

Avaliação de *Dual-Function* em Redes 6G na Detecção de *Landslide*

Pedro Manoel Ribeiro Rosa, Kleber Vieira Cardoso e Antonio Oliveira-Jr

Resumo— Este artigo simula o conceito ISAC na rede 6G para detecção de deslizamento (*landslide*) de uma encosta/morro. No Brasil, há vários deslizamentos no período chuvoso, gerando destruição de patrimônio e vítimas fatais, portanto, torna-se relevante implementar um sistema de alerta antecipado de *landslide* utilizando a rede 6G. Com vistas à viabilidade desse emprego (*dual-function*), analisamos a qualidade do serviço, tanto na detecção RADAR quanto na comunicação clássica (voz e dados), identificando as perdas de símbolos, a distorção entre o sinal gerado e o esperado, bem como a dispersão de energia nos lóbulos laterais da irradiação.

Palavras-Chave— 6G, *Landslide*, OFDM, ISAC, RADAR.

Abstract— This article simulates the ISAC concept on a 6G network for detecting landslides on a slope/hill. In Brazil, several landslides occur during the rainy season, resulting in property destruction and fatalities. Therefore, implementing a landslide early warning system using the 6G network is crucial. To assess the feasibility of this dual-function application, we analyze the quality of service for both radar detection and conventional communication (voice and data), identifying symbol losses, distortion between the generated and expected signals, and energy dispersion in the radiation side lobes.

Keywords— 6G, *Landslide*, OFDM, ISAC, RADAR.

I. INTRODUÇÃO

Deslizamentos de terra ou *landslide* caracteriza-se por uma movimentação do solo atípica, proveniente do escorregamento da massa de terra, partes rochosas ou detritos ao longo de encostas/morros. As causas mais prováveis decorrem de fatores naturais provocados por fortes chuvas aliado às características de solo e relevo. Fatores antrópicos como desmatamento dessas encostas e/ou construções urbanas irregulares favorecem o *landslide*, conforme [1].

De acordo com [3], o *landslide* apresenta ampla distribuição, forte ocultação e alta frequência de ocorrência, dificultando a identificação precisa do ponto de deslizamento. Em seu trabalho, há uma revisão sobre os métodos de *Landslide Susceptibility Prediction* (LSP) sendo um dos principais tópicos de pesquisa em identificação de potenciais deslizamentos, avaliação de riscos e perigos de deslizamentos, bem como controle de deslizamentos e planejamento do uso do solo.

O estudo de [4] apresenta o lado econômico dos danos gerados pelo *landslide*, alcançando o prejuízo de 20 bilhões de dólares por ano, entre 2004 e 2019, além das mortes de 70.000 pessoas em todo o mundo. Somente nos dois primeiros meses de 2024, há relatos de 74 mortes e milhares de outras feridas. Nesse cenário, estima-se um aumento real da recorrência de *landslide* devido às condições climáticas

globais e as tendências de mudanças ambientais, soma-se a isso, a capacidade atual de identificar o *landslide* iminente, bem como avaliar de modo dinâmico o risco às comunidades urbanas para a prevenção da vida.

No Brasil, conforme o trabalho de [5], mais de 8 milhões de pessoas vivem em áreas propensas a desastres do tipo *landslide* e, mesmo tendo grande parte das áreas de risco mapeadas, esse tipo de calamidade continua ocorrendo anualmente, isto porque tanto as políticas públicas quanto os mecanismos de alerta antecipado são ineficientes. Ainda, foi realizada uma revisão de dados sobre mortes por catástrofes naturais, entre os anos de 1948 a 2023, obtendo uma estimativa de 11 milhões de pessoas mortas, tendo cerca de 13 mil mortes ocasionadas por *landslide*.

