

Estudo de convivência entre sistemas 5G e satélites não-geoestacionários na faixa de 28 GHz

Gerência de Espectro, Órbita e Radiodifusão

Resumo— Este trabalho tem por objetivo dar suporte à definição de requisitos técnicos e operacionais de condições de uso do espectro para a subfaixa 27,5 GHz a 27,9 GHz, vulgo 28 GHz. Para tanto, foi necessário estudar a convivência entre sistemas IMT-2020 e estações espaciais do Serviço Fixo por Satélite – FSS. Simulações adicionais foram conduzidas considerando satélites não-geoestacionários. Os resultados são apresentados na forma de funções de distribuição cumulativa da probabilidade – CDFs da Relação Interferência-Ruído do sistema interferido. Conclui-se que, para densidades espectrais de potência efetivamente irradiada das estações de base do sistema IMT próximas a 60 dBm/200 MHz, as probabilidades estimadas de extrapolação do critério de proteção das estações do FSS são desprezíveis para estações satelitais de baixa órbita.

Palavras Chave— IMT, FSS, NGSO, convivência.

I. INTRODUÇÃO

A Resolução 242 da Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2019 dispõe sobre a identificação do uso da faixa de frequências de 24,25 a 27,5 GHz para sistemas de Telecomunicações Móveis Internacionais (*International Mobile Telecommunications* – IMT) e incentiva as administrações a garantirem que a implementação do IMT permita o uso continuado de estações terrenas do Serviço passivo de Exploração da Terra por Satélite (*Earth exploration-satellite service* – EESS), do Serviço de Exploração Espacial (*Space Research Service* – SRS), e do Serviço Fixo por Satélite (*Fixed-Satellite Service* – FSS) [1].

Objetivando o estabelecimento de requisitos técnicos e operacionais de condições de uso de toda a faixa de frequências de 24,25 a 27,9 GHz [2], um estudo de convivência entre os sistemas foi conduzido para avaliar interferências nas estações satelitais do FSS [3]. Nesta avaliação, foi observado que estações base do SMP operando com potência efetivamente irradiada (e.i.r.p.) de até 78,6 dBm/200 MHz não ferem o critério de proteção das estações do FSS de $\frac{I}{N} = -10,5$ dB [4].

Com relação à subfaixa adjacente, de 27,5 GHz a 27,9 GHz, não identificada para sistemas IMT, o Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil (PDFF) destina esta porção de faixa tanto para serviços associados a aplicações do Serviço Fixo por Satélite (FSS) quanto para outros serviços de telecomunicações, onde destaca-se o serviço Limitado Privado, que suporta aplicações de redes privativas (Ver Subseção 2.2).

Toda a faixa de frequências de 27 GHz a 30 GHz está atribuída para o enlace de subida do FSS, havendo também

destinação compatível para o uso de sistemas satelitais nesta faixa, sendo que acima de 27,5 GHz se pode ter a operação de redes de satélites não-geoestacionários (NGSO). Logo, fez-se necessário uma avaliação de impacto da operação de sistemas terrestres na subfaixa de 27,5 GHz a 27,9 GHz, compartilhada com o enlace de subida de sistemas NGSO do FSS.

Este documento tem por propósito relatar estudos adicionais de convivência entre sistemas 5G e estações do Serviço Fixo por Satélite, no que compreende as estações especiais não geoestacionárias em operação na subfaixa adjacente de 27,5 a 27,9 GHz. As próximas seções descreverão a metodologia empregada e apresentarão os resultados obtidos.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O orçamento de enlace de uma estação de base do IMT-2020 para sistemas avançados de antenas (*Advanced Antenna Systems* – AAS) definido pelo *Task Group 5/1* do ITU-R, grupo responsável pelos estudos de convivência entre o FSS e o IMT na faixa de 24,25 a 27,5 GHz, pode ser escrito da forma:

$$\text{e.i.r.p.} = \underbrace{(P_{elem} + 10 \log_{10}(N^2))}_{P_{cond}} + \underbrace{(G_{elem} + 10 \log_{10}(N^2))}_{G_{arr}} - L_{ohm}, \quad (1)$$

onde P_{elem} é a potência conduzida por elemento de antena na estação base, N é o número de elementos, P_{cond} é a potência conduzida no arranjo, G_{arr} é o ganho composto do arranjo e L_{ohm} é a perda resistiva do arranjo [5].

No estudo principal realizado para as estações espaciais geoestacionárias, uma potência conduzida por elemento de antena na estação base de 28,5 dBm resultou numa e.i.r.p. de 66,6 dBm para um arranjo AAS de 8×8 elementos, e numa e.i.r.p. de 78,6 dBm para um arranjo AAS de 16×16 elementos [3]. Já nos estudos originais do TG 5/1, este mesmo orçamento resultou numa base comum de e.i.r.p. = 48 dBm/200 MHz para $N = 8$, ao se considerar uma potência conduzida por elemento menor ($P_{elem} = 10$ dBm/200 MHz) [6].

Neste estudo complementar, portanto, optou-se pela consideração conservadora de uma e.i.r.p. de 48,12 dBm/200 MHz (ou -65 dBW/Hz) para uma operação típica de estação base com um arranjo AAS de 8×8 elementos, e numa e.i.r.p. de 60,16 dBm/200 MHz (ou -53 dBW/Hz) quando um arranjo AAS de 16×16 é utilizado. As demais características do sistema 5G interferente, da estação satelital interferida, os modelos de propagação utilizados e os parâmetros de simulação serão apresentados nos itens que se seguem.

