469, no 1, p. 012027, mars 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2469/1/012027.
- [21] S. Chatzinotas, G. Zheng, et B. Ottersten, « Energy-efficient MMSE beamforming and power allocation in multibeam satellite systems », in 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), Pacific Grove, CA, USA: IEEE, nov. 2011, p. 1081-1085. doi: 10.1109/ACSSC.2011.6190179.
- [22] M. Khalil, « Power Optimization in Satellite Communication Using Multi-Intelligent Reflecting Surfaces », 25 octobre 2023. doi: 10.36227/techrxiv.24418207.v1.
- [23] O. B. Yahia, E. Erdogan, G. K. Kurt, I. Altunbas, et H. Yanikomeroglu, « A Weather-Dependent Hybrid RF/FSO Satellite Communication for Improved Power Efficiency », *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 11, no 3, p. 573-577, mars 2022, doi: 10.1109/LWC.2021.3136444.
- [24] T. Chaloun et al., « Electronically Steerable Antennas for Future Heterogeneous Communication Networks: Review and Perspectives », *IEEE J. Microw.*, vol. 2, no 4, p. 545-581, oct. 2022, doi: 10.1109/JMW.2022.3202626.
- [25] A. Smith, E. W. Brown, A. Gannon, et F. Merat, « Enhancing Autonomous Satellite Communication Systems with Weather-Aware Scheduling and Reconfiguration », in 2023 IEEE Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop (CCAAW), Cleveland, OH, USA: IEEE, juin 2023, p. 1-7. doi: 10.1109/CCA AW57883.2023.10219327.
- [26] A. Wrona, E. D. Santis, F. D. Priscoli, et F. G. Lavacca, « An Intelligent Ground Station Selection Algorithm in Satellite Optical Communications via Deep Learning », in 2023 31st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Limassol, Cyprus: IEEE, juin 2023, p. 493-499. doi: 10.1109/MED59994.2023.10185908.
- [27] K. A. Farrea, Z. Baig, R. Doss, et D. Liu, « Low Earth Orbit (LEO) Satellites Role in Shaping 6G Networks Amidst Emerging Threats », in 2023 IEEE Future Networks World Forum (FNWF), Baltimore, MD, USA: IEEE, nov. 2023, p. 1-8. doi: 10.1109/FNWF58287.2023.10520636.
- [28] E. S. Maddy et S. A. Boukabara, « MIIDAPS-AI: An Explainable Machine-Learning Algorithm for Infrared and Microwave Remote Sensing and Data Assimilation Preprocessing - Application to LEO and GEO Sensors », *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 14, p. 8566-8576, 2021, doi: 10.1109/JSTARS.2021.3104389.
- [29] X. Cao et X. Zhang, « SaTCP: Link-Layer Informed TCP Adaptation for Highly Dynamic LEO Satellite Networks », in IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications, New York City, NY, USA: IEEE, mai 2023, p. 1-10. doi: 10.1109/INFOCOM53939.2023.10228914.