

Sobre o Impacto de Eventos Solares no Desempenho da RAN de Sistemas 5G

Samuel Alvim da Silva, Robert Mota Oliveira, Lisandro Lovisololo

Resumo—O presente estudo investiga os efeitos da radiação solar sobre enlaces de rádio em *mmWave* (25–60 GHz), tanto isoladamente quanto integrados à rede móvel 5G. Por meio de interpolação de dados e simulações, foi identificado padrões de perturbação que deterioram a razão sinal-ruído e aumentam a perda de percurso. Constatou-se, mediante esses procedimentos, que esse impacto tende a se agravar no Brasil em razão da Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Esses experimentos permitiram estimar o grau de degradação na faixa de operação e avaliar em que medida a performance da rede 5G é afetada.

Palavras-Chave—Eventos solares, Telecomunicações, 5G NR

Abstract—The present study investigates the effects of solar radiation on *mmWave* (25–60 GHz) radio links, both in isolation and when integrated into the 5G mobile network. Through data interpolation and simulations, disturbance patterns were identified that degrade the signal-to-noise ratio and increase path loss. It was determined, by means of these procedures, that this impact tends to worsen in Brazil owing to the South Atlantic Magnetic Anomaly. These experiments made it possible to estimate the degree of degradation within the operating band and to assess the extent to which 5G network performance is affected.

Keywords—Solar events, Telecommunications, 5G NR

I. INTRODUÇÃO

No cenário tecnológico contemporâneo, redes de telecomunicações são essenciais, porém nem sempre é destacado o quanto estão vulneráveis aos efeitos de alguns fenômenos solares. Tempestades geomagnéticas — geradas por explosões solares, ejeções de massa coronal (CME - *Coronal Mass Ejection*) e o vento solar — e a radiação solar que adentra a atmosfera podem afetar sistemas de telecomunicações [1]; e, embora a tecnologia 5G já seja sensível a esses efeitos, ela se torna ainda mais vulnerável quando opera em bandas milimétricas (*mmWave*). Eventos históricos, como o Carrington (1859) [2] e a tempestade de *Halloween* (2003) [3], ilustram o potencial destrutivo desses fenômenos, e a posição do Brasil sobre a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) acentua sua vulnerabilidade [4].

Fisicamente, o ciclo solar de 11 anos traz variações no número de manchas, erupções e CMEs, cuja radiação eletromagnética e partículas energéticas interagem com a magnetosfera, desencadeando tempestades que afetam satélites, redes elétricas, navegação e comunicações aéreas [1].

Samuel Alvim da Silva, Robert Mota Oliveira e Lisandro Lovisololo — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, UERJ, Rio de Janeiro - RJ, e-mails: samuel_trix@yahoo.com.br, robert.oliveira@uerj.br, lovisolo@eng.uerj.br.

O presente trabalho foi realizado com apoio da FAPERJ, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; e pelo CNPq (processos 312743/2023-8 e 403645/2023-9).

O campo magnético terrestre funciona como escudo contra partículas solares e cósmicas [5]. Sua intensidade e variabilidade são monitoradas por índices como DST (*Disturbance Storm Time*) e AE (*Auroral Electrojet*), usados para mensurar a severidade das tempestades magnéticas [6]. Entretanto, na AMAS — região de campo magnético reduzido — a penetração de partículas é maior, aumentando riscos a satélites e a sistemas eletrônicos situados nessa área [4]. Este artigo discute os impactos diretos da radiação solar na propagação de sinais em redes móveis, com ênfase nas faixas milimétricas, e suas vulnerabilidades em ambientes com alta exposição solar.

A próxima seção apresenta fundamentos técnicos do 5G, destacando suas faixas de operação, arquitetura e tecnologias como MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) e *beamforming*. Na Seção III, discutimos os impactos diretos da radiação solar na propagação de sinais em redes móveis, com ênfase nas faixas milimétricas e suas vulnerabilidades em ambientes com alta exposição solar. A Seção IV detalha simulações e análises baseadas em dados experimentais e modelos que avaliam como os componentes da emissão solar afetam a perda de percurso e a razão sinal-ruído em enlaces de rádio. Na Seção V, o SAMA (*Simulation and Analysis of Mobile Access*) [7] é utilizado para modelar o desempenho de redes 5G sob diferentes condições de perturbação solar, revelando impactos na capacidade, estabilidade e eficiência espectral. Por fim, na Seção VI, apresentamos as conclusões finais.