A. Características técnicas do sistema 5G

As antenas da estação base e da estação móvel foram normalizadas de modo a manter a radiação total emitida (*Total Radiated Power* – TRP) num valor fixo de 0 dBi independentemente da direção, ou seja, sem que as antenas introduzam perdas ou ganhos adicionais ao orçamento de enlace da Equação 1. O fator de correção pode ser expresso pela integração do padrão de radiação composto do arranjo de antenas $A_A(\theta, \phi)$ definido em [7], em função também dos ângulos de tilt e varredura [8]:

$$\text{Fator} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi A_A(\vartheta, \varphi, \vartheta_{etilt}, \varphi_{escan}) \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi. \quad (2)$$

Os fatores de correção aplicados aos padrões $A_A(\theta, \phi)$ da estação base e da estação móvel resultaram nos diagramas de radiação ilustrados nas Figuras 1 e 2, respectivamente:

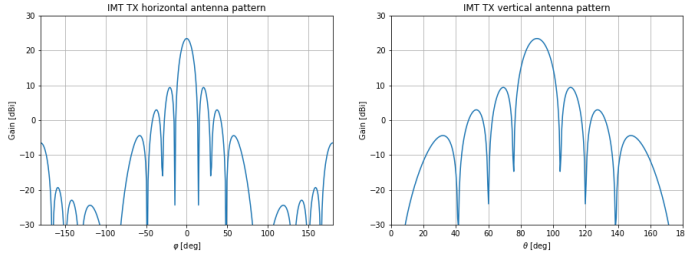


Fig. 1. Diagrama de radiação do arranjo AAS da estação base pós-normalização

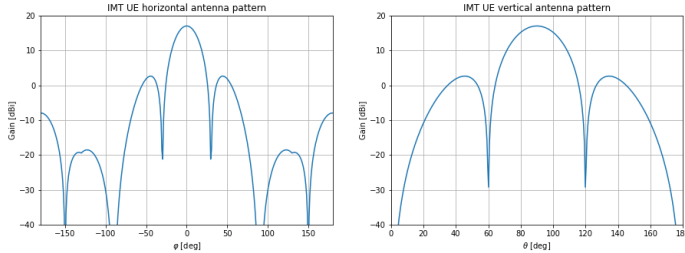


Fig. 2. Diagrama de radiação do arranjo AAS da estação móvel pós-normalização

A rede usada na simulação foi baseada numa grade hexagonal de 7 constelações de 57 setores cada, com três *hotspots mmWave* localizados aleatoriamente em cada setor tal como utilizado em [9] e ilustrado na Figura 3. As demais características do sistema interferente estão elencadas na Tabela I.

B. Características técnicas da estação FSS não-geoestacionária

O modelo de antena utilizado se baseou na Recomendação ITU-R S.1528, que dispõe sobre padrões de radiação de antenas para satélites não-geoestacionários no FSS operando abaixo de 30 GHz [10]. Para uma razão limite entre o diâmetro da antena e o mais baixo comprimento de onda de interesse ($\frac{D}{\lambda} < 35$), o padrão de referência para satélites de baixa órbita é dado por:

$$\begin{cases} G(\psi) = G_{max} - 3\left(\frac{\psi}{\psi_{3dB}}\right)^\alpha \text{ dBi} & \text{para } \psi_{3dB} < \psi < Y \\ G(\psi) = G_{max} + L_S - 25 \log\left(\frac{\psi}{Y}\right) \text{ dBi} & \text{para } Y < \psi < Z \\ G(\psi) = L_F \text{ dBi} & \text{para } Z < \psi < 180^\circ \end{cases} \quad (3)$$

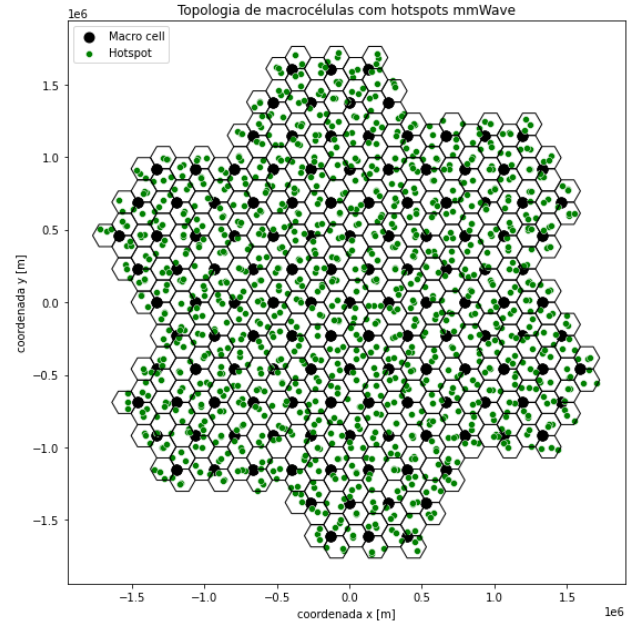


Fig. 3. Topologia utilizada nas simulações

onde ψ é o ângulo fora do eixo em graus, $G(\psi)$ é o ganho em função do ângulo ψ em dBi, G_{max} é o ganho máximo no lóbulo principal, ψ_{3dB} é metade do ângulo de meia potência, L_S é o ponto de cruzamento da máscara entre o feixe principal e o primeiro lóbulo lateral (dB) em relação a G_{max} , e L_F é o nível do lóbulo lateral mais distante, sendo $L_F \approx 0$ dBi para antenas ideais. Y e Z são constantes definidas pelas equações abaixo:

$$Y = \psi_{3dB} \sqrt{-\frac{L_S}{3}} \quad (4)$$

$$Z = Y \times 10^{0,04(G_{max} + L_S - L_F)}. \quad (5)$$

Os valores adotados para os níveis de referência da máscara foram $L_F \approx 0$ dBi considerando uma antena ideal e $L_S = -6,75$ dBi como definido em [10]. O padrão de radiação resultante da antena do satélite não-geoestacionário interferido está ilustrado na Figura 4. Os demais parâmetros da estação satelital estão resumidos na Tabela II. Na coleta de dados de satélites não-geoestacionários em operação, optou-se por preenchê-la com os dados do satélite de órbita mais baixa dentre os pesquisados, buscando simulações de pior caso.

O critério de proteção utilizado para o FSS foi definido em referência a um dado percentual de tempo, probabilidade ou locais para o qual a razão interferência-ruído possa excedê-lo. O valor de $-10,5$ dB na Tabela II não é absoluto, mas sim um indicativo de que $\frac{I}{N} > -10,5$ dB pode acontecer em 20% do tempo, ou 20% dos eventos (representando uma probabilidade), ou em 20% dos locais. Critérios para percentuais mais rigorosos são ilustrados na Tabela III.

Ao definir os critérios de proteção em termos percentuais de tempo, eventos ou locais, o Grupo de Trabalho 4A entendeu que, para simulações de Monte Carlo, este percentual pode ser expresso em número de rodadas [4].