Em [6] foram descritos alguns métodos para identificar e alertar o *landslide*, como avaliação por meio de *Deep Learning* (DL), *Application of Recurrent Neural Networks* (RNNs) e *Convolutional Neural Networks* (CNNs), ainda, expõe a integração de tecnologias de sensoriamento remoto mesclando imagens obtidas via satélite incluindo o uso de *Light Detection and Ranging* (LiDAR), aplicando modelos treinados em DL para aprimorar a detecção de *landslide*.

Trabalhos como [7], [8] e [9] apontam a viabilidade de utilizar a tecnologia da rede de Sexta Geração (6G) para o monitoramento ambiental, a fim de compreender e gerenciar os efeitos da atividade humana nesses ecossistemas. Os resultados apontaram que as redes de sensoriamento remoto baseadas em rede 6G podem contribuir para esse tipo de monitoramento e permitir uma tomada de decisão mais assertiva na predição de desastres ambientais.

O método ISAC, apresentado em [14], mostra algumas das características que a rede 6G precisa desempenhar, por exemplo, a capacidade de realizar sensoriamento com alta resolução. Isto significa dizer que, além da comunicação clássica (voz e dados), a rede 6G desempenhará também a função de *Radio Detection and Range* (RADAR). Ademais, o ISAC deverá proporcionar recursos localização, geração de imagens e reconstrução ambiental e, ainda, melhorar o desempenho da comunicação clássica, ao mesmo tempo, favorecer um cenário amplo para diversos serviços de rede.

O estudo de [14] apresenta técnicas como *Perceptive Mobile Network* (PMN), *Joint Communication and RADAR Sensing* (JCAS), *Wireless Communications and RADAR/Radio Sensing* (C&S) e *Integrated Sensing and Communications* (ISAC) que permitem o sistema de comunicação clássica ser capaz de realizar a detecção de objetos, expandindo a aplicação da rede 6G.

Diante o exposto, nosso estudo simula o uso *dual-function* da rede 6G empregando as técnicas de ISAC na detecção

RADAR, analisando o comportamento dos sinais a fim de verificar o uso no alarme antecipado de *landslide*. Desse modo, avaliaremos os resultados obtidos quanto à qualidade do sinal da comunicação clássica bem como a acuracidade de sua detecção.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Sobre a técnica de *dual-function* em rede 6G, alguns trabalhos foram selecionados a fim de orientar a pesquisa e, por oportuno, mostrar as soluções e métodos existentes que contribuem para o ISAC tornar-se uma realidade nas comunicações clássicas da rede 6G.

Os trabalhos de [10] e [11] trazem o estudo sobre a aplicação da rede 6G em (RADAR) propondo seu uso *dual-function*, ou seja, a rede 6G irá operar tanto na comunicação clássica (voz e dados) quanto na detecção de objetos, incluindo, ainda, a concepção da detecção de sinais vitais pela técnica RADAR *Sensing*. Isso torna-se possível pela utilização de algumas das subportadoras da modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) empregada na rede 6G.

Ainda, no trabalho de [11], é explicado o método *Communications-RADAR Spectrum Sharing* (CRSS), que foi modelado com o propósito de compartilhar o RADAR *Sensing* e a comunicação clássica, porém operando de modo oportunista, ou seja, os sistemas devem operar em intervalos distintos, isto é, o sistema de comunicação clássica somente transmite quando o sistema de RADAR *Sensing* não estiver irradiando, portanto, não sendo possível seu funcionamento simultâneo.

O trabalho de [12] revela o uso da técnica RADAR aplicada na modulação OFDM em redes de comunicação clássica, tanto da Quarta Geração (4G) quanto na Quinta Geração (5G), logo no início da década de 2010. Esse uso, em *dual-function*, apresentou fortes impactos negativos na comunicação clássica e na detecção RADAR, como o atraso excessivo e o processamento Doppler¹, sendo mitigados por meio da *Fast Fourier Transform* (FFT) e da *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT).