II. RADIO CELULAR PADRÃO 5G

O escopo da tecnologia 5G NR (*New Radio*), abrange três pilares principais: banda larga móvel aprimorada (eMBB - *Enhanced Mobile Broadband*), comunicação ultra-confiável e de baixa latência (URLLC - *Ultra-Reliable Low-Latency Communication*) e comunicações massivas entre dispositivos (mMTC - *Massive Machine-Type Communication*). O 5G oferece ampla flexibilidade espectral, adaptando-se a diversos cenários e exigências de rede. A tecnologia vislumbra operações desde frequências abaixo de 1 GHz até em ondas milimétricas (*mmWave*) com duas faixas principais [8]:

- FR1 (450 MHz a 6 GHz): Largura de banda máxima de 100 MHz;
- FR2 (24,25 GHz a 52,6 GHz): Largura de banda máxima de 400 MHz.

A arquitetura do 5G adota tecnologias avançadas como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) com prefixo cíclico, codificação LDPC (*Low-Density Parity-Check*) para dados e códigos polares para canais de controle. O espaçamento das subportadoras é escalável — de 15 kHz até 240 kHz — e o conceito de *Bandwidth Parts* permite

a alternância dinâmica de espectro, otimizando energia e desempenho. A estrutura de quadros de 10 ms, com suporte a mini-slots, viabiliza comunicações críticas de baixa latência [8].

As técnicas MIMO massivo e *beamforming* são componentes centrais para a eficiência espectral e robustez do 5G. Enquanto o MIMO explora múltiplas antenas para transmissão paralela de dados, o *beamforming* orienta os sinais em feixes direcionais, reduzindo interferência e aumentando a cobertura, especialmente em *mmWave*, onde os sinais são mais suscetíveis à atenuação [9].

O uso de modulações robustas como QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) e 256-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) em combinação com a técnica AMC (*Adaptive Modulation and Coding*) [15] e a multiplexação baseada em OFDM tornam o 5G altamente eficiente, mesmo em ambientes com interferência e multipercurso.

III. IMPACTO DA RADIAÇÃO SOLAR NAS REDES MÓVEIS

Estudos recentes demonstram que as emissões de radiação solar afetam significativamente a propagação de sinais em redes móveis. Essas variações têm implicações diretas na qualidade do serviço em tecnologias 4G, 5G e na futura 6G. Utilizando medições padronizadas, essas pesquisas revelam correlações entre o ruído solar e indicadores de atividade solar. Esses indicadores (métricas que quantificam o quão ativo o Sol está em determinado período), como o índice F10.7 (também chamado F_{10}) que mede a atividade solar na frequência de 2,8 GHz [11].

Em faixas de frequência mais elevadas, como 60 GHz, verificou-se que a radiação solar causa aumento da perda de propagação e redução da razão sinal-ruído, principalmente durante o dia. Tais efeitos são mais acentuados em cenários sem visada direta (NLOS - *Non Line Of Sight*), nos quais as antenas ficam mais suscetíveis ao ruído solar [13].

Medições MDT (*Minimization of Drive Tests*) de milhões de dispositivos móveis no nordeste da Itália foram usadas por Muratore, Giannini e Micheli (2022) [11]. Os autores revelaram, com base nas medições, uma correlação negativa de 82% entre o índice UL_SINR (*Uplink Signal to Interference and Noise Ratio*), uma métrica criada para avaliar a razão sinal-ruído nas células da estação rádio-base, e o índice F10.7. Durante a erupção solar de classe X1.5, em 3 de julho de 2021, células LTE (4G) orientadas para o Sol apresentaram quedas significativas no desempenho, enquanto células voltadas na direção oposta não sofreram os mesmos impactos, evidenciando a influência direcional do ruído solar sobre o ganho das antenas.

Além disso, testes realizados em campo por Sulyman, Buck e Montano (2020) [12] em enlaces a 38 GHz, indicaram que a radiação solar provoca aumento da perda de percurso conforme o modelo log-distância (LDM - *Log-Distance Model*). Elevações de 4% a 25% no expoente de perda de percurso (PLE - *Path Loss Exponent*) foram estimados para os cenários em linha de visada (LOS - *Line of Sight*) e NLOS, respectivamente. Durante períodos próximos ao meio-dia, quando a atividade solar atinge seu pico, o nível de ruído aumenta e a potência do sinal recebido diminui.