Com o objetivo de preservar as densidades de estações base interferentes praticadas no estudo original em [9], foi preciso

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DA ESTAÇÃO BASE 5G E DO EQUIPAMENTO DE
USUÁRIO.

PARÂMETRO	ESTAÇÃO BASE	EQUIP. USUÁRIO
Parâmetros de sistema		
Frequência central	27700 MHz	
Método duplex	TDD	
Largura do canal	200 MHz	
Largura do bloco (RB)	180 kHz	
Modelo de perda de percurso	UMi (Urban Micro - 3GPP)	
Parâmetros gerais		
Topologia	hotspots de um setor	-
Hotspots por setor	3	-
Raio do hotspot	100 m	-
Altura	6 m	1,5 m
Tipo de antena	Formação de feixe	Formação de feixe
Ganho do elemento	5 dBi	5 dBi
Largura horiz. 3dB	65°	90°
Largura vert. 3dB	65°	90°
Razão frente-costas	30 dB	25 dB
N° de elementos	8 × 8, 16 × 16	4 × 4
Espaçamento horiz.	0,5 λ	0,5 λ
Espaçamento vert.	0,5 λ	0,5 λ
Perda ôhmica do arranjo	3 dB	3 dB
Perda corporal	-	4 dB
Potência por elemento	10 dBm/200 MHz	10 dBm/100 MHz
Controle de potência	Não	Sim
Potência máxima	-	22 dBm

adequar os parâmetros de posicionamento da estação satelital em função da diferença significativa de altitude: de 35787 Km para 590 Km. A geometria de um enlace satelital é ilustrada na Figura 5 como referência para a metodologia descrita ao longo desta seção.

O ângulo de elevação de um satélite, ilustrado na Figura 5 como η , é o ângulo que o satélite forma com a reta tangente ao ponto T na Terra. Este ângulo, calculado em função do ângulo de cobertura ψ , é dado por [11]:

$$\eta = \arctg\left(\frac{\cos(\psi) - \sigma}{\sin(\psi)}\right), \quad (6)$$

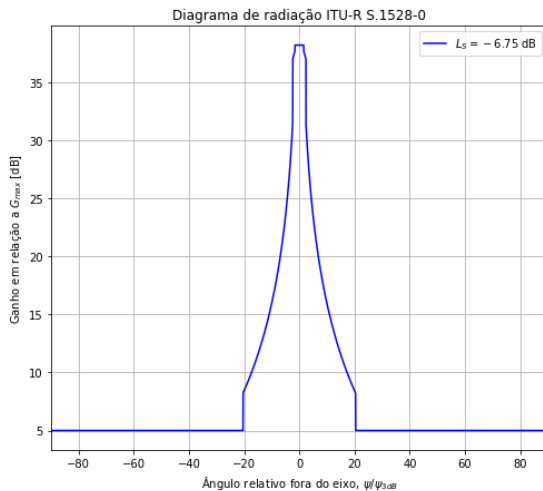


Fig. 4. Padrão de radiação da antena do satélite de baixa órbita (LEO) modelado nas simulações

TABELA II
PARÂMETROS DO SATÉLITE

Parâmetros	Estação não-GEO
Frequência central	27.700 MHz
Largura de faixa	100 MHz
Tipo de antena	ITU-R S.1528 [10]
Ganho da antena	38,2 dBi
Ângulo de meia potência (3 dB)	1,88°
Temperatura de ruído	460 K
Critério de proteção	-10,5 dB [4]
Altitude	590 km

TABELA III
CRITÉRIO DE PROTEÇÃO

Percentual de eventos (%)	Critério de $\frac{I}{N}$ (dB)
0,02	0
0,6	-6
20 ou $\frac{I}{N}$ médio	-10,5

onde:

$$\begin{aligned} \psi &= \arccos(\cos(\theta_e)\cos(\phi_{es})), \\ \phi_{es} &= (\phi_e - \phi_s) \\ \sigma &= \frac{R}{R+h} \\ \theta_e &= \text{latitude da estação terrena}, \\ \phi_e &= \text{longitude da estação terrena}, \\ \phi_s &= \text{longitude do ponto sub-satelital}, \\ R &= \text{raio da Terra}, \\ h &= \text{altitude do satélite}. \end{aligned} \quad (7)$$

O ângulo de visibilidade – ou de nadir – γ , é então obtido por identidades trigonométricas com os ângulos ψ e η . Para uma área de serviço de referência equivalente à área do Brasil no estudo em [9], obteve-se um ângulo de visibilidade $\gamma = 5,06^\circ$ para uma elevação $\eta = 90^\circ$ considerando-se uma altitude de órbita geoestacionária ($h = 35.787$ km). Para a altitude listada na Tabela II, obtém-se um ângulo de visibilidade $\gamma \approx 127^\circ$ para a mesma área de serviço, o que reduz as variações de elevação possíveis de serem testadas até se atingir uma elevação limite em relação à linha do horizonte. ($\forall \eta \leq \eta_{limite}$).

O arco entre a estação terrena situada no ponto T até o ponto sub-satelital S' em função da diferença de longitudes entre a estação terrena e o satélite ϕ_{es} pode ser calculado da forma [12]:

$$TS' = R \times \arccos(\sin(\theta_s)\sin(\theta_e) + \cos(\theta_s)\cos(\theta_e)\cos(\phi_{es})) \quad (8)$$

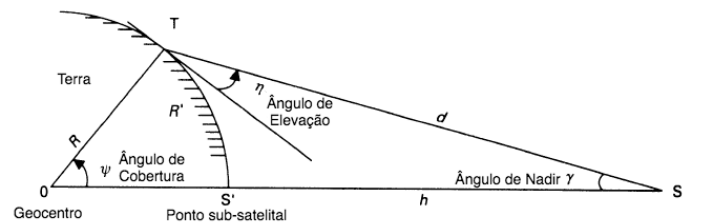


Fig. 5. Geometria de um enlace satelital ilustrando a elevação a partir de um ponto T na Terra. Adaptada de [11].

