



ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS BANDAS DE FREQUÊNCIA X E Ku COM VISTAS AO EMPREGO DO SATÉLITE GEOESTACIONÁRIO DE DEFESA E COMUNICAÇÕES ESTRATÉGICAS NOS SISTEMAS DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS DA FORÇA AÉREA BRASILEIRA

Aluno Giovanni Souza de Carvalho¹, Aluno Louise Souza Quintana¹, 1º Ten Eng Tel Rodrigo Silva Lemos², 2º Tem QOCon MFS André Luiz Braga de Carvalho¹

¹ Centro de Instrução e Adaptação da Aeronáutica

² Destacamento de Infraestrutura da Aeronáutica de Canoas

RESUMO

Atualmente, o enlace satelital utilizado no controle e no payload das Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) presentes na frota da Força Aérea Brasileira (FAB) é provido por empresas privadas estrangeiras utilizando a banda Ku. No entanto, a utilização de um satélite totalmente nacional possibilitaria, teoricamente, o enlace de comunicação mesmo em situações de conflito, garantindo a soberania do país. Considerando que o SGDC (Satélite Geostacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas) reserva a banda X para uso exclusivo das comunicações militares, esta obra tem por objetivo verificar e compreender, por meio de um estudo teórico-comparativo, as principais características da banda X e da banda Ku e os efeitos que a atmosfera provoca nessas faixas de frequências a fim de analisar a viabilidade de utilização da banda X, fornecida pelo SGDC, em substituição à banda Ku. Destarte, realizou-se uma pesquisa bibliográfica e documental, objetivando analisar as principais contribuições teóricas sobre o tema nas obras nacionais e internacionais. Observa-se que os efeitos da absorção atmosférica, bem como os da ionosfera podem ser ignorados para as faixas estudadas. Já o tamanho da antena embarcada na ARP deve ser maior para a banda X do que para a banda Ku, o que representa um fator desfavorável a sua utilização, já que pode, dentre outros fatores, elevar o custo de operação. No entanto, a atenuação por chuva, que está intimamente ligada à disponibilidade do enlace satelital, é menor na banda X, promovendo uma vantagem significativa, especialmente nas áreas com elevado índice de precipitação, como a região Norte do Brasil. Desse modo, apesar do presente estudo não esgotar o tema, aponta maior benefício na utilização da banda X.

Palavras-chave: Aeronave remotamente pilotada. Comunicação por Satélite. Banda X. Banda Ku.

ABSTRACT

The satellite link currently used in the control and payload of Remotely Piloted Aircraft (RPA) that comprise the Brazilian Air Force (FAB) fleet is provided by foreign private companies through the employment of a Ku band. However, the use of a fully national satellite would, theoretically, make the communication link possible even in conflict situations, which would guarantee the sovereignty of the country. Taking into account that the Geostationary Defense Satellite and Strategic Communications (SGDC) reserves the X band for the exclusive use of military communications, this work aims at analyzing the main characteristics of both the X band and the Ku band, and the effects of the atmosphere on these frequency bands by carrying out a theoretical-comparative study. In doing so, we search to verify the feasibility of using the X band, established by SGDC, in replacement of the Ku band. Thus, a bibliographic and documentary research was carried out to find out the main theoretical contributions on the theme in national and international work. The findings have demonstrated that the effects of atmospheric absorption, as well as those of the ionosphere, can be ignored for the studied ranges. As per the size of the antenna embedded in the ARP, it should be larger for the X band than for the Ku band, which represents an unfavorable factor against its use, since it can increase operating costs, among other factors. However, rain attenuation, which is closely linked to the availability of the satellite link, is lower for the X band, which shows a significant advantage, especially in areas with a high rainfall rate, such as the northern region of Brazil. Thus, although the present study does not mean to exhaust the topic, the results point to a greater advantage for the X band use instead of the Ku band use.

Keywords: Remotely piloted aircraft. Satellite communication. X Band. Ku Band.

1. INTRODUÇÃO

Visando resgatar a autonomia e a soberania do Brasil em suas comunicações via satélite, perdidas desde a privatização da Embratel, o Estado Brasileiro, em 2012, por meio da empresa Visiona Tecnologia Espacial S.A., uma parceria público-privada, iniciou o projeto de aquisição do primeiro satélite nacional, denominado: Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas (SGDC) (DEMENICIS, 2018).

O SGDC passou efetivamente a integrar o Sistema de Comunicações Militares por Satélite (SISCOMIS) em 30 de junho de 2017 e des-

tinou a faixa de frequência, denominada banda X, para uso nas comunicações militares (DEMENICIS, 2018).

Durante a comunicação entre uma estação terrestre e o satélite, o sinal trafega sob a ação da atmosfera, que é responsável por produzir perdas e degradação (MARAL; BOUSQUET, 2009). Diante disso, a frequência de operação é fator determinante a ser considerado em projetos de enlace de comunicação por satélite, pois esse parâmetro está diretamente associado aos efeitos da atmosfera na degradação do sinal (IPPOLITO, 2008).



O presente trabalho tem como propósito levantar e compreender as principais características da banda X e da banda Ku e os efeitos que a atmosfera provoca em sinais que utilizam essas frequências nas comunicações via satélite a fim de avaliar, por meio de um estudo teórico-comparativo, a possibilidade de empregar a banda X em substituição à banda Ku nos sistemas de controle e carga útil (payload) de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) da Força Aérea Brasileira (FAB). Atualmente esse enlace é provido por link contratado de empresas privadas, no entanto, a comunicação a partir de um satélite nacional possibilitaria melhor interação entre os níveis estratégico, operacional e tático, indispensável à Segurança Nacional.

Além disso, uma ARP controlada por um enlace de comunicação provido pelo SGDC permitiria alto grau de sigilo e segurança na troca de dados. De acordo com Amaral *et al* (2017), em um cenário de guerra eletrônica com ataques cibernéticos é importante possuir um *link* de comunicação entre aeronaves remotamente pilotadas e um satélite nacional, visto que isso proporciona segurança às comunicações ao garantir confidencialidade, disponibilidade, autenticidade e integridade da informação e das comunicações.