O LDM descreve a atenuação média de um sinal em função da sua distância por meio de

$$PL(d)[\text{dB}] = PL(d_0)[\text{dB}] + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad d \geq d_0, \quad (1)$$

na qual $PL(d_0)$ é a perda de percurso em uma distância de referência d_0 , n é o PLE e X_σ é um termo aleatório de sombreamento, modelado como uma variável gaussiana de média zero e desvio padrão σ , em dB. Nos artigos [12] e [13], adota-se $d_0 = 1$ m, de forma que $PL(1 \text{ m})$ pode ser calculada diretamente pela fórmula de Friis para espaço livre conforme

$$PL(d_0)[\text{dB}] = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right). \quad (2)$$

No campo das emissões de rádio em 60 GHz, Sulyman et al. (2017) [13] realizaram experimentos em ambientes internos e externos, voltados a enlaces de acesso, *backhaul* e comunicações D2D (*Device-to-Device*). Utilizando modelos direcionais de perda de percurso baseados no LDM e no *Floating Intercept Model* (FIM), os autores demonstraram que a radiação solar provoca uma degradação de aproximadamente 13,3 dB na razão portadora-ruído (ΔCNR). Para quantificar esse efeito, empregou-se o seguinte modelo:

$$\Delta\text{CNR}[\text{dB}] = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{2\pi S A_e}{G k T \Omega_s} \right), \quad (3)$$

no qual foi adotado o parâmetro $\frac{A_e}{T} = -58 \text{ dB m}^2/\text{K}$ típico de enlaces em climas quentes. Aqui, $A_e = \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) G$ representa a área efetiva da antena em metros quadrados (m^2), sendo G o ganho da antena; T , a temperatura do sistema em kelvins (K); $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ é a constante de Boltzmann; e $\Omega_s = 6,8 \times 10^{-5} \text{ sr}$ corresponde ao ângulo sólido médio subtendido pelo Sol. Dessa forma, a Eq. (3) captura de modo claro o impacto da radiação solar sobre o desempenho dos enlaces de 60 GHz.

Um outro aspecto crucial refere-se aos componentes da densidade de fluxo integrado das emissões solares ($S = S_q + S_v + S_b$) medidos em SFU (*Solar Flux Unit*), definidos como [13]:

- Componente de fundo (S_q)

$$S_q(f_{\text{GHz}}) \approx 26.4 + 12.4 f_{\text{GHz}} + 1.11 f_{\text{GHz}}^2 \quad \text{SFU} \quad (4)$$

- Variação lenta (S_v)

$$S_v(f_{\text{GHz}}) \approx \frac{0,64 (F_{10} - 70) f_{\text{GHz}}^{0,4}}{1 + 1,56 \left[\ln \left(\frac{f_{\text{GHz}}}{2,9} \right) \right]^2} \quad \text{SFU} \quad (5)$$

- Explosão (S_b).

Esses componentes descrevem, respectivamente, a emissão constante, as variações associadas à rotação do Sol e ao ciclo solar de 11 anos, e as emissões transitórias causadas por explosões na cromosfera e na coroa solar. Tais definições são essenciais para modelar e prever os efeitos da radiação solar sobre a propagação de sinais, principalmente em frequências altas, onde a influência se torna mais pronunciada.

IV. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE ENLACES DE RÁDIO

Nesta seção definimos o processo para estimar o PLE em enlaces de rádio de 25 a 60 GHz sob diferentes níveis de radiação solar. Para isso, usamos interpolação de dados baseadas em modelos teóricos e experimentais, permitindo avaliar a variação do PLE em função da incidência solar e diversificar a análise da perda de caminho em bandas milimétricas. Para isso tomamos como base os trabalhos de Sulyman, Buck e Montano (2020) [12] e Sulyman et al. (2017) [13] que descrevem experimentos realizados em diferentes cenários sobre as frequências de 38 e 60 GHz. No entanto, nas simulações deste trabalho, adotaremos somente o cenário de comunicação D2D (*Device-to-Device*) e a configuração de enlace em LOS, já que esses testes sempre empregaram antenas apontadas para o Sol, garantindo a captação dos raios solares pelo equipamento [13].

Empregou-se uma combinação das equações disponibilizadas neste artigo para as estimativas. Esses valores são comparados com os obtidos por interpolação linear a partir dos PLEs referentes a 38 e 60 GHz também disponibilizados nos mesmos estudos (demonstrado nas colunas 1 a 4 da Tabela 1 tendo como base, F_{10} igual a 300 SFU e S_b igual a 0).