O trabalho de [13] traz três características importantes sobre o ISAC. A primeira, seu design visa alcançar uma transmissão de dados eficiente e confiável, requerendo alta eficiência espectral e uma capacidade de não interferência, além de mitigar o desvanecimento do canal. A segunda, a função RADAR deve alcançar a detecção de alvo com alta resolução requerendo boa autocorrelação, grande largura de banda de sinal, larga faixa dinâmica e grande mudança de frequência Doppler. A terceira, se refere ao processamento do sinal, onde é necessário projetar algoritmos de alta precisão e baixa complexidade para melhorar a acuracidade de detecção com recursos de computação limitados.

O trabalho de [14] trata os detalhes da tecnologia *Synthetic Aperture* (SAR) como ferramenta de mapeamento/sensoriamento remoto do solo, que também emprega a modulação OFDM, obtendo imagens 4D (quatro dimensões) além da comunicação clássica. Vale mencionar que esses

¹Caracteriza-se pela mudança da frequência de um sinal eletromagnético quando há movimento relativo entre a fonte do sinal e o objeto/alvo incidido.

radars estão embarcados tanto em satélites como nas aeronaves/drones conseguindo fornecer alta resolução.

Considerando os *Releases* 16 e 17 do 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP), no tocante a infraestrutura de antenas previstas para 5G/*Beyond Five Generation* (B5G)/6G, e considerando os conceitos de ISAC e C&S descritos, torna-se possível cobrir uma região de interesse para detecção de *landslide* aproveitando o conjunto de antenas localizadas nessa área.

III. METODOLOGIA

Nessa seção apresentamos conceitualmente o método ISAC aplicado na modulação OFDM e, nesse contexto, destacamos o sinal de referência para a filtragem do eco de resposta, a fim de extrair as informações sobre o objeto/alvo incidente, tornando possível mitigar os problemas inerentes em sistemas de radiodeterminação, como desvanecimento do canal, sinal mínimo, multi-caminho etc. No geral, o processamento consiste em retirar o sinal refletido (eco) via divisão de cada elemento componente da subportadora, para tanto, o padrão do sinal transmitido deve ser conhecido pelo receptor.

Conforme [15], a Equação (1) parametriza a modulação OFDM, onde $d(\mu N_c + n)$ corresponde aos dados do usuário carregados em cada subportadora, sendo representada pela Figura 1.

$$s(t) = \sum_{\mu=0}^{N_{sym}-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} \left(d(\mu N_c + n) \exp(2j\pi f_n t) \text{rect} \left(\frac{t - \mu T_{OFDM}}{T_{OFDM}} \right) \right) \quad (1)$$

TABELA I
DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS NA EQ. 1.

Descrição	Variável
Quantidade de símbolos	μ
Quantidade de Subportadoras	N
Frequência da Enésima Subportadora	f_n
Duração do Símbolo OFDM	T_{sym}
Função Retangular Sobre o Sinal Modulado	$\text{rect}()$

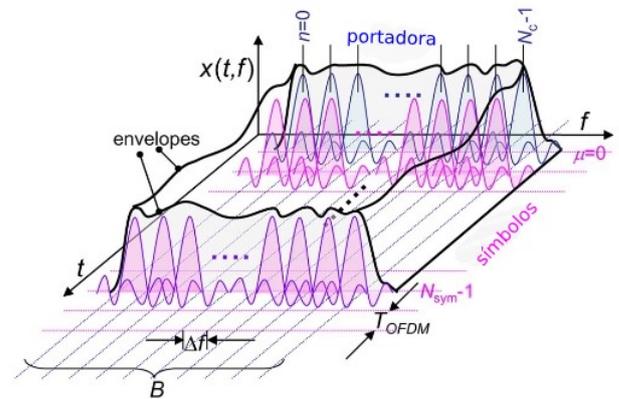


Fig. 1. Estrutura da OFDM pela Equação 1, de [15].