Sendo assim, a metodologia empregada neste estudo é descritiva e exploratória, uma vez

que busca descrever e obter mais informações sobre as características dos enlaces de comunicação por satélite em duas faixas de frequência pré-definidas. No que tange ao procedimento técnico, a pesquisa é bibliográfica e documental, objetivando conhecer e analisar as principais contribuições teóricas sobre o assunto por meio de uma revisão narrativa em obras nacionais e internacionais. Já a abordagem do trabalho é qualitativa, pois busca fazer uma comparação entre duas tecnologias.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de comunicação por satélite

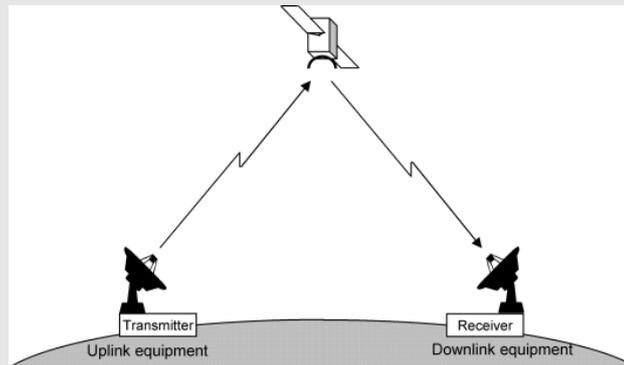
O satélite é parte essencial da telecomunicação no mundo, pois possui algumas características difíceis de encontrar em outros meios de comunicação. Uma delas é a grande área de cobertura e a capacidade de estabelecer um *link* de comunicação entre muitos usuários simultaneamente, que podem estar separados geograficamente por grandes distâncias (RODDY, 2006).

Um sistema de comunicações por satélite é formado basicamente pelo satélite e pelas estações rádio de origem e destino de informações, denominadas de Estações Terrestres. O satélite recebe um sinal de uma estação transmissora,

amplifica, processa e transmite de volta à Terra para recepção por uma ou mais estações receptoras terrestres (Figura 1). O sinal original transmitido para o satélite é chamado de *uplink*,

e o sinal retransmitido do satélite para as estações receptoras terrestres é chamado de *downlink*.

Figura 1 - Sistema de comunicação por satélite



Fonte: Braun (2012, p.2)

Em muitos sistemas, as estações não têm energia suficiente para se comunicar, via satélite, diretamente com outra. Dessa forma, é necessário utilizar de uma estação terrestre especial, o *Hub*, com uma antena maior e de alto ganho para retransmitir o tráfego entre as estações (TANENBAUM; WETHERALL, 2011). No Ministério da Defesa, os enlaces, de preferência, devem ser estabelecidos por meio das Estações Terrestres de Brasília (ECB) e do Rio de Janeiro (ECJ).

Destarte, conclui-se que um satélite de comunicação (SATCOM) nada mais é que uma estação rádio repetidora no espaço que é empregado em diversos serviços de comunicações, tais como transmissões de televisão, telefonia móvel ou fixa, tráfego de dados corporativos,

internet, comunicações militares etc. (MEDEIROS, 2007).

2.2 SISCOMIS

Os satélites de comunicação no Ministério da Defesa estão implantados no SISCOMIS (Sistema de Comunicações Militares por Satélite) que é o principal canal de comunicação de dados militares operacionais e é parte integrante do SISMIC² (Sistema Militar de Comando e Controle). De acordo com a Doutrina para o Sistema Militar de Comando e Controle (BRASIL, 2015, p. 32), o SISCOMIS é “uma infraestrutura de Tecnologia da Informação (TI) completa para enlaces digitais, por meio de satélites de comunicação geostacionários, constando de um segmento terrestre e um segmento espacial”. Sua criação objetivou prover comunicações de voz e dados



entre os Centros de Comando e Controle das três Forças Armadas Brasileiras, visando garantir a interoperabilidade e a integração, especialmente nas missões conjuntas. É, portanto, o principal canal de comunicação para o atendimento dos interesses do Ministério da Defesa (BRASIL, 2016).

No SISCOMIS, as estações terrenas estão interligadas pela topologia em estrela, que permite o enlace via satélite de todos os terminais satelitais através do *Hub*, que atua como um *gateway*¹ de rede, onde serviços diversos são providos ao sistema, tais como telefonia, serviços web e as *intranets* das três Forças (INTRAER - Aeronáutica, EBNET - Exército e RECIM - Marinha) (BRASIL, 2016).

2.3 Satélite geoestacionário de defesa e comunicações estratégicas

O Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas (SGDC), um projeto estratégico nacional de caráter dual, emprega a banda Ka para aplicações civis e a banda X para aplicações militares. Foi fabricado pelo consórcio *Thales Alenia Space* (TAS) nas cidades de

Cannes e Toulouse na França, que venceu uma seleção internacional de fornecedores organizada pela Visiona Tecnologia Espacial S.A., uma *joint venture*² entre a EMBRAER (51%) e TELEBRAS (49%), que atua como empresa integradora do projeto SGDC (DEMENICIS, 2018).

Segundo a empresa Visiona Tecnologia Espacial, o SGDC foi construído na plataforma modelo *Spacebus* 4000 C4 e apresenta peso de 5,8 t, 7 m de altura e 37 m de envergadura, potência de 11 KW e vida útil estimada de 18 anos. Apresenta seis refletores parabólicos das antenas utilizadas para comunicações nas bandas X e Ka e apresenta cobertura nacional para ambas as faixas de frequência.

De acordo com Alves (2017 *apud* DEMENICIS, 2018), o SGDC tem como um dos seus objetivos principais fornecer um meio seguro e soberano para as comunicações estratégicas do governo brasileiro e atender às demandas do Ministério da Defesa.

¹ Estação terrena que possibilita o tráfego de telecomunicações entre a estação espacial e redes de telecomunicações, de forma integrada, por meio de enlaces de alimentação (ANATEL, 2020).

² Refere-se a um tipo de associação em que duas entidades se unem para explorar alguma atividade, por um tempo limitado, sem que percam a identidade própria (WOLFFENBÜTTEL. A, 2006).

2.3.1 Frequências de Operação

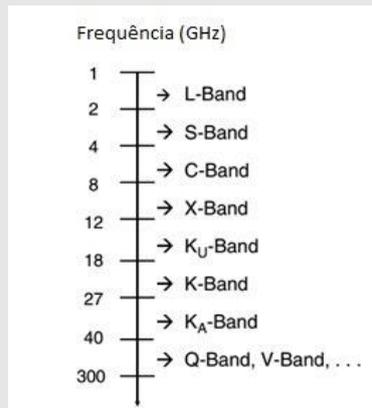
A comunicação via satélite é feita a partir do tráfego de ondas de rádio pela atmosfera. A frequência desse sinal é fator determinante a ser considerado em projetos de enlace de comunicação por satélite, pois esse parâmetro está diretamente associado com os efeitos da atmosfera na degradação do sinal (IPPOLITO, 2008).

As designações de bandas por letras dividem o espectro de 1 a 300 GHz em oito bandas com faixas de frequências nominais, conforme

figura 2. No Brasil, a utilização do espectro eletromagnético é regulada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) em concordância com as normas da União Internacional de Telecomunicações (ITU).