Estimamos os componentes da radiação solar (S_v , S_q e S_b) conforme as equações (4) e (5) e a partir desses valores, calculamos o ΔCNR , utilizando a equação (3). O ΔCNR influencia diretamente o valor do PLE estimado e, consequentemente, o alcance do sinal, mensurado pelas equações (1) e (2), em um ambiente afetado pela radiação solar e pelo ruído de fundo. A figura 1 demonstra a influência de eventos solares extremos sobre o ΔCNR .

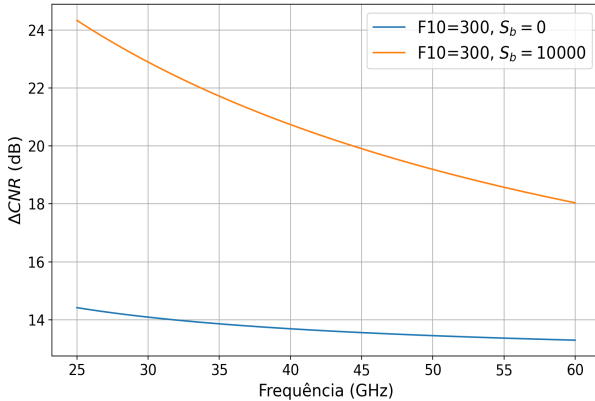


Fig. 1. ΔCNR estimado em um ambiente hipotético a 42 °C, para os casos em que S_b é igual a 0 e igual a 10000 SFU, simulando ambientes sem e com influência intensa de explosões solares ou CMEs, respectivamente. O índice F_{10} é fixado em 300 SFU como valor máximo teórico. O gráfico demonstra que, quando S_b atinge seu valor máximo, os valores teóricos de ΔCNR aumentam significativamente, evidenciando o potencial degradante, dessas condições, para a razão sinal-ruído.

Os valores de PLE foram estimados tomando como referência um PLE teórico de 2 (condição noturna sem influência solar), calcula-se a sua degradação percentual acumulada em função de ΔCNR , conforme detalhado em [13].

A figura 2 demonstra a influência de eventos solares extremos no aumento da perda de percurso.

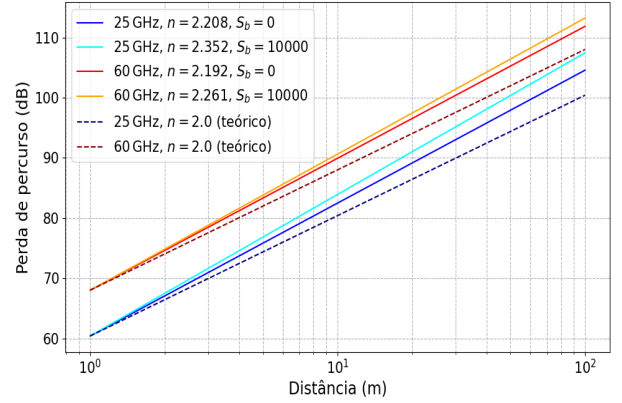


Fig. 2. Comparação da perda de percurso em cenários LOS, nas frequências de 25 e 60 GHz, com S_b igual a 0 e igual a 10000. A análise evidencia que as atividades solares, por meio dos componentes S_v e S_b , acrescentam perdas adicionais ao sinal em seu percurso. Disponibilizamos também as curvas teóricas para $n = 2$ para fins de Referência

Os dados na Tabela I permitem observar que, à medida que a frequência aumenta, ocorre elevação na contribuição total S — principalmente devido ao crescimento de S_q —, mas o efeito resultante em ΔCNR é de redução. Esse decréscimo na razão portadora-ruído, aliado ao aumento natural da perda de percurso em frequências mais altas, provoca aumento na perda de percurso e consequentemente diminuição na potência recebida. Observa-se ainda uma leve redução no expoente de perda de percurso n para S_b igual a 10000 SFU, o que sugere que o impacto da radiação solar tende a se tornar menos relevante em bandas superiores. Tais comportamentos estão em conformidade com as previsões para cenários LOS sob influência solar em 25 a 60 GHz [12] e [13].