Já o decréscimo da altitude Z_2^1 em função da mesma diferença de longitudes ϕ_{es} pode ser obtido por: [13]

$$Z_2 = (R + h)\sin(\theta_s)\sin(\theta_e) + R\cos(\theta_s)\cos(\theta_e)\cos(\phi_{es}) - R \quad (9)$$

As variações de TS' e Z_2 em função do aumento da diferença de longitudes ϕ_{es} estão ilustradas na Figura 6. Note que TS' atinge o limite da linha do horizonte quando $Z_2 = 0$. Considerando uma altitude $h = 590$ km, este cruzamento no zero acontece quando $\phi_{es} \approx 24^\circ$. Pelas Equações 6 e 7, obtém-se $\eta_{limite} \approx 53^\circ$. Para ângulos de elevação inferiores a este limite, não é possível simular uma densidade de estações base interferentes sem que parte delas esteja situada além da linha do horizonte e, conseqüentemente, deixe de contribuir no cálculo da interferência agregada no satélite.

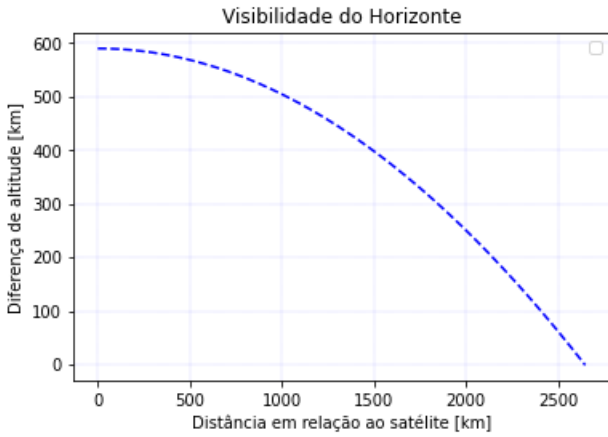


Fig. 6. Variações de TS' e Z_2 em função do aumento da diferença de longitudes ϕ_{es}

Tanto o estudo original da administração brasileira para o TG 5/1 quanto o estudo de convivência conduzido para a faixa de 26 GHz avaliaram elevações η de 90° , 45° e 20° , com um ângulo fixo de visibilidade $\gamma = 5,06^\circ$, aumentando a área de serviço A_s – e a densidade de estações base interferentes – conforme a elevação η diminui [3, 9]. Com o objetivo de preservar a metodologia utilizada sem as limitações decorrentes da condição de contorno da linha do horizonte para ângulos de elevação $\eta \leq \eta_{limite}$, optou-se por adaptar a contribuição recente da administração brasileira aos estudos de compartilhamento entre o IMT-2020 e o Serviço de Exploração da Terra por Satélite (Ativo) [14] ao presente caso.

O racional empregado no documento parte da observação de que estações base distribuídas numa área muito grande contribuem muito pouco com a parcela de interferência agregada causada por enlaces contidos no feixe de meia potência do satélite, ou seja, a maior parte da energia dos enlaces interferentes desta rede IMT incidirá sobre os lóbulos laterais da antena de recepção da estação interferida. Daí a contribuição propôs rotinas de simulação compostas de duas etapas: a primeira considerando um ângulo de visibilidade $\gamma \approx 127^\circ$, iluminando uma

grande área de serviço A_s equivalente à área do Brasil, e representando a interferência agregada resultante das incidências nos lóbulos laterais. Já a segunda considera $\gamma = \psi_{3dB}$ (ver Subseção B.), iluminando a área correspondente ao feixe de meia potência – que varia conforme o ângulo de elevação η – e representando a interferência agregada resultante das incidências no lóbulo principal. A Figura 7 ilustra este raciocínio.



Fig. 7. Áreas de serviço A_s : equivalente à área do Brasil e invariante na primeira etapa, e equivalente à projeção do feixe de meia potência variando conforme o ângulo de elevação η na segunda etapa. Reproduzida de [14]

C. Parâmetros de simulação

Tal como no estudo de convivência em [3], a modelagem e a simulação dos sistemas IMT seguiram a metodologia descrita no Anexo 1 da Recomendação ITU-R M.2101, baseada numa análise de Monte Carlo que possibilita avaliar a verossimilhança da interferência pela simulação simultânea de interferências entre sistemas provenientes de múltiplas fontes [7]. Para tanto, fez-se uso da ferramenta de simulação SHARC (*simulator for use in SHARing and Compatibility studies of radiocommunication systems*), desenvolvida para este fim [15].

Quanto aos parâmetros específicos de simulação, referim-nos à metodologia descrita em [15] e empregada em [9] para o cálculo da interferência agregada na estação satelital, considerando uma área muito grande como a do Brasil. O método consiste na coleta de estatísticas de $\frac{1}{N}$ de segmentos representativos da rede simulada, e então calcular a interferência agregada gerada por múltiplos segmentos de características similares, por um procedimento de amostragem com reposição, sendo o fator de segmento S o total de amostras coletadas da rede simulada.

¹A notação Z_2 refere-se às mudanças de coordenadas cartesianas i) geocêntricas com o eixo Z positivo para o norte e ii) com origem deslocada à a estação terrena [13, Attachment B]

Primeiramente, o número de estações por unidade de área D_l é calculado da forma:

$$D_l = D_s \times R_a \times R_b, \quad (10)$$

onde D_s é o número de *hotspots mmWave* por unidade de área, R_a é a relação área de cobertura-área construída e R_b é a relação área construída-área de estudo. Então o fator de segmento S é calculado como:

$$S = \frac{A_s \times D_l}{N_{sim}}, \quad (11)$$

onde A_s é a área de estudo, e N_{sim} o número de estações simuladas a cada iteração da simulação de Monte Carlo. De modo consolidado, os parâmetros específicos de simulação são apresentados nas Tabelas IV e V, referentes aos ângulos de nadir $\gamma \approx 127^\circ$ e $\gamma = \psi_{3dB}$, respectivamente.

TABELA IV
PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO ($\gamma \approx 127^\circ$)

Parâmetro	Valor
D_s	30 (área urbana) e 10 (área suburbana)
R_a	7% (área urbana) e 3% (área suburbana)
R_b	5%
N_{sim}	1.197
η	$90^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 20^\circ$ e 5°
$A_s[\text{km}^2]$	8.510.345
ISD [km]	433.501
N_s	1.021.241
S	853

TABELA V
PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO ($\gamma = \psi_{3dB}$)

Parâmetro	Valor				
D_s	30 (área urbana) e 10 (área suburbana)				
R_a	7% (área urbana) e 3% (área suburbana)				
R_b	5%				
N_{sim}	456				
η	90°	60°	45°	20°	5°
$A_s[\text{km}^2]$	294	393	589	2.517	38.771
ISD [km]	4,23	4,88	5,98	12,37	48,54

Os parâmetros D_s , R_a , R_b , foram definidos em [16]. A área de serviço A_s é fixa quando $\gamma \approx 127^\circ$, e varia conforme o ângulo de elevação η quando $\gamma = \psi_{3dB}$, conforme visto na Subseção B. O parâmetro “distância entre sítios” (*inter-site distance* – ISD) se refere à distância entre centros de hexágonos adjacentes na Figura 3, que também variam em função de A_s .