A comunicação por satélite utiliza a faixa de frequência de 30 MHz até aproximadamente 40 GHz. Abaixo de 30 MHz e acima de 40 GHz os sinais, ao atravessarem a atmosfera, sofrem diversos tipos de degradação, o que torna seu uso inviável (MIRANDA, 2012).

Figura 2 -Bandas de frequências



Fonte: Adaptado de Ippolito (2008, p.13)

De acordo com Maral e Bousquet (2009), a banda K é ainda dividida em uma banda inferior e superior, respectivamente: banda Ku e banda Ka. A banda Ku é a principal banda utilizada atualmente para serviços de *broadcasting*,³ entretanto a banda Ka tem despertado grande interesse devido à largura de banda disponível e por

sofrer menor interferência. Já a banda X tem sua faixa do espectro eletromagnético situada de 8 a 12 GHz e é reservada, mediante acordo entre organizações, para uso militar e governamental nas comunicações via satélite.

2.3.2 Efeitos da atmosfera na propagação de ondas de rádio

Durante a comunicação entre uma esta-

³Serviços de radiodifusão. (ANATEL, 2020).

ção terrestre e o satélite, o sinal trafega sob a ação da atmosfera, que é responsável por produzir perdas e degradação. Cada tipo de molécula atmosférica absorve energia em determinadas regiões do espectro eletromagnético. Para a faixa de frequência de 1 a 30 GHz somente duas regiões da atmosfera exercem influência: a troposfera e a ionosfera (MARAL; BOUSQUET, 2009).

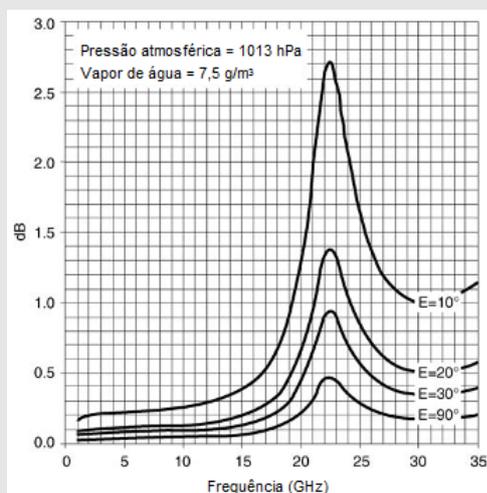
Segundo Ippolito (2008), a frequência da onda eletromagnética é fator crítico e determinante quando se trata dos efeitos da atmosfera na propagação de sinais e as perdas são particularmente significativas nas frequências acima de 10 GHz.

2.3.3 Absorção atmosférica

As perdas que ocorrem em virtude da absorção de energia pelos gases da atmosfera

terrestre são chamadas de perdas por absorção atmosférica (RODDY, 2006). De acordo com Ippolito (2008), a interação entre os constituintes gasosos e as ondas de rádio promove a absorção molecular, que é responsável por reduzir a amplitude do sinal transmitido. É importante destacar que a atenuação, devido aos gases da atmosfera, depende da frequência do sinal, do ângulo de elevação da antena terrestre, da altitude da estação terrestre e da concentração de vapor de água (MARAL; BOUSQUET, 2009). O gráfico 1 exibe o nível de atenuação devido aos gases atmosféricos em função da frequência do sinal e do ângulo de elevação (E) da antena para uma atmosfera padrão. Por ele, pode-se verificar que a perda é praticamente insignificante em frequências abaixo de 10 GHz.

Gráfico 1 - Perda por absorção da atmosfera



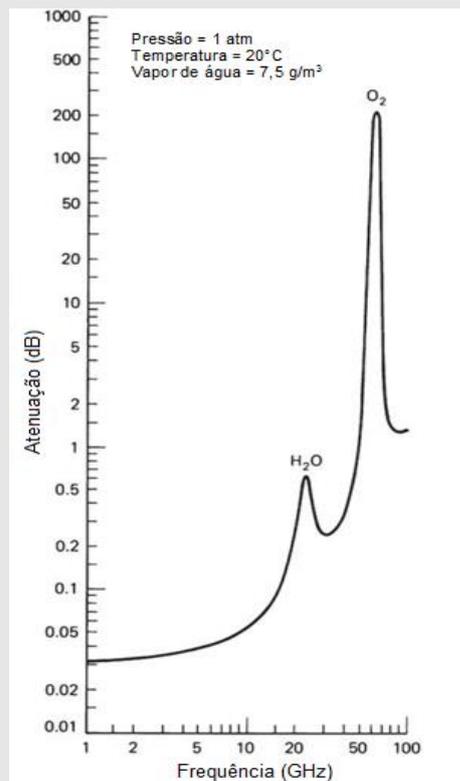
Fonte: Adaptado de Maral e Bousquet (2009, p. 207)

Segundo Ippolito (2008), para as frequências utilizadas nas comunicações via satélite, apenas o oxigênio e o vapor de água podem provocar perdas significativas.

O gráfico 2 considera uma incidência vertical do sinal, ou seja, a antena terrestre a 90° em relação ao solo. Analisando-o, conclui-se que a degradação do sinal será maior ou menor de acordo com a frequência utilizada na comunicação. Ademais, existem apenas dois picos de absorção de destaque quanto à atenuação: um

em torno de 22.3 GHz provocado pelo vapor de água (H₂O) e outro próximo de 60 GHz produzido pelo gás oxigênio (O₂), motivo pelo qual essas frequências não costumam ser utilizadas nos enlaces satélite-estação terrena. As frequências distantes desses picos apresentam baixas perdas. Segundo Miranda (2012), no Brasil, a atenuação por gases atmosféricos na banda Ku pode ser ignorada nos cálculos dos projetos de enlace em radiofrequência.

Gráfico 2 - Atenuação pelos gases da atmosfera



Fonte: Adaptado de Roddy (2006, p. 106)

De acordo com a recomendação da União Internacional de Telecomunicações, ITU-R

P.618-13, a atenuação por gases atmosféricos em sinais com frequências abaixo de 10 GHz,



normalmente, pode ser negligenciada. Sua importância aumenta em frequências acima de 10 GHz, especialmente para ângulos de elevação baixos.

2.3.4 Efeitos da ionosfera

De acordo com Roddy (2006), a ionosfera, camada da atmosfera caracterizada por ser ionizada pela radiação solar, é responsável pelos efeitos de cintilação, absorção, dispersão, mudança de frequência, atraso na propagação e rotação de polarização, esse último também conhecido como rotação de Faraday. Roddy (2006) também cita que todos esses efeitos diminuem à medida que a frequência do sinal aumenta, entretanto ele destaca apenas os efeitos da cintilação e da rotação de polarização como preocupantes para a comunicação via satélite.