O fraco campo magnético da AMAS facilita a entrada de partículas cósmicas [4], o que difere dos experimentos realizados em Riade (Arábia Saudita) e Prescott (Arizona, EUA) por Sulyman, Buck e Montano (2020) [12] e Sulyman et al. (2017) [13], cujas regiões possuem campo mais intenso e, portanto, não refletem as condições brasileiras. Diante da escassez de medições em áreas de menor intensidade magnética, torna-se fundamental conduzir testes de campo sobre efeito da AMAS para quantificar os componentes S_q , S_v e S_b . Além disso, como é visto que os ciclos solares podem modular a irradiância total [1] e [4] e consequentemente elevar esses mesmos componentes, espera-se que o aumento do fluxo solar intensifique ainda mais a perturbação na propagação de sinais de rádio nessas regiões.

V. EFEITO DA RADIAÇÃO SOLAR EM REDES DE ACESSO RÁDIO

Nesta seção, é avaliado o desempenho de uma rede de acesso sem fio 5G quando o PLE (n) varia conforme as emissões de radiação solar. Este estudo é realizado usando o simulador SAMA.

O SAMA é um simulador de redes 5G focado no desempenho da camada física em RAN (*Radio Access Network*) [7]. Desenvolvido em Python com arquitetura modular, permite avaliar índices de desempenho da rede de acesso como capacidade, latência, eficiência espectral, *throughput* e justiça na alocação de recursos. Para isso, o SAMA modela estações-base

TABELA I

COLUNAS 1 A 4: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE PLE ESTIMADO E POR INTERPOLAÇÃO LINEAR COM $F10 = 300$ SFU (VALOR MÁXIMO TEÓRICO FIXADO) E $S_b = 0$; COLUNA 1 E RESTANTES: DADOS REFERENTES À INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR EM FREQUÊNCIAS DE 25 A 60 GHz, COM S_b FIXO EM 10 000.

Freq. (GHz)	PLE Es- timado	PLE por Interpola- ção Linear	Diferença dos PLEs (%)	S_q (SFU)	S_r (SFU)	S (SFU)	Δ CNR (dB)	PLE com S_b igual a 10000	PL(d_0) (dB)	PL(d) (dB)
25	2,208	1,986	11,20	1030,15	64,74	11094,89	24,33	2,352	60,40	107,44
26	2,207	1,995	10,65	1099,16	63,71	11162,87	24,02	2,347	60,74	107,69
27	2,206	2,005	10,04	1170,39	62,76	11233,15	23,72	2,343	61,07	107,93
28	2,205	2,015	9,45	1243,84	61,88	11305,72	23,43	2,339	61,38	108,16
29	2,205	2,024	8,92	1319,51	61,06	11380,57	23,16	2,335	61,69	108,39
30	2,204	2,034	8,35	1397,40	60,30	11457,70	22,89	2,331	61,98	108,61
31	2,203	2,043	7,83	1477,51	59,58	11537,09	22,64	2,327	62,27	108,82
32	2,202	2,053	7,27	1559,84	58,92	11618,76	22,40	2,324	62,54	109,02
33	2,202	2,062	6,77	1644,39	58,30	11702,69	22,16	2,320	62,81	109,22
34	2,201	2,072	6,23	1731,16	57,71	11788,87	21,94	2,317	63,07	109,42
35	2,200	2,081	5,74	1820,15	57,16	11877,31	21,72	2,314	63,32	109,60
36	2,200	2,091	5,21	1911,36	56,64	11968,00	21,51	2,311	63,57	109,79
37	2,199	2,100	4,73	2004,79	56,15	12060,94	21,31	2,308	63,81	109,97
38	2,199	2,110	4,21	2100,44	55,68	12156,12	21,11	2,305	64,04	110,14
39	2,198	2,120	3,70	2198,31	55,24	12253,55	20,92	2,303	64,26	110,31
40	2,198	2,129	3,24	2298,40	54,82	12353,22	20,74	2,300	64,48	110,48
41	2,198	2,139	2,74	2400,71	54,43	12455,14	20,56	2,297	64,70	110,64
42	2,197	2,148	2,29	2505,24	54,05	12559,29	20,39	2,295	64,91	110,80
43	2,197	2,158	1,79	2611,99	53,69	12665,68	20,22	2,292	65,11	110,96
44	2,196	2,167	1,36	2720,96	53,34	12774,30	20,06	2,290	65,31	111,11
45	2,196	2,177	0,87	2832,15	53,02	12885,17	19,90	2,288	65,51	111,26
46	2,196	2,186	0,44	2945,56	52,70	12998,26	19,75	2,286	65,70	111,41
47	2,195	2,196	0,03	3061,19	52,40	13113,59	19,61	2,284	65,88	111,55
48	2,195	2,205	0,45	3179,04	52,12	13231,16	19,46	2,281	66,07	111,70
49	2,195	2,215	0,91	3299,11	51,84	13350,95	19,33	2,279	66,25	111,83
50	2,195	2,225	1,37	3421,40	51,58	13472,98	19,19	2,278	66,42	111,97
51	2,194	2,234	1,78	3545,91	51,32	13597,23	19,06	2,276	66,59	112,11
52	2,194	2,244	2,23	3672,64	51,08	13723,72	18,93	2,274	66,76	112,24
53	2,194	2,253	2,63	3801,59	50,84	13852,43	18,81	2,272	66,93	112,37
54	2,194	2,263	3,07	3932,76	50,62	13983,38	18,69	2,270	67,09	112,49
55	2,193	2,272	3,47	4066,15	50,40	14116,55	18,57	2,269	67,25	112,62
56	2,193	2,282	3,90	4201,76	50,19	14251,95	18,46	2,267	67,41	112,74
57	2,193	2,291	4,28	4339,59	49,99	14389,58	18,35	2,265	67,56	112,87
58	2,193	2,301	4,71	4479,64	49,79	14529,43	18,24	2,264	67,71	112,99
59	2,192	2,310	5,09	4621,91	49,61	14671,52	18,14	2,262	67,86	113,10
60	2,192	2,320	5,51	4766,40	49,42	14815,82	18,04	2,261	68,00	113,22