D. Modelos de propagação

Para avaliar a perda de transmissão entre uma estação base do sistema 5G e a estação satelital, tem-se a Recomendação ITU-R P.619 por referência. A perda de transmissão para múltiplos interferentes é dada por [13, p. 20]:

$$L_b = L_{bfs} + A_{xp} + A_g(p) + A_{bs} + L_c(p_{Lc}) + L_{be}(p_{Lbe}) + L_{dtb} \quad (12)$$

onde:

L_{bfs} = perda de espaço livre,

A_{xp} = atenuação por descasamento de polarização,

$A_g(p)$ = atenuação por gases atmosféricos limitada a $p\%$,

A_{bs} = atenuação por espalhamento de feixe

$L_c(p_{Lc})$ = perda no clutter limitada a um percentual p_{Lc} ,

$L_{be}(p_{Lbe})$ = perda em construções limitada a um percentual p_{Lbe} ,

$L_{dtb}(p)$ = difração em dutos limitada a um percentual p .

Para a atenuação por descasamento de polarização A_{xp} , foi considerado um valor de 3 dB [13, p. 4]. A atenuação por gases A_g não foi limitada a um percentual p , mas sim calculada por uma heurística descrita em [13, p. 25]. Com relação ao percentual p_{Lc} em $L_c(p_{Lc})$, os valores de p_{Lc} de cada perda do enlace no clutter são aleatórios e uniformemente distribuídos e as perdas por clutter são calculadas conforme Rec. ITU-R P.2108. As perdas relacionados a construções ($L_{be}(p_{Lbe})$) e a dutos $L_{dtb}(p)$ foram consideradas 0 dB neste estudo.

III. RESULTADOS

Para o procedimento de amostragem com reposição (*bootstrapping*) baseado no fator de segmento S descrito no item C., foi necessária uma rotina de pós-processamento composta por uma simulação de Monte-Carlo adicional na qual, a cada iteração, S amostras são retiradas do conjunto de valores da Relação Interferência-Ruído ($\frac{I}{N}$) coletados dos segmentos de rede simulados nas duas etapas, e então somados para obtenção da interferência agregada na estação satelital não-geoestacionária. As simulações de Monte-Carlo para cada condição inicial foram realizadas com 5000 iterações, e a rotina de pós-processamento com 2000 iterações.

Os resultados são apresentados na forma de funções de distribuição cumulativa da probabilidade (*cumulative distribution function* – CDF) dos valores de $\frac{I}{N}$. Para um valor X contido no conjunto de valores de $\frac{I}{N}$, a função de distribuição cumulativa da probabilidade $F(X)$ é a proporção dos valores de $\frac{I}{N}$ menores ou iguais a X . A convivência entre os sistemas interferente e interferido se dá quando $P(\frac{I}{N} \leq X) = 1$ para $X \leq -10,5$ dB, observando o critério de proteção listado na Tabela II.

Para um sistema IMT-2020 com Duplexação por Divisão de Tempo (*Time Division Duplexing* – TDD) no qual toda a faixa é utilizada no enlace direto (*downlink*) em 100% do tempo, leia-se: pior caso, as CDFs da interferência agregada para cada ângulo de elevação η , agrupadas por arranjos AAS de 8×8 e 16×16 elementos, estão ilustradas na Figura 8. De imediato, é possível perceber que os valores de X a partir dos quais as CDFs atingem valores de 1 são maiores em função do aumento do número de elementos do arranjo de antenas AAS empregado nas estações base do IMT, assim como em função da diminuição do ângulo de elevação da estação terrena em relação ao satélite.

Nos resultados obtidos para satélites geoestacionários em [3], para os casos com arranjos de 16×16 elementos de antena na estação base, foram observados incrementos de 3 a 6 dB em $\frac{I}{N}$ conforme o ângulo de elevação do enlace Terra-espaço, se comparados aos casos com arranjos de 8×8 elementos. Neste