A onda eletromagnética, ao se propagar pela ionosfera, sofre uma rotação nos vetores de campo elétrico e magnético que altera a polarização da onda, esse efeito é chamado de Rotação de Faraday. Esse efeito é gerado pela interação da onda com os elétrons da ionosfera sob a presença do campo magnético da Terra. O ângulo de rotação de Faraday é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e não é considerado um problema sério para frequências

acima de 10 GHz. (RODDY, 2006).

A cintilação ionosférica representa rápidas variações na amplitude e fase dos sinais de ondas de rádio provocadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera e seu efeito principal é o desvanecimento do sinal. Em termos práticos, a intensidade do sinal pode ficar abaixo do limiar de aceitação dos receptores, ou seja, uma variação significativa no nível de amplitude ou fase do sinal de satélite pode tornar indisponível qualquer sistema envolvido na comunicação.

Os efeitos da cintilação são mais intensos após o pôr do sol nas regiões equatoriais do planeta e de altas latitudes, podendo ter duração de 30 minutos a várias horas (IPPOLITO, 2008).

Segundo Mendonça (2013), as interrupções da comunicação provocadas pelos efeitos da cintilação ionosférica já foram observados em sinais que variam de 20 MHz até 10 GHz, abrangendo praticamente todo o espectro de frequências utilizadas nas telecomunicações, sendo mais comum em sinais de até 3 GHz. Ademais, Ippolito (2008) cita que esses efeitos são mais observados em enlaces na faixa de 30 MHz a 7 GHz.

2.3.5 Atenuação por chuva

Os efeitos predominantes que incidem sobre as ondas eletromagnéticas são a absorção e a despolarização causados pela precipitação que ocorre na troposfera, sendo particularmente mais significativos para frequências maiores que 10 GHz (MARAL; BOUSQUET, 2009).

Segundo Flainville (2008), a atenuação por chuva é um fenômeno extremamente grave quando se fala em comunicações que operam nessas frequências, podendo interromper um enlace de comunicação por intervalo de tempo considerável, o que não é aceitável quando se controla uma aeronave remotamente pilotada. O efeito é sobretudo mais severo em regiões de climas tropicais e equatoriais, característicos do Brasil, nos quais o regime de chuva é intenso, particularmente, nos meses de verão.

A atenuação por chuvas é devida à absorção e espalhamento da energia propagante pelas partículas de água. As gotas de chuva comportam-se como um meio dielétrico dissipativo e refletor para o campo elétrico incidente, absorvendo energia ou espalhando-a em diversas direções. A absorção corresponde à dissipação térmica, sendo função da condutividade da água. O espalhamento está associado às múltiplas reflexões da onda, de modo a satisfazer as condições de contorno sobre cada gota (FELIX, 2004, p. 43).

Essa absorção e espalhamento do sinal pelas gotas de chuva, resultam numa redução da amplitude do sinal transmitido o que pode degradar a disponibilidade, a confiabilidade e o

desempenho de um enlace de comunicação. Os efeitos da chuva dependem da frequência, volume de chuva, distribuição do tamanho da gota e de sua forma e do ângulo de elevação da antena (conforme demonstrado no gráfico 3).

O sinal transmitido em determinada frequência e potência, ao atravessar um volume uniformemente distribuído de chuva, sofre um nível de atenuação específico. As moléculas de água das gotas de chuva absorvem porções da energia da onda eletromagnética que passa através delas. Quanto menor o comprimento de onda, mais interação e, conseqüentemente, mais susceptibilidade a perda de energia. Há ainda o espalhamento, que é o fenômeno físico causado tanto pela refração, como pela difração, que desvia a onda eletromagnética do seu caminho original, impedindo que alcance os locais esperados.

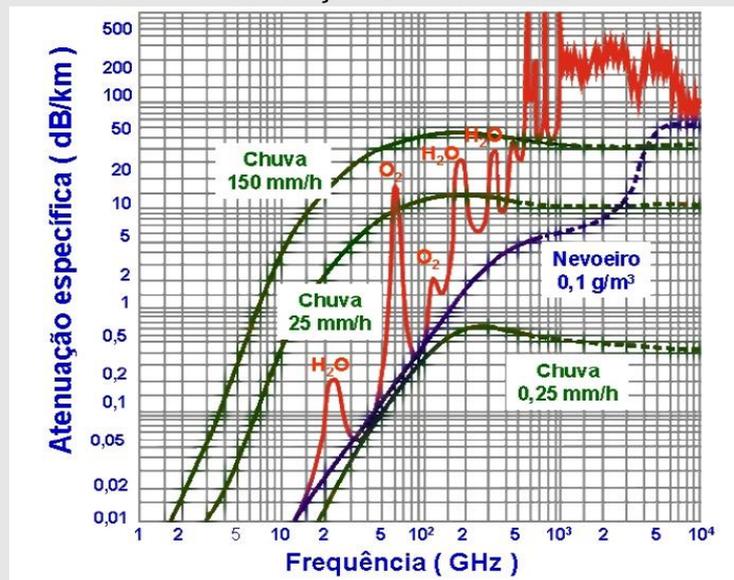
O gráfico 3 apresenta a atenuação provocada por hidrometeoros e por gases atmosféricos. Ao analisá-lo, identificamos que a atenuação é fortemente dependente da taxa de precipitação e ela aumenta rapidamente à medida que a frequência do sinal se eleva. Quando a frequência de um sinal aumenta, seu comprimento de onda diminui e se aproxima do tamanho das gotas de chuva. Nessa situação, produz-se aumento da perda do sinal pela presença da

chuva em um enlace.

De acordo com Roddy (2006) a atenuação por chuva está em função da taxa de precipitação e o cálculo da atenuação específica, devido a chuva, é baseado na equação 1, em que γ_R é a atenuação específica em dB/Km e os parâmetros k e α dependem da frequência e da polarização da onda eletromagnética. O cálculo

dos valores de k_H , k_V , α_H e α_V (o subscrito H e V referem-se a polarizações horizontal e vertical respectivamente) é fornecido pela Recomendação ITU-R P.838-3. $R_{0,01}$ é a taxa de precipitação em mm/h. A intensidade da precipitação é medida através da taxa de queda da chuva R_p expressa em mm/h.

Gráfico 3 - Atenuação devido à hidrometeoros



Fonte: Flainville (2008, p.19)

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^\alpha \quad (\text{Equação 1})$$

A estatística de precipitação temporal é obtida através da distribuição da probabilidade cumulativa, a qual indica a porcentagem de tempo no ano $p(\%)$ durante o qual um dado valor da taxa de queda da chuva R_p (mm/h) é excedido (usualmente o valor adotado em uma análise é de $p = 0,01\%$, o que corresponde a aproximadamente 53 minutos por ano (SILVA; CHAMON, 2004, p. 17).