capazes de *beamforming*, usuários com perfis e distribuições espaciais variados, e incorpora modelos avançados de canal. Suporta duplexação FDD (*Frequency Division Duplexing*) e TDD (*Time Division Duplexing*) e implementa diferentes algoritmos de escalonamento: RR (*Round Robin*), BCQI (*Best Channel Quality Indicator*) e *Proporcional Fair*. Podendo ser configurado para avaliar os três perfis de serviço 5G (eMBB, URLLC e mMTC).

A simulação RAN 5G contou com quatro estações rádio-base, cada uma com três setores, potência de transmissão de 20 dBm, raio de atuação de 100 m e escalonamento dos usuários via RR, atendendo 900 terminais distribuídos em uma área de 400×400 m. O intuito desse experimento é evidenciar o impacto combinado do expoente de perda de caminho e da frequência portadora sobre o desempenho dos usuários. As métricas — SNR, *throughput* instantâneo (banda e capacidade) e tempo de uso — são, portanto, medidas do ponto de vista de cada terminal.

Os resultados comparativos para $n = 2,0$ (condição de referência, sem influência da radiação solar), $n = 2,331$ (30 GHz) e $n = 2,261$ (60 GHz) estão exibidos nas Tabelas II, III, IV e V.

Em *downlink*, o melhor desempenho ocorreu em 30 GHz com $n = 2$, em que a SNR média alcançou cerca de 30,1 dB e a capacidade média por usuário 14,0 Mbps. Mantendo $n = 2$ e

subindo para 60 GHz, observa-se queda para aproximadamente 28,1 dB de SNR e 13,6 Mbps de capacidade, reflexo da maior atenuação em frequência mais alta. Quando o expoente cresce para 2,261 em 60 GHz, esses valores caem ainda mais — para cerca de 26,0 dB e 13,2 Mbps — e, em 30 GHz com $n = 2,331$, a SNR média recua para 27,9 dB e a capacidade para 13,8 Mbps. No *uplink*, a potência limitada dos terminais levou a SNRs negativas (de $-15,3$ dB a $-25,4$ dB) e a capacidade decresceu de 10,5 Mbps no melhor cenário para 4,3 Mbps no pior, com o caso intermediário (30 GHz, $n = 2,331$) registrando 6,7 Mbps.

A banda média alocada por usuário permaneceu praticamente inalterada em todos os testes ($\approx 2,17$ – $2,18$ Mbps) e o tempo médio de uso do canal variou pouco, entre 0,042 ms (cenários com $n > 2$) e 0,047 ms (60 GHz, $n = 2$), indicando a adoção de política fixa de agendamento de recursos.