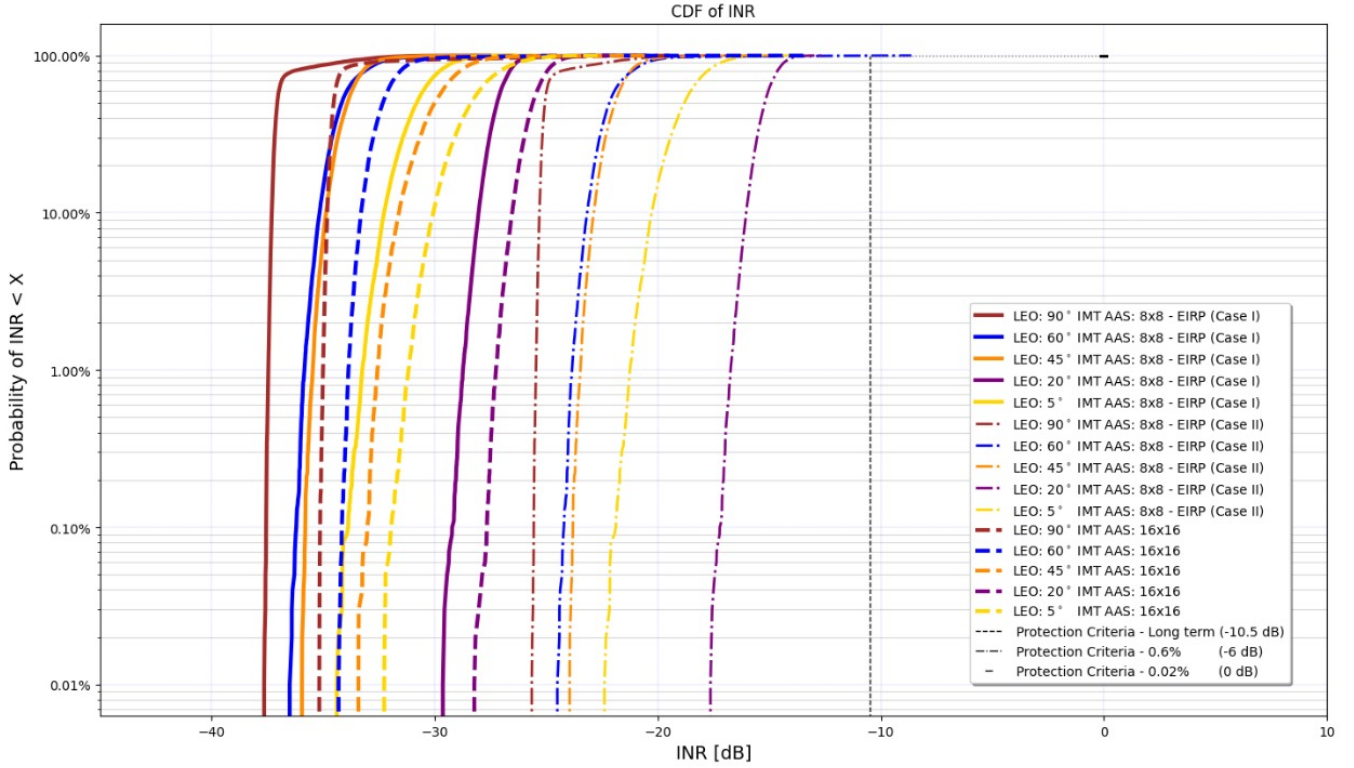


Fig. 8. Funções de distribuição cumulativa dos valores de $\frac{I}{N}$.

estudo com satélites não-geoestacionários, o incremento de $\frac{I}{N}$ observados foram de aproximadamente de 2 a 3 dB conforme a variação de η . Cumpre notar que $\frac{I}{N}$ não aumenta linearmente com o aumento da e.i.r.p. das estações base por arranjo AAS, de 48 para 60 dBm/200 MHz para uma mesma potência conduzida por elemento $P_{elem} = 10$ dBm/200 MHz, como visto na Seção II.

O estudo [6], na análise de sensibilidade conduzida sobre os parâmetros de linha de base definidos pelo TG 5/1, não somente observou que $\frac{I}{N}$ aumenta de modo não linear com a e.i.r.p. das estações interferentes, como também que $\frac{I}{N}$ aumenta linearmente – e em igual medida – com o aumento da potência conduzida por elemento. Na ocasião, houve um incremento de 5 dB em $\frac{I}{N}$ quando P_{elem} aumentou de 10 para 15 dBm/200 MHz. Para fins de reprodutibilidade, novas simulações foram executadas considerando este mesmo incremento de P_{elem} para as estações base com arranjos de 8×8 elementos de antena.

Na Figura 8, os resultados das simulações realizadas com arranjos de 8×8 elementos de antena foram agrupados por níveis de potência conduzida por elemento $P_{elem} = 10$ dBm/200 MHz, rotuladas como "Caso 1", e $P_{elem} = 15$ dBm/200 MHz, rotuladas como "Caso 2". De fato, pode-se observar um deslocamento de 5 dB à direita nas curvas de linha cheia para as curvas de linha tracejada, tal como observado em [6].

Cabe aqui uma observação para as CDFs referentes a $\eta = 5^\circ$, tido como ângulo de elevação mínimo para estabelecimento do enlace terra-espço [17]. É possível observar que a interferência agregada para $\eta = 5^\circ$ é inferior às calculadas para elevações de 20 e 45 graus, o que pode parecer contra-intuitivo num primeiro

momento, ao considerarmos a proporcionalidade inversa entre o ângulo de elevação e a interferência agregada vista até aqui. No entanto, ângulos de elevação menores implicam em enlaces terra-espço mais próximos da superfície terrestre e, nestes cenários, as perdas por *clutter* são mais significativas nos percursos interferentes entre as estações base IMT e o satélite.

A Figura 9 ilustra as distribuições cumulativas das perdas por *clutter* para pequenos ângulos de elevação. É possível notar a redução acentuada da inclinação das sigmóides conforme o ângulo de inclinação diminui. Isto significa dizer que $P(L_{clutter} \leq X)$ atinge 100% para valores de X cada vez maiores conforme η aumenta. Paralelamente na Figura 8, isso se traduz em interferências agregadas cada vez menores conforme o ângulo de elevação diminui a partir de $\eta = 20^\circ$.

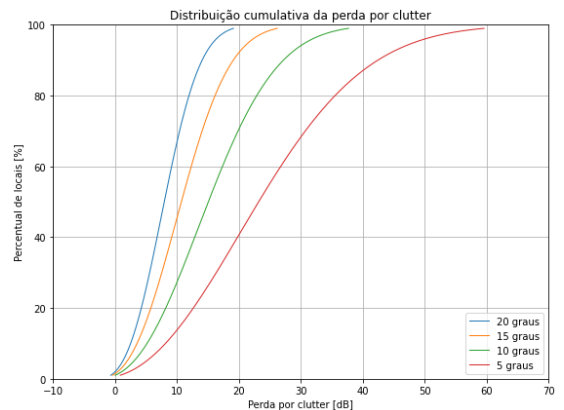


Fig. 9. Funções de distribuição cumulativa da perda por clutter em 27,5 GHz não excedida a percentuais $p\%$, para ângulos de elevação de 5° , 10° , 15° e 20° .

As Figuras 10 e 11 exibem aproximações da Figura 8 nos últimos 1 e 0,1 pontos percentuais, respectivamente. A partir delas podemos observar se o critério de proteção foi ultrapassado.

No último 1% de probabilidade cumulativa, é possível observar que a CDF referente a $\eta = 60^\circ$, arranjo AAS 8×8 , e $P_{elem} = 10$ dBm/200 MHz (Caso 2), tem $P\left(\frac{I}{N} < X\right) \approx 0,9998$ quando $X = -10,5$ dB. A ultrapassagem deste critério em 0,02% está em conformidade com os percentuais de eventos especificados na Tabela III.

No último 0,1% de probabilidade cumulativa, não há nenhuma outra violação dos critérios de proteção em nenhum de seus percentuais por nenhuma das demais CDFs.

IV. CONCLUSÃO

Este complemento do estudo de convivência em [3] simulou o impacto da interferência agregada de sistemas 5G em estações espaciais de baixa órbita, de antenas com padrões de radiação típicos de satélites não estacionários do FSS operando abaixo de 30 GHz [10]. Para o *downlink*, nenhum dos casos simulados feriu o critério da Relação Interferência-Ruído $\frac{I}{N} = -10,5$ dB para potências e.i.r.p. das estações interferentes de 48 dBm/200 MHz e 60 dBm/200 MHz, para arranjos AAS com 8×8 e 16×16 elementos de antena, respectivamente.

Neste trabalho, a metodologia empregada nos estudos de convivência do Task Group 5/1 do ITU-R, conduzidos para satélites geoestacionários na faixa de 26 GHz, foi adaptada para satélites de órbita baixa preservando-se os ângulos de elevação testados e as densidades de estações base praticadas originalmente.

Uma análise de sensibilidade foi executada considerando um incremento de 5 dB na potência conduzida por elemento de antena das estações base interferentes. Como efeito, as funções de distribuição cumulativa da probabilidade dos valores de $\frac{I}{N}$ também foram deslocadas em 5 dB, o que levou a um $\frac{I}{N}$ de pior caso próximo do limite de $-10,5$ dB.

Foi observada uma interferência agregada menor para o ângulo de elevação em seu mínimo operacional de 5° . O que poderia ser percebido como contraintuitivo se comparado aos demais resultados, se mostrou razoável conforme o aumento considerável das perdas por *clutter* em 27,5 GHz para ângulos abaixo de 20° .

Com base nas avaliações realizadas, observou-se, portanto, que para potências e.i.r.p. das estações base limitadas a 60 dBm/200 MHz, as probabilidades estimadas de extrapolação do critério de proteção das estações do FSS são consideradas desprezíveis.

REFERÊNCIAS

- [1] WRC-19. *Terrestrial component of International Mobile Telecommunications in the frequency band 24.25-27.5 GHz*. Resolution 242. Radio Regulations, Vol. III. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2020.
- [2] Agência Nacional de Telecomunicações. *Resolução nº 742, de 01 de março de 2021. Altera a Resolução nº 711, de 28 de maio de 2019, publicada no Diário Oficial da União - DOU de 29 de maio de 2019, e o Regulamento sobre Condições de Uso da Faixa de Radiofrequências de 3,5 GHz a ela anexo, bem como aprova o Regulamento sobre Condições de Uso da Faixa de Radiofrequências de 24,25 GHz a 27,90 GHz*.
- [3] ORER Gerência de Espectro Órbita e Radiodifusão. *Estudos de convivência: IMT-2020 em estações espaciais do FSS na faixa de 27 GHz*. SEI nº 6338199. Processo nº 53500.064041/2020-10., 2020.
- [4] Working Party 4A. *Reply Liaison Statement to Task Group 5/1, WRC-19 agenda item 1.13 (IMT)*. Document 5-1/411-E. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2018.
- [5] Task Group 5/1. *Sharing and compatibility of the FSS and IMT operating in the 24,25-27,5 GHz frequency range*. Document 5-1/478-E. Attachment 3 to Annex 3 to Task Group 5/1 Chairman's Report. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2018.
- [6] France. *Sharing studies between the fixed satellite service and IMT systems in 24.25-25.25 GHz and 27-27.6 GHz*. Document 5-1/253-E. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2018.
- [7] ITU-R. *Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies*. Recommendation M.2101-0. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2017.
- [8] Task Group 5/1. *Liaison Statement to Task Group 5/1: Total Integrated gain for the Active Antenna System antenna pattern, WRC-19 agenda item 1.13 (IMT)*. Document 5-D/752-E. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2017.
- [9] Brazil. *Proposals on the working document for sharing and compatibility studies of FSS and IMT operating in the 24.25-27.5 GHz frequency range*. Document 5-1/323-E. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2018.
- [10] ITU-R. *Satellite antenna radiation patterns for non-geostationary orbit satellite antennas operating in the fixed-satellite service below 30 GHz*. Recommendation S.1528. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2001.
- [11] Madhavendra Richharia. *Satellite communication systems: design principles*. Macmillan International Higher Education, 2017.
- [12] Timothy Pratt e Jeremy E Allnutt. *Satellite communications*. John Wiley & Sons, 2019.

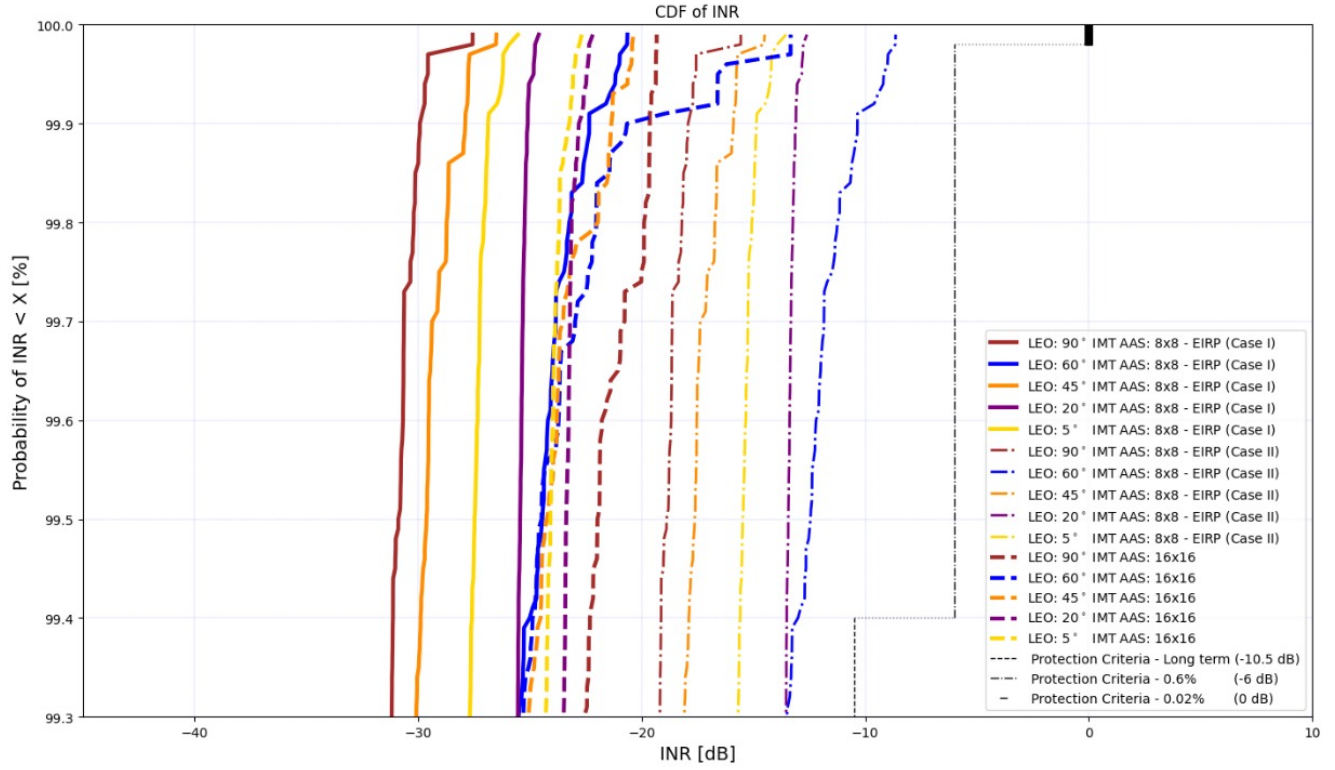


Fig. 10. Funções de distribuição cumulativa dos valores de $\frac{I}{N}$, vistas nos seus últimos 1% de probabilidade.

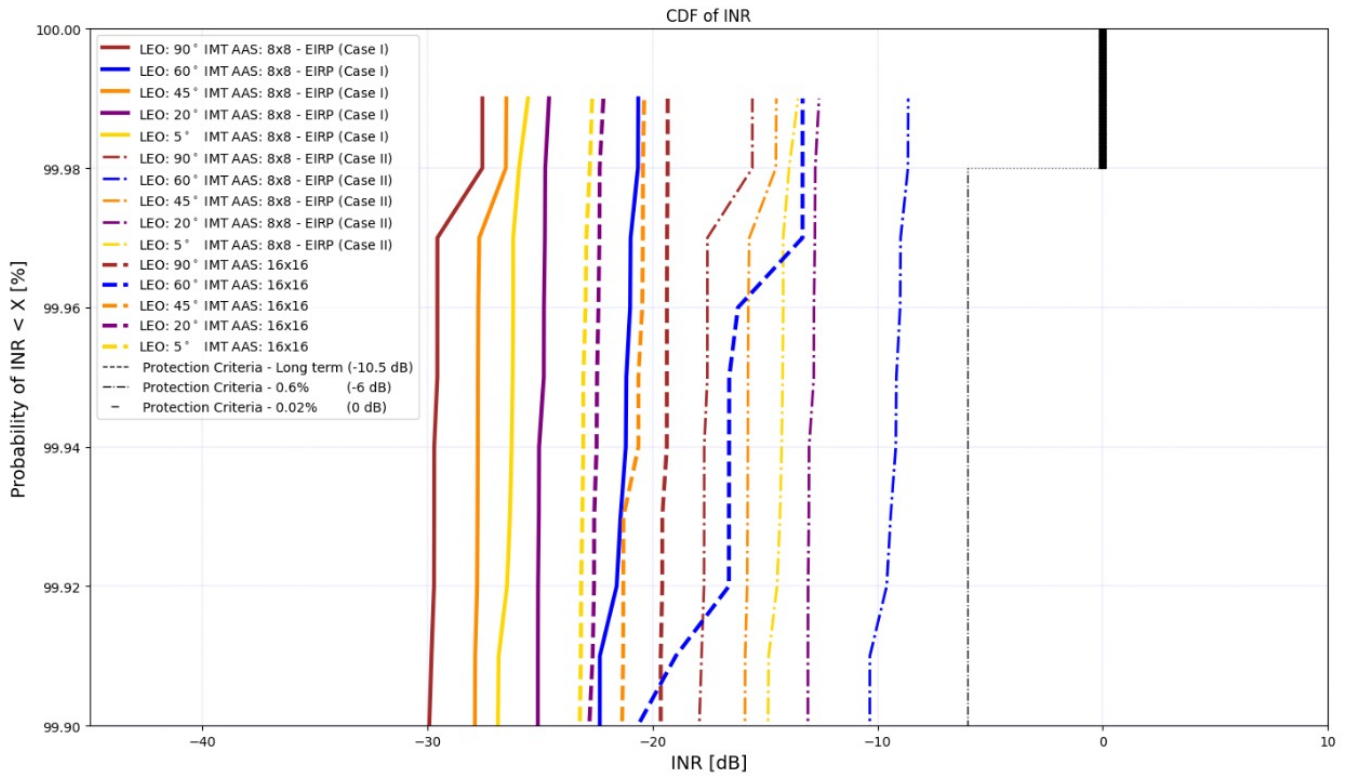


Fig. 11. Funções de distribuição cumulativa dos valores de $\frac{I}{N}$, vistas nos seus últimos 0,1% de probabilidade.

- [13] ITU-R. *Propagation data required for the evaluation of interference between stations in space and those on the surface of the Earth*. Recommendation P.619. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2019.
- [14] Brazil. *Sharing studies between Active Earth exploration-satellite service (Active EESS) in the co-channel band and IMT-2020 operating in the 10-10.5 GHz frequency range*. Document 5D/853-E. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2021.
- [15] Edgar Souza, Agostinho Linhares, Calil Queiroz, Letícia Valle, Ugo Dias e Andre Barreto. “An open source simulation tool for sharing and Compatibility Studies between 5G and Other Radiocommunication Systems”. Em: *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC 2017 August* (2017), pp. 1–5. DOI: 10.1109/IMOC.2017.8121171.
- [16] WP 5D. *Liaison statement to Task Group 5/1 - Spectrum needs and characteristics for the terrestrial component of IMT in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz*. Document 5-1/36-E. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2017.
- [17] WP 5D. *Liaison statement to Task Group 5/1 - FSS/BSS Technical Parameters for Sharing Studies under WRC-19 agenda item 1.13*. Document 5-1/183-E. International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector., 2017.