Segundo Espejo (2016), quando não é possível adquirir os dados da taxa de precipitação local, seria uma boa solução utilizar valores previamente elaborados como os indicados pela recomendação ITU-R P.837-6, figura 3. Essa recomendação apresenta um método de estimativa

da taxa de precipitação pontual a partir da extrapolação de medidas de precipitação acumulada em todo o mundo.

2.3.6 Disponibilidade em Frequência

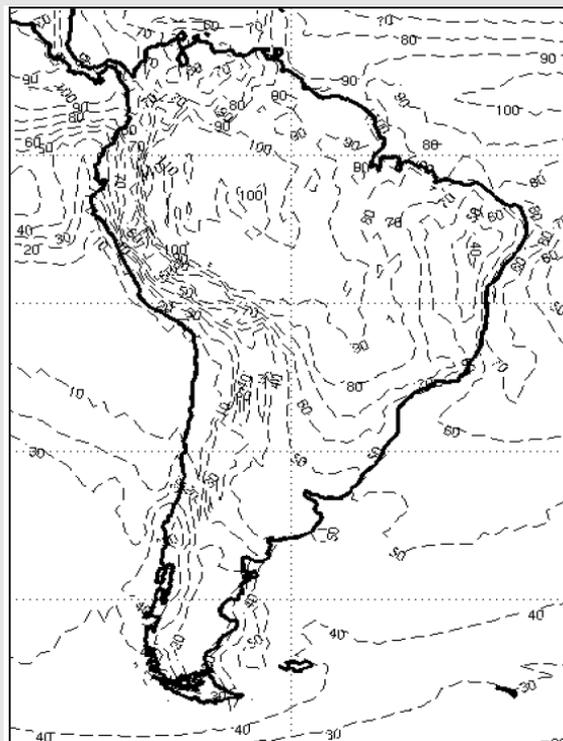
Os recursos oferecidos pelo sistema satelital conjuntamente com aeronaves remotamente pilotadas são, sem dúvida, uma evolução da tecnologia para as mais diversas utilidades. No entanto, especialmente em um cenário de conflito, é essencial ter a certeza de que os serviços ofertados pelo sistema supracitado estejam disponíveis quando requeridos. Nesse sentido, o conceito de disponibilidade do enlace de comu-

nicação se torna extremamente relevante.

A disponibilidade pode ser definida como a taxa percentual em que o enlace deve permanecer ativo em um período de um ano. Assim, uma taxa de disponibilidade de 99,5% representa que o sistema esteve indisponível durante aproximadamente 43 h no ano. Quanto maior a disponibilidade de um sistema, maior é a sua confiabilidade (PIEDAD; HAWKINS, 2001).

Em comunicações via satélite, um dos principais fatores que prejudicam o enlace é a atenuação por chuva, extremamente relevante para bandas de frequências superiores a 10 GHz.

Figura 3 - Mapa da taxa de precipitação excedida durante 0,01 % do tempo na América do Sul



Fonte: Recomendação ITU-R P.837-6 (2013, p.6)

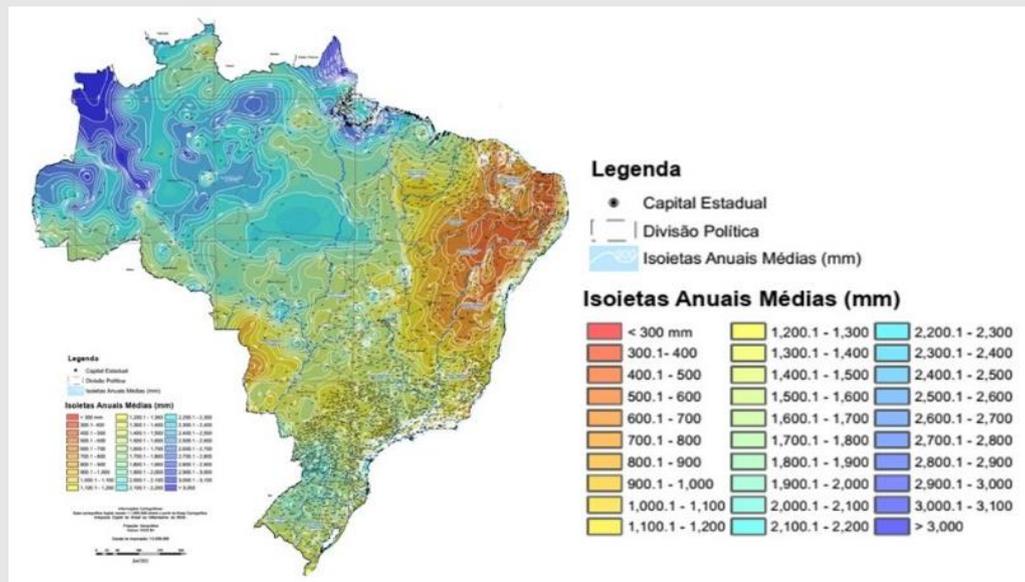
Nas regiões tropicais e equatoriais, a taxa pluviométrica varia entre 95 e 145 [mm/h], enquanto em regiões de clima temperado, os valores se encontram entre 19 e 42 [mm/h], podendo-se concluir que as operações em banda Ku utilizando coberturas globais em regiões com maiores índices de precipitação são bastante afetadas (MARINS, 2004).

Conforme pode ser observado na figura 4, a região Norte possui um índice médio de preci-

pituação, muito maior que a Nordeste. Tal fato produz atenuação por chuva mais elevada naquela região do que nessa para frequências na banda Ku. Já a banda X, por pertencer a uma faixa inferior no espectro eletromagnético, 8 - 12 GHz, sofre menos com seu efeito.

Por tudo isso, é possível inferir, considerando apenas o aspecto atenuação por chuva, que a disponibilidade em banda X será maior que em banda Ku.

Figura 4: Isoietas Anuais Médias no Brasil no período de 1977 a 2006



Fonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM(2011) – Adaptado

3 SISTEMA DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (SARP)

O Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (SARP), em inglês, Remotely Piloted

Aircraft System (RPAS) é uma vertente de um sistema mais abrangente conhecido como Unmanned Aircraft Systems (UAS) ou Sistema de Aeronave Não Tripulada.

O UAS engloba três categorias de aeronaves: as autônomas, que não permitem a intervenção do piloto após o início do voo; os aeromodelos, que exigem o controle humano, mas são utilizados para fins recreativos e as aeronaves remotamente pilotadas, as quais integram o RPAS e, por adentrarem o espaço aéreo, estão submetidas a regras específicas, devendo interagir em tempo real com o Controle de Tráfego Aéreo e outras aeronaves (BRASIL, 2020a).