Ainda, de acordo com [15], em uma modulação multiportadora, um único *chirp*² pode ocasionar a diminuição da taxa

²Um *chirp* é um sinal cuja frequência aumenta ou diminui com o tempo.

de transmissão de dados na comunicação clássica, porque esse *chirp* é *quasi-orthogonality* em relação à subportadora adjacente. Por outro lado, se agruparmos um grupo de *chirps* nas subportadoras que não estejam sendo utilizadas na comunicação clássica, podemos realizar a detecção RADAR sem prejuízo nas demais subportadoras, baseando-se na Equação (2).

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{1}{T}\right) \exp(j2\pi f_k t + j\pi \mu t^2), k = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

Estimando que a frequência da portadora será $f_k = f_0 + k\Delta f$ e a função retangular do sinal $\text{rect}\left(\frac{1}{T}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{else} \end{cases}$, esses sinais *chirp* podem alcançar ortogonalidade entre si, vindo a melhorar a utilização do canal e as taxas de transferência de dados, embora, quando a taxa de sobreposição de largura de banda for inferior a 25%, a detecção do eco poderá ser ignorada. Importante notar que, na etapa de demodulação, os sinais carregados com dados do usuário são usados para restauração de dados e os demais sinais utilizados para determinação do limiar de detecção, sendo parte do processamento do sinal de radar.

Os autores de [13] apresentam a combinação da modulação OFDM com outras modulações, por exemplo, a modulação *Linear Frequency Modulated* (LFM), a fim de melhorar o desempenho ISAC. Essa estratégia tem sido abordada para otimizar, entre outros fatores, a função de ambiguidade, melhorar a capacidade isolamento do sinal (anti-interferência), redução da *Peak-To-Average Power Ratio* (PAPR) e melhorar a resolução dos alvos à longa distância. O sinal LFM consiste de um sinal contínuo de frequência aplicado na detecção RADAR de alta precisão, tendo sua frequência alterada em função do tempo. O processamento do retorno desse sinal (eco) contém atraso e mudança de frequência Doppler, desse modo, é possível obter a distância e a velocidade do alvo. A Equação (3) mostra a combinação da OFDM com a LFM, chamada de ISAC OFDM-LFM, e permite tanto a melhora na sensibilidade Doppler como reduz o erro de estimativa da velocidade do alvo.

$$s(t) = \exp\left(j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2\right)\right) \text{rect}\left(\frac{t - T_{LFM}}{T_{LFM}}\right) \quad (3)$$

Onde, T_{LFM} é a duração do sinal modulado LFM e f_0 a frequência inicial, sendo k a taxa de *chirp* da modulação, sendo possível inferir que a frequência instantânea do sinal LFM irá aumentar em função do tempo, necessitando de grande largura de banda durante esse tempo para realizar a detecção RADAR com alta resolução.

Comparando o sinal gerado pela Equação (1) com o sinal OFDM-LFM da Equação (2), verifica-se que foi adicionado o termo $\exp(j\pi k^2 t)$ para reduzir o *Bit Error Rate* (BER) da comunicação clássica e tentar melhorar a resolução da estimativa de distância do alvo/objeto.

A Figura 2, de [16], mostra o diagrama bloco construído para a *dual-function*, ou seja, inclui na comunicação clássica da OFDM o processamento de sinais RADAR, via OFDM-LFM, por meio dos blocos *Chirp* e *Dechirp*.

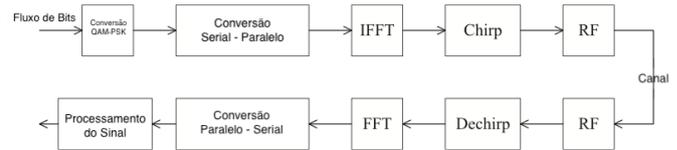


Fig. 2. Diagrama Bloco da OFDM-LFM, de [16].