Como conclusão dos testes, fica evidente que a combinação do simulador com o LDM demonstra que tanto o aumento do expoente de perda de caminho n quanto a operação em frequência mais alta (30 GHz versus 60 GHz) resultam em diminuição sistemática da qualidade de sinal (SNR) e do *throughput* disponível por usuário.

VI. CONCLUSÕES

O presente estudo destacou a complexa interação entre as atividades solares e os sistemas modernos de telecomunica-

TABELA II

ÍNDICES DE DESEMPENHO NO CENÁRIO RAN COM $n = 2$ E FREQUÊNCIA EM 30 GHz (SEM EFEITO DA RADIAÇÃO SOLAR).

Métrica	Downlink Média	Downlink Desvio	Uplink Média	Uplink Desvio
SNR Médio (dB)	30,0762	12,3807	-15,3394	0,2598
Desvio SNR (dB)	4,8249	0,9943	2,8996	0,3813
Capac. Média (Mbps)	14,0429	0,5997	10,5379	4,8070
Desvio Capac. (Mbps)	6,3618	2,7184	8,1726	4,9136
Banda Média (Mbps)	2,1764	0,9715	2,1764	0,9715
Desvio Banda (Mbps)	13,5233	5,5030	13,5244	5,5025
Tempo Médio Uso (ms)	0,0448	0,0132	0,0448	0,0132

TABELA III

ÍNDICES DE DESEMPENHO NO CENÁRIO RAN COM $n = 2$ E FREQUÊNCIA EM 60 GHz (SEM EFEITO DA RADIAÇÃO SOLAR).

Métrica	Downlink Média	Downlink Desvio	Uplink Média	Uplink Desvio
SNR Médio (dB)	28,0845	10,0319	-20,4261	0,3327
Desvio SNR (dB)	4,4879	0,6120	2,2287	0,1260
Capac. Média (Mbps)	13,5467	0,8522	7,2618	3,4639
Desvio Capac. (Mbps)	6,0890	2,6755	5,2067	3,0809
Banda Média (Mbps)	2,1744	0,9707	2,1744	0,9707
Desvio Banda (Mbps)	13,4533	5,4925	13,4523	5,4921
Tempo Médio Uso (ms)	0,0469	0,0100	0,0469	0,0100

TABELA IV

ÍNDICES DE DESEMPENHO NO CENÁRIO RAN COM $n = 2,331$ E FREQUÊNCIA EM 30 GHz.

Métrica	Downlink Média	Downlink Desvio	Uplink Média	Uplink Desvio
SNR Médio (dB)	27,8983	9,4838	-21,1547	0,4771
Desvio SNR (dB)	4,2775	0,6407	2,1879	0,1957
Capac. Média (Mbps)	13,7755	1,1594	6,7449	3,2560
Desvio Capac. (Mbps)	5,1353	2,1041	3,7302	2,1013
Banda Média (Mbps)	2,1794	0,9745	2,1794	0,9745
Desvio Banda (Mbps)	13,2782	5,4328	13,2780	5,4364
Tempo Médio Uso (ms)	0,0424	0,0108	0,0424	0,0108

TABELA V

ÍNDICES DE DESEMPENHO NO CENÁRIO RAN COM $n = 2,261$ E FREQUÊNCIA EM 60 GHz.

Métrica	Downlink Média	Downlink Desvio	Uplink Média	Uplink Desvio
SNR Médio (dB)	26,0467	7,8732	-25,4164	0,6396
Desvio SNR (dB)	4,0166	0,4397	1,9373	0,2870
Capac. Média (Mbps)	13,1988	1,5535	4,3286	2,1637
Desvio Capac. (Mbps)	5,2339	2,2208	2,4870	1,3748
Banda Média (Mbps)	2,1793	0,9780	2,1793	0,9780
Desvio Banda (Mbps)	13,3497	5,4741	13,3485	5,4726
Tempo Médio Uso (ms)	0,0424	0,0111	0,0424	0,0111

ções, com ênfase na vulnerabilidade das frequências de ondas milimétricas utilizadas pelo 5G. Os resultados indicaram que a variabilidade do fluxo solar pode provocar degradação da razão sinal-ruído e aumentar a perda de percurso, afetando a qualidade e confiabilidade das transmissões. Além disso, a localização geográfica do Brasil, em relação à Anomalia Magnética do Atlântico Sul, pode agravar esses efeitos, tornando fundamental a realização de testes específicos para esse contexto devido a ausência de dados que retrate essa condição o que fica como sugestão trabalhos futuros.