Assim, o RPAS é composto basicamente pela aeronave ARP, a qual pode ser equipada com uma carga útil (payload), a(s) estação(ões) de pilotagem remota, o enlace de pilotagem e qualquer outro componente associado à operação do sistema (BRASIL, 2020b).

As ARPs podem ser de asas fixas, rotativas ou híbridas. Segundo Austin (2010), sua tarefa precípua é transportar a carga útil da missão, que representa todo componente embarcado desempenhando uma função específica, não relacionada ao controle da aeronave. Podem ser sensores dos mais variados modelos, cargas letais, dentre outros. No entanto, a aeronave também precisa transportar os subsistemas necessários para operá-la, que incluem o link de comunicação, o equipamento de estabilização e controle, o combustível, as fontes de energia elétrica, além de mecanismos básicos para que,

após seu lançamento, possa ser recuperada.

Já a estação de pilotagem remota pode ser fixa ou móvel e possui a função de realizar a interface entre o operador e a ARP. Por meio dela, o piloto deve ter total condição de controlar e monitorar o voo tanto em solo como no ar (BRASIL, 2020a).

O enlace de pilotagem, também denominado link de Comando e Controle (Link C2) é o responsável por estabelecer o controle e o gerenciamento da aeronave, além de receber dela informações indispensáveis ao seu gerenciamento, ao que se denomina telemetria. Os dados transmitidos da estação remota para a aeronave são denominados uplink; da aeronave para a estação, downlink (BRASIL, 2020a).

Por fim, os componentes associados representam todo sistema que promove o suporte aos diversos tipos de missões, podendo ser sistemas de comunicação com órgãos de serviços de tráfego aéreo (ATS), sistema de vigilância, dentre outros possíveis (BRASIL, 2020a).

Na FAB, as ARPs são operadas pelo Esquadrão Hórus, localizado na ALA 4, em Santa Maria (RS). Sua frota é composta pelas aeronaves Hermes 450 e Hermes 900. A primeira, opera apenas em linha de visada, ou seja, a antena em solo deve estabelecer um link ponto a ponto com a aeronave. Já a segunda, é equipada para



operar tanto em linha de visada como por meio de enlace satelital e, portanto, são objeto das análises comparativas desta obra.

4 RELAÇÃO ENTRE FREQUÊNCIA E O TAMANHO DA ANTENA EMBARCADA EM UMA ARP

Segundo Nohra (2020), a escolha da banda de frequência a ser utilizada no enlace satelital impacta diretamente nas dimensões e no peso das antenas embarcadas nas aeronaves remotamente pilotadas. A parabólica é o tipo de antena responsável pelo enlace de comunicação SATCOM em sistemas de aeronaves remotamente pilotadas.

Esse tipo de antena possui como princi-

pal característica concentrar a energia proveniente do satélite em um único ponto, denominado foco. Elas convergem os feixes irradiados em uma direção principal, o que eleva a diretividade e o ganho da antena. A diretividade é a propriedade das antenas que representa sua capacidade de irradiar mais fortemente em algumas direções do que em outras. Já o ganho (G) representa a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção e a intensidade de radiação de uma antena isotrópica³ para uma mesma potência irradiada, e também pode ser expresso pela equação 2. Considerando uma eficiência de 55 %, e um ganho fixo de 35 dBi, valores típicos de uma antena parabólica, tem-se, conforme Medeiros (2007), a seguinte equação:

$$G = 17,8 + 20 \log(F \cdot D) \text{ (Equação 2)}$$

Em que a frequência (F) é dada em GHz e o diâmetro (D), em metro.

De acordo com a Tabela 1 é possível observar que, para o mesmo ganho, frequências menores de operação exigem um diâmetro de antena maior. Tal fator influencia diretamente no peso a bordo nas aeronaves remotamente pilo-

tadas e, conseqüentemente, nos custos de fabricação da plataforma, no gasto de combustível, na potência dos motores, dentre outras variáveis (VALAVANIS; VACHTSEVANOS, 2015).

Tabela 1 - Relação entre a frequência e o diâmetro da antena

Banda	F (GHz)	D (m)
X	8	0,90554495
	9	0,80492884
	10	0,72443596
	11	0,65857815
Ku	12	0,60369663
	13	0,55725843
	14	0,51745426
	15	0,48295731
	16	0,45277248
	17	0,42613881

Fonte: Os autores

4.1 Comparação entre as bandas X e Ku

Como já visto, para sistemas de satélite operando acima de 10 GHz, a precipitação é o principal efeito que causa perda considerável de sinal. Outrossim, é sabido que a atenuação aumenta com a taxa de precipitação e a frequência do sinal.

Diante disso, com o propósito de fazer um estudo comparativo do impacto da atenuação por chuva entre as bandas de frequência X e Ku, utilizamos o fator de atenuação (atenuação específica) por chuva que é dado pela equação 1 para construir a tabela 2, que indica a atenuação em função da frequência e da taxa pluviométrica.

Ao analisar a tabela 2, pode-se depreender que à medida que a frequência se eleva o fator de atenuação torna-se que cada vez mais

alto. Os valores apresentados são para as frequências das bandas X e Ku, considerando uma polarização horizontal do sinal e para taxas pluviométricas de 30 mm/h, 60 mm/h, 80 mm/h, 100 mm/h as quais foram selecionadas de acordo com a recomendação ITU-R P.837-6. Os valores k_H , α_H foram extraídos das recomendações ITU-R P.838-3.

Depreende-se que na banda Ku o fator de atenuação (γ_R) é muito mais alto se comparado com a banda X. Além disso, é fortemente afetada à medida que a intensidade da chuva aumenta. Isso demonstra uma grande desvantagem dos sistemas que utilizam da faixa de frequência Ku localizados em regiões com clima tropical e equatorial como o Brasil.