IV. AVALIAÇÃO E DESEMPENHO

Nessa seção implementamos e executamos a simulação *dual-function* com base nos trabalhos apresentados e considerando os *landslides* no Brasil, conforme o mosaico de imagens da Figura 3, extraídas de [2], podemos perceber a existência de certa infraestrutura urbana nessas localidades. Portanto, é possível inferir que há cobertura de redes de comunicação clássica, seja 4G/5G, que possibilite sua migração para a 6G e, conseqüentemente, aplicação *dual-function* ISAC.



Fig. 3. Mosaico de *Landslides* no Brasil, de [2].

Assim, utilizamos a plataforma MATLAB® (2022b) para configurar o cenário de detecção RADAR com *landslide*, sendo utilizada a estrutura do *frame* da modulação OFDM, frequência inicial de 7GHz com 20MHz de largura de banda, com 100 *Resource Blocks* (RB), gerando um total de 1.200 subportadoras a fim de destinar parte delas para a detecção RADAR. A Figura 4 ilustra 1 *frame* composto por 20 *subframes*, em 1 *slot* de 10ms, mostrando a capacidade de símbolos transportados em cada RB.

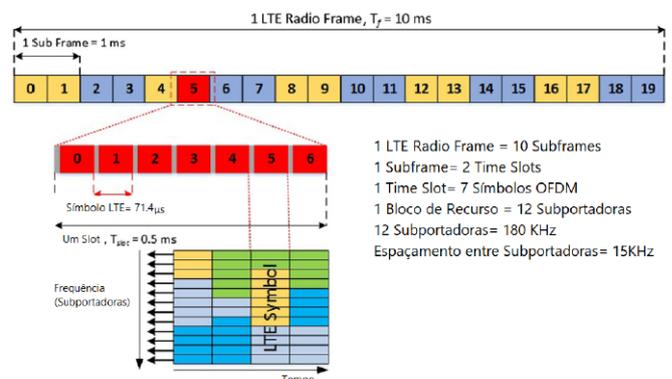


Fig. 4. Estrutura do Frame da OFDM 4G/5G/B5G/6G, do autor.

Considerando os requerimentos da 6G, previstos nos *Releases* 16 e 17 da 3GPP, a nova infraestrutura de comunicação

clássica prevê a instalação de *arrays* de antenas para a cobertura de sinal, formando micro regiões, chamadas de *microcell*³, diferenciado-se da macro região (*macrocell*) empregada na 4G/5G/B5G. Isso é necessário para que seja obtida, além da abrangência da cobertura de sinal, baixa latência, resposta ultra rápida e alta confiabilidade de conexão entre o *User Equipment* (UE) e a rede 6G.

A Tabela II apresenta os parâmetros mais significativos que estão presentes, tanto na modulação da comunicação clássica OFDM quanto no emprego *dual-function* RADAR, no conceito ISAC.

TABELA II
Dataset da Simulação

Descrição e Valores Utilizados	
Frequências de Operação (inicial)	7 Giga Hertz (GHz)
<i>Uniform Linear Arrays</i> (ULA)	16
Tipo das Antenas	Direcionais
Espaçamento entre as Antenas	$\frac{1}{2}\lambda$ Freq. Op.
Potência de Pico de Transmissão	0,5 Mega Watt (MW)
Quantidade de UE (K)	10
Quantidade de Símbolos (M)	16
Modulação <i>Binary Phase Shift Keying</i> (BPSK)	4
Número de Alvos	1
<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (SNR)	6 decibel (dB)
<i>Constant False Alarm Rate</i> (CFAR)	10^7
RADAR <i>Cross Section</i> (RCS)	$112 m^2$
Duração do Subpulso (τ)	0,25 segundos (s)
<i>Band Width</i> (BW)	10 Mega Hertz (MHz)
<i>Pulse Repetition Frequency</i> (PRF)	15 Kilo Hertz (KHz)
<i>Trade-off</i> RADAR x Comunicação Clássica (ρ)	0,3

Nas simulações, foram incluídas as frequências de 77GHz e 100GHz, uma vez que essas frequências são candidatas para a rede 6G. Pela Equação 4, calculamos a RCS do morro/encosta, onde σ é a RCS, S_i é a densidade de potência incidente medida no alvo/objeto, e S_s é a densidade de potência espalhada/refletida medida pela distância r do alvo/objeto.