Nosso estudo destacou a complexa interação entre as atividades solares e os sistemas modernos de telecomunicações, com ênfase na vulnerabilidade das frequências de ondas milimétricas do 5G. Os resultados indicaram que a variação do fluxo solar pode degradar a razão sinal-ruído e aumentar a perda de percurso, comprometendo a qualidade e a confiabilidade das transmissões. Além disso, devido à posição geográfica do Brasil em relação à Anomalia Magnética do Atlântico Sul, esses efeitos podem ser ainda mais acentuados. Sugerimos a realização de testes específicos para esse contexto, visto que não dispomos de dados que retratem adequadamente essa condição, o que deverá ser explorado em trabalhos futuros.

Análises matemáticas permitiram avaliar teoricamente os impactos da radiação solar em enlaces isolados de rádio na faixa de 25 a 60 GHz, enquanto simulações computacionais possibilitaram identificar padrões estatísticos e examinar o desempenho da rede 5G operando em 30 e 60 GHz. Os resultados indicaram uma redução significativa na qualidade do sinal, o que exige maior esforço operacional do sistema para mitigar os efeitos da degradação, especialmente durante períodos de intensa atividade solar.

Por fim, este estudo sugere como reforço em um eventual cenário degradante, a adoção de AMC mais robusto, no qual o tradicional mecanismo de decisão baseado em limiares estáticos de SNR seja substituído por um modelo de aprendizado profundo, como o apresentado por Manikandan et al. (2025) [15].

REFERÊNCIAS

[1] VALIO, A. Sob a influência do Sol: como o clima espacial afeta nosso planeta. *Cadernos de Astronomia*, Vitória, v. 5, n. 2, p. 30–45, 2024.

[2] SANTARINE, G. A.; DOMINGOS, R. N. *Tempestades Geomagnéticas e o Evento Carrington*. *Holos Environment*, v. 14, n. 1, p. 103–113, 2014.

[3] OLIVEIRA, D. M.; SILVEIRA, M. V. D. *Reação da termosfera a tempestades geomagnéticas*. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, n. 3, p. e3305, 2017.

[4] ALMEIDA, V.; GOMES, J.; GONÇALVES, R. AMAS: Anomalia Magnética do Atlântico Sul. *e-Boletim da Física*, v. 11, 2023.

[5] DUTRA, R. S.; et al. Efeitos do vento solar na magnetosfera terrestre: uma abordagem didática dos cinturões de Van Allen. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, e20190164, 2020.

[6] OLIVEIRA, C. E. Q. V. DE; VIEIRA, L. E. A.; FERREIRA, J. L. Um olhar para o Geomagnetismo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 46, p. e20240204, 2024.

[7] RODRIGUES, C. F. F.; LOVISOLO, L.; MELLO, L. A. R. S. Alocação de Recursos da interface aérea 5G a partir de um critério de utilidade, *XL Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrt2022)*, out. 2022.

[8] LIN, Xingqin et al. *5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology*. *IEEE Communications Standards Magazine*, v. 3, p. 30–37, 2019.

[9] RAPPAPORT, T. S.; et al. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—With a Focus on Propagation Models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 65, n. 12, p. 6213–6230, dez. 2017.

[10] PINTO, E.L.; de ALBUQUERQUE, C. P. A técnica de transmissão OFDM. *Revista Científica Periódica – Telecomunicações*, v. 05, n. 01, jun. 2002.

[11] MURATORE, G.; GIANNINI, T.; MICHELI, D. Solar radio emission as a disturbance of radiomobile networks. *Scientific Reports*, v. 12, p. 9324, 2022.

[12] SULYMAN, A. I.; BUCK, S.; MONTANO, T. J. Effects of Solar Radio Emissions on Outdoor Radio Propagation at 38 GHz Bands for D2D Communications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 19, n. 5, p. 741-745, maio 2020.

[13] SULYMAN, A. I.; et al. Effects of Solar Radio Emissions on Outdoor Propagation Path Loss Models at 60 GHz Bands for Access/Backhaul Links and D2D Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 65, n. 12, p. 6624–6635, 2017.

[14] ECHER, E.; et al. O número de manchas solares: índice da atividade do Sol. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, n. 2, p. 157–163, jun. 2003.

[15] ARUNACHALAM, M.; et al. Generative adversarial networks based adaptive modulation and coding for next-generation 5G communication systems. *Discover Applied Sciences*, v. 7, jan. 2025.