O gráfico 4 mostra a atenuação específica para diferentes taxas de precipitação, tendo como base os dados da tabela 2. Podemos con-

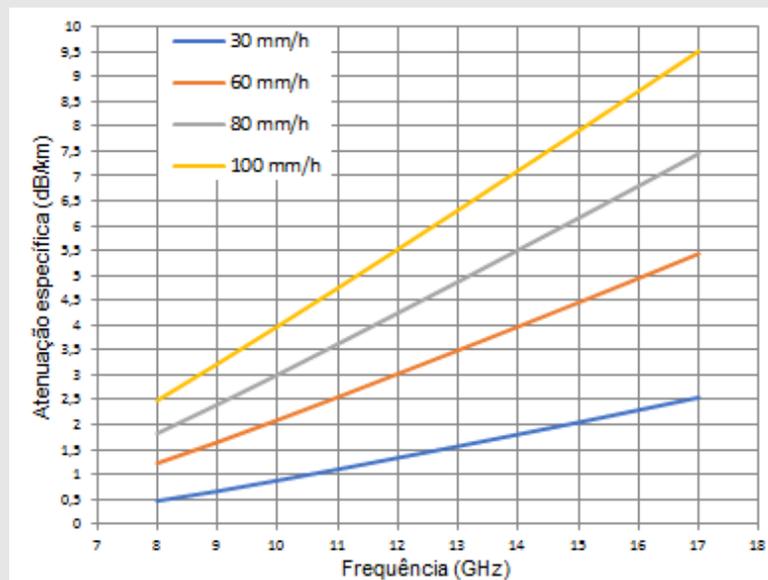
cluído de modo geral que a taxa de precipitação impacta diretamente na atenuação do sinal. E esse impacto é tanto maior quanto maior a frequência do sinal.

Tabela 2 - Atenuação específica em função das bandas X e Ku

Banda	F (GHz)	k_H	α_H	γ_{30} (dB/Km)	γ_{60} (dB/Km)	γ_{80} (dB/Km)	γ_{100} (dB/Km)
X	8	0,00412	1,3905	0,46591527	1,221487855	1,822285697	2,48524861
	9	0,00754	1,3155	0,66105298	1,645285334	2,402139001	3,221686347
	10	0,01217	1,2571	0,87534591	2,092206346	3,003758418	3,976404698
	11	0,01772	1,2140	1,10075057	2,553520422	3,620886918	4,747486272
Ku	12	0,02386	1,1825	1,33157712	3,022277187	4,246922628	5,529303635
	13	0,03041	1,1586	1,56462082	3,492870296	4,874571883	6,312718452
	14	0,03738	1,1396	1,80287941	3,972102638	5,513160631	7,109503904
	15	0,04481	1,1233	2,04467953	4,454225947	6,153411039	7,906330121
	16	0,05282	1,1086	2,29263554	4,943754237	6,800861906	8,709603749
	17	0,06146	1,0949	2,54620061	5,438640594	7,452221978	9,514644275

Fonte: Os autores.

Gráfico 4 - Atenuação chuvas com diferentes taxas de precipitação.



Fonte: Os autores

A atmosfera é responsável por produzir perdas e degradação em um enlace de comunicação via satélite e a atenuação em virtude da chuva é um dos principais aspectos a ser analisado quando se pretende estabelecer um enlace de comunicação em frequências muito altas. Isso, como pôde ser analisado matematicamente acima, em razão da susceptibilidade a perda de energia dos sinais com menores comprimentos de onda em cenários com altas taxas de precipitação.

Além da atenuação por chuva, o presente estudo abordou outros efeitos provocados pela ação da atmosférica que são importantes de serem analisados e comparados diretamente entre a banda X e a banda Ku a fim de identificar quais desses parâmetros causam maior impacto nos sinais que se utilizam dessas frequências. A tabela 3 apresenta alguns parâmetros comparativos entre enlaces que utilizam as frequências da banda X e da banda Ku.

Tabela 3 - Banda X versus Banda Ku

Parâmetro	Banda X	Banda Ku
Absorção atmosférica	menor	maior
Atenuação por chuva	menor	maior
Disponibilidade	maior	menor
Efeitos da ionosfera	maior	menor
Tamanho da antena	maior	menor

Fonte: Os autores

As perdas por absorção atmosférica são praticamente insignificantes em frequências abaixo de 10 GHz. Entretanto, a partir dessa frequência observa-se aumento gradual da atenuação do sinal ao se elevar a frequência. Dessa forma, conclui-se que as perdas por absorção na banda Ku são maiores que na banda X. Todavia, as perdas na faixa de frequência da banda Ku são bastante moderadas e podem ser negligenciadas nos cálculos de enlace bem como as

frequências na banda X, conforme tratado no item 2.1.

A disponibilidade do enlace de comunicação via satélite está diretamente relacionada aos danos provocados pela atenuação por chuva, que é um dos principais efeitos que degradam o sinal. Sendo assim, concluímos que: se a banda X sofre menores perdas em razão da ação da chuva em comparação com a banda Ku, a disponibilidade daquela será maior do que desta.



Quanto aos efeitos da ionosfera, Roddy (2006) cita que eles diminuem à medida que a frequência do sinal aumenta e não representam um problema sério para frequências acima de 10 GHz. Outrossim, Ippolito (2008) destaca que esses efeitos são mais observados em enlaces na faixa de 30 MHz a 7 GHz. Portanto, inferimos que os efeitos da ionosfera são maiores na banda X do que na banda Ku.

Visto que a atmosfera terrestre é responsável pelas principais perdas e degradação dos sinais de radiofrequência, o presente estudo comparativo entre as bandas X e Ku tem como destaque os impactos que ela provoca nas referidas frequências. Entretanto, quando se trata do emprego de determinada faixa de frequência no controle de uma aeronave remotamente pilotada por enlace via satélite, o diâmetro da antena é fator determinante. Isso devido à limitação de tamanho imposta por projeto, bem como custos com combustível e potência exigida pelos motores.

Nesse aspecto, a banda Ku apresenta vantagem sobre a banda X uma vez que, para frequências maiores de operação, utilizam-se antenas de menor diâmetro o que pode ser decisivo para a escolha de uma banda em detrimento da outra.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabe-se que o SGDC é um projeto de extrema relevância para a Força Aérea Brasileira. Dentre as principais vantagens dessa nova tecnologia, cita-se a soberania das comunicações militares, fator essencial para a Defesa de uma nação. Do mesmo modo, o RPAS tem despendido nas maiores potências mundiais como um grande aliado nas mais diversas áreas, desde o uso na agricultura à presença determinante em conflitos bélicos.

Considerando essas informações e sabendo que a atmosfera é fator determinante no enlace satelital, após diversas análises, concluiu-se que os efeitos da absorção atmosférica, apesar de serem maiores na banda Ku do que na banda X, podem ser ignorados para fins comparativos entre as faixas de frequência.

Com relação aos efeitos da ionosfera, também podem ser ignorados para fins de comparação, pois não são significativos para frequências acima de 7 GHz.

Já o tamanho da antena é um parâmetro bastante relevante, pois é inversamente proporcional à frequência utilizada. Nesse sentido, frequências mais baixas como as da banda X exigem antenas embarcadas de maiores dimensões, o que pode provocar, dentre outros fatores, au-

mento nos custos de operação.

A atenuação por chuva também é uma variável de grande relevância na comparação, tendo em vista que a banda Ku é extremamente suscetível à precipitação, o que pode impactar diretamente na disponibilidade em regiões chuvosas, como a região Norte do Brasil.