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{S_s}{S_i} \quad (4)$$

Consideramos uma encosta de 12m de altura, 60° de inclinação em relação à sua base, 6m de raio e estimando 25% a relação $\frac{S_s}{S_i}$, obtemos o valor de $\approx 112m^2$ para a RCS. A antena direcional da *Base Estation* (BS) transmitirá o sinal com abertura de 45°, distante 200m da encosta, com a *Line of Signal* (LoS) sem qualquer obstáculo.

A Equação 5 mostra como o método ISAC torna-se possível, por meio da construção da matriz \mathbf{H} , referente aos canais, e outra \mathbf{X} , referente às modulações. Assim, os dados de *down-link*, recebidos pelo usuário, será o produto de \mathbf{H} por \mathbf{X} . Desse modo, o conjunto de portadoras *dual-function* incorpora tanto os símbolos da comunicação clássica quanto as portadoras RADAR, de forma que o sinal recebido \mathbf{HX} esteja o mais próximo possível do conjunto de símbolos de comunicação (\mathbf{S}), para tanto, deve-se minimizar o resultado da diferença de $(\mathbf{HX} - \mathbf{S})$, conhecida como *Multi-User Interference* (MUI).

³*Microcell* é uma pequena BS que cobre uma micro região, cerca de 2,5Km, suportando até 200 conexões.

$$\min_{\mathbf{X}} \rho \|\mathbf{HX} - \mathbf{S}\|_F^2 + (1 - \rho) \|\mathbf{X} - \mathbf{X}_0\|_F^2 \quad (5)$$

Por outro lado, se ρ for próximo de 0, teremos um bom desempenho da função RADAR, uma vez que os sinais recebidos estarão bem próximos dos sinais modulados, dessa forma, isso eleva o resultado de MUI, ocasionando um desempenho ruim na comunicação clássica. De outro modo, quando ρ for se aproximar de 1, resulta em bom desempenho da comunicação clássica e, conseqüentemente, a degradação do desempenho RADAR, uma vez que os sinais recebidos estarão diferentes dos sinais gerados.

A Figura 5 mostra os três sinais gerados como parâmetros iniciais de verificação, sendo um sinal de referência para comparar com os sinais RADAR e ISAC, *dual-function*, a fim de certificar que os sinais estão sendo produzidos com amplitude, ângulo e forma esperados. Vale mencionar que esses sinais são somente as portadoras, livre de qualquer carga de informação.

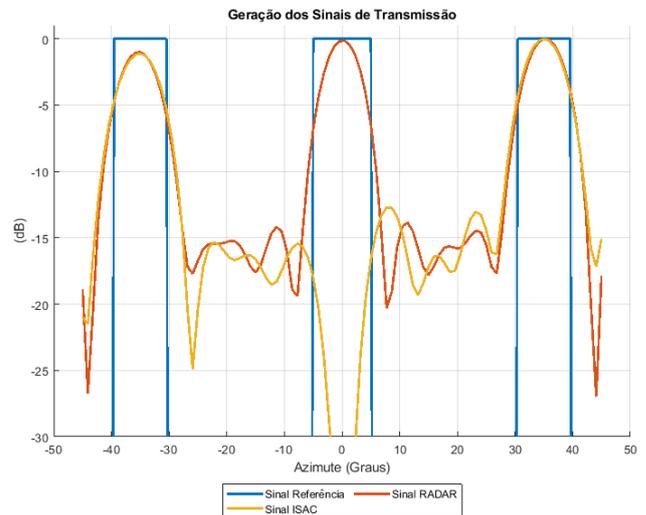
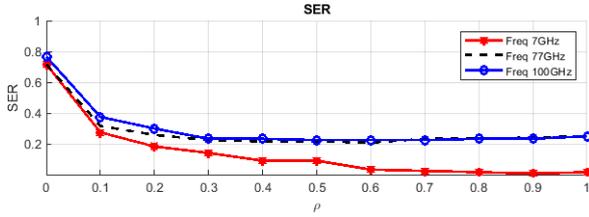
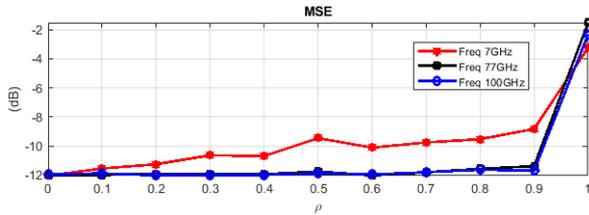


Fig. 5. Sinais de Referência.

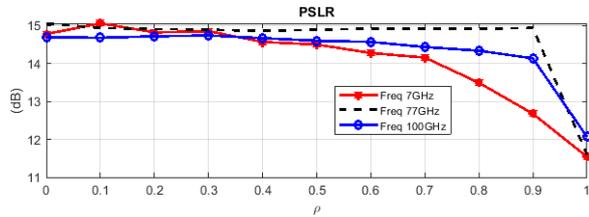
Sendo assim, calculamos o *Symbol Error Rate* (SER), *Mean Squared Error* (MSE) e o *Peak to Sidelobe Level Ratio* (PSLR) para identificarmos o comportamento da qualidade dos sinais ISAC, submetidos ao nosso cenário de simulação. A Figura 6 mostra que, à medida que ρ se aproxima de 1, a perda de símbolos (SER) tende a 0, com isso, há melhoria da qualidade do sinal na comunicação clássica e, conseqüentemente, uma piora na detecção RADAR. Quanto ao emprego das outras frequências, verificamos que a frequência de 7GHz teve melhor desempenho que as frequências 77GHz e 100GHz.

A Figura 7 nos mostra o resultado do MSE, obtido pela relação do sinal referência e sinal ISAC (Figura 5). Aqui, podemos verificar que quanto maior o valor de ρ maior a diferença entre os sinais referência e ISAC, assim, ao se aproximar de 1, temos uma piora significativa, tanto para a detecção RADAR quanto para a comunicação clássica. Nesse contexto, as frequências de 77GHz e 100GHz conseguiram manter os menores níveis de distorções.

A Figura 8 mostra o resultado da eficiência energética irradiada pela antena, ou seja, a razão entre a potência máxima


 Fig. 6. Taxa do SER vs. ρ , do autor.

 Fig. 7. Taxa do MSE vs. ρ , do autor.

irradiada no lóbulo principal e a potência máxima irradiada pelo lóbulo secundário (lateral). Com isso, espera-se uma PSLR baixa, devido a irradiação mais diretiva e, consequentemente, menor geração de lóbulos laterais, favorecendo a qualidade do sinal.


 Fig. 8. Taxa do PLSR vs. ρ , do autor.

Verificamos que à medida que ρ aumenta a intensidade da energia dos lóbulos laterais diminuem, favorecendo a qualidade do sinal da comunicação clássica e, por outro lado, atenuando a capacidade de detecção RADAR. Nesse caso, a frequência de 7GHz teve melhor desempenho que as demais, embora a frequência de 100GHz chama atenção quanto ao equilíbrio de desempenho ISAC com o valor de ρ próximo a 0,5.

V. CONCLUSÕES

Objetivamente, em nossa simulação verificamos o comportamento da comunicação clássica (voz e dados) em *dual-function*, pelo método ISAC, no emprego da detecção RADAR de *landslide*, avaliando os índices de perdas gerados. Analisamos as formas de sinais esperadas, tanto na transmissão quanto na recepção, identificando que o valor de ρ influencia diretamente no desempenho de qualidade do sinal ISAC, tanto de RADAR quanto da comunicação clássica.