Outro ponto que não pode ser desconsiderado é a segurança das comunicações, pois, conforme já abordado, a banda X fornecida pelo SGDC é de uso exclusivo militar bem como o seu controle e operação. Já a banda Ku é ofertada atualmente por empresas privadas estrangeiras, o que pode representar grande risco em uma situação de conflito.

Desse modo, pode-se concluir que a utilização da banda X atendeu positivamente diversos critérios que apontam maior benefício em

sua utilização no controle e *payload* do Hermes 900.

Entretanto, ressalta-se que as análises apresentadas nesta obra não esgotam o tema, cabendo levar em consideração na escolha da banda outros fatores, como a taxa de transmissão de dados, diretamente proporcional ao aumento da frequência; o custo total dos enlaces nas bandas X e Ku; os objetivos para os quais a aeronave será utilizada, dentre outros.

Dessa forma, essa obra poderá embasar outros estudos com vistas a subsidiar o Alto Comando da Força Aérea Brasileira na possível decisão de adotar a banda X em substituição à banda Ku para estabelecer o enlace de comunicação por satélite com as aeronaves remotamente pilotadas na Instituição.

REFERÊNCIAS

ANATEL. **Glossário de termos da Anatel**. Disponível em:

<https://www.anatel.gov.br/legislacao/glossario>. Acesso em: 30 out. 2020.

AMARAL, C. T. *et al.* **A Importância Estratégica de um Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações no Confronto Cibernético**. Porto Velho, 2017. Disponível em:

https://www.defesa.gov.br/arquivos/ensino_e_pesquisa/defesa_academia/cadn/artigos/xiv_cadn/a_importancia_estrategica_de_um_satelite_geoestacionario_de_defesa.pdf. Acesso em: 04 abr. 2020.

AUSTIN, R. **Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment**. Wiltshire: John Wiley & Sons Ltd, 2010.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. Portaria DCTA n° 2/DNO, de 6 de janeiro de 2020. Aprova a edição da Instrução que dispõe sobre Metodologia de Navegação Baseada em Risco para Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ICA 57-24).



Boletim do Comando da Aeronáutica, Rio de Janeiro, n. 005, f. 364, 09 jan. 2020a.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Portaria DECEA No 112/DGCEA, de 22 de maio de 2020. Aprova a reedição da Instrução que dispõe sobre aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço brasileiro (ICA 100-40). **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 95, f. 6.396, 02 jun. 2020b.

BRASIL. Ministério da Defesa. Doutrina para o Sistema Militar de Comando e Controle. MD30-M-01. 3. ed, 2015. **Diário Oficial da União**, Brasília, nº 149, de 6 de ago. de 2015. Disponível em: https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/158/1/MD31_M03.pdf. Acesso em: 30 set. 2020.

BRASIL. Portaria Normativa nº 18/ MD de 02 de março de 2016. Dispõe sobre o Conceito de Operações Sistema Militar de Comando e Controle (SISMC²). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2016.

BRAUN T. M. **Satellite Communications Payload and System**. New Jersey: Wiley, 2012.

CPRM - **Serviço Geológico do Brasil**. Site da CPRM. Disponível em:

http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/atlas_pluviometrico_brasil/isoietas_totais_anuais_1977_2006.pdf. Acesso em: 06 set. 2020.

DEMENICIS L. S. **O satélite geostacionário de defesa e comunicações estratégicas (SGDC): uma análise das contribuições para a defesa nacional**. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro, 2018.

ESPEJO, T. M. S. **Interferência devida à chuva em ambientes urbanos na faixa de ondas milimétricas**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

FELIX, L. E. M. **Predição da indisponibilidade por chuvas em redes VSAT no Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FLAINVILLE, M. C. Q. de. **Análise da Dinâmica da atenuação por chuvas em regiões tropicais**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

IPPOLITO, L. J. **Satellite communications systems engineering: atmospheric effects, satellite link design, and system**. [S. l.]: Wiley, 2008.

MARAL, G; BOUSQUET, M. **Satellite communications systems: systems, techniques and technology**. 5th ed. [S. l.]: Wiley, 2009.

MARINS, C. N.M. **Estudo analítico e numérico de um enlace digital de comunicação via satélite em condição orbital geostacionária**. Dissertação (mestrado) - Instituto Nacional de Telecomuni-

cações. Santa Rita do Sapucaí, 2004.

MEDEIROS, J. C. O. **Princípios de telecomunicações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2007.

MENDONÇA, M. A. M. **Investigação da cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2013.

MIRANDA, G.P. **Sistema para medição da atenuação devido à chuva em enlaces de satélites na banda Ku**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2012.

NOHRA, L. F. **Limitações nas Comunicações ARP Versus Satélites**. 2020. Disponível em: <https://velhogeneral.com.br/2020/04/01/limitacoes-nas-comunicacoes-arp-versus-satelites/>. Acesso em: 02 jul. 2020.

PIEDAD, F.; HAWKINS, M. **High availability: design, techniques, and processes**. Upper Sadle River: Prentice Hall, 2001.

RODDY, D. **Satellite communications**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

SILVA, L. B. C.; CHAMON, M. A. **Cálculo de enlace para sistemas de comunicação digital via satélite**. São José dos Campos: INPE, 2004. Disponível em: https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/909/1/Calculo_enlace_para_sistemas_comunicao.pdf. Acesso em: 08 jul. 2020.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. **Computer Networks**. 5th ed. Boston: Pearson, 2011.

UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. Setor de Radiocomunicação. **Recommendation ITU-R P.531-14**. Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite networks and systems. Geneva: ITU, 2019. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-14-201908-III!PDF-E.pdf. Acesso em: 01 jul. 2020.

UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. Setor de Radiocomunicação. **Recommendation ITU-R P.618-13**. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Geneva: ITU, 2017. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-13-201712-III!PDF-E.pdf. Acesso em: 02 jul. 2020.

UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Recommendation ITU-R P.838-3**. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Geneva: ITU, 2005. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-III!PDF-E.pdf



Acesso em: 08 jul. 2020.

UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Recommendation ITU-R P.837-6**. Characteristics of precipitation for propagation modelling. Geneva: ITU, 2013. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-6-201202-S!!PDF-E.pdf.

Acesso em: 08 jul. 2020.

VISIONA, 2020. **Site da VISIONA**. Disponível em: <http://www.visionaespacial.com.br/sgdc>. Acesso em: 10 jul. 2020.

WOLFFENBÜTTEL, A. O que é? Joint-venture. **Desafios do Desenvolvimento**, Brasília, n.25, p. 64, ago. 2006.

VALAVANIS. G.; VACHTSEVANOS. J. **Handbook of unmanned aerial vehicles**. New York: Springer, 2010.