Com isso, torna-se possível alcançar um equilíbrio nessa *dual-function*, ajustando o valor de ρ de forma que os símbolos gerados na comunicação clássica não sofram perdas consideráveis devido as distorções dos lóbulos laterais e, ao mesmo tempo, não gere distorções entre os sinais desejados e os

resultantes, prejudicando assim o *dual-function*. Desse forma, torna-se viável extrair da comunicação clássica a detecção de objetos, muito embora precisamos aprimorar os testes para encornar o melhor *trade-off* de ρ , para encontrarmos a melhor qualidade para ambos os serviços.

Por fim, embora os testes consideraram a encosta/morro sem o movimento, trabalhos futuros irão considerar sua movimentação, correlacionando sua velocidade, ainda, aprofundar no aumento de usuários conectados bem como a quantidade de símbolos trafegados, com o intuito de se aproximar de um cenário real. A análise de outras frequências candidatas bem como a adaptação aos modelos de canais mais adequados, ou seja, com inserções de ruído e desvanecimento do canal são de grande valia para a melhor assertividade dessa aplicação.

REFERÊNCIAS

- [1] do Conhecimento, N. (2019). Deslizamentos de terra e rocha: Impactos ambientais e sociais, como prevenir. <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/meioambiente/deslizamentos-de-terra>. acessado em 23/03/2025.
- [2] Pesquisa Google: Deslizamentos de Terra no Brasil. Filtro por imagens. <https://www.google.com>. acessado em 22/04/2025.
- [3] Faming Huang, Haowen Xiong, Shui-Hua Jiang, Chi Yao, Xuanmei Fan, Filippo Catani, Zhilu Chang, Xiaoting Zhou, Jinsong Huang, Keji Liu, Modelling landslide susceptibility prediction: A review and construction of semi-supervised imbalanced theory, *Earth-Science Reviews*, Volume 250, 2024.
- [4] Bhuyan, K., Rana, K., Ferrer, J.V. et al. Landslide topology uncovers failure movements. *Nat Commun* 15, 2633 (2024).
- [5] Vieira, B.C., Martins, T.D., da Silva, T.M. et al. How far have we come? Review of main public policies to reduce landslide impacts in Brazil. *J. Mt. Sci.* 21, 2891–2904 (2024).
- [6] Pawar, N.S., Sharma, K.V. Comprehensive review of remote sensing integration with deep learning in landslide forecasting and future directions. *Nat Hazards* (2025).
- [7] Vinuja, G. and Devi, N.B. (2024). Applications of 6G-Based Remote Sensing Network in Environmental Monitoring. In *Development of 6G Networks and Technology* (eds S.L. Tripathi, M. Mahmud, C. Narmadha and S.A. Alexander).
- [8] Shukla, B.K., Tripathi, A., Bhati, A., Bansal, V., Sharma, P.K. and Verma, S. (2024). Transforming Remote Sensing with Sixth-Generation Wireless Technology. In *Development of 6G Networks and Technology* (eds S.L. Tripathi, M. Mahmud, C. Narmadha and S.A. Alexander).
- [9] Vinuja, G. and Devi, N.B. (2024). Leveraging 6G Networks for Disaster Monitoring and Management in Remote Sensing. In *Development of 6G Networks and Technology* (eds S.L. Tripathi, M. Mahmud, C. Narmadha and S.A. Alexander).
- [10] C. De Lima et al., "Convergent Communication, Sensing and Localization in 6G Systems: An Overview of Technologies, Opportunities and Challenges," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26902–26925, 2021.
- [11] Liu, F., Zhou, L., Masouros, C., Li, A., Luo, W., and Petropulu, A. (2018). Toward dual-functional radar-communication systems: Optimal waveform design. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66(16):4264–4279.
- [12] Liu, F., Cui, Y., Masouros, C., Xu, J., Han, T. X., Eldar, Y. C., and Buzzi, S. (2022). Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6g and beyond. *IEEE journal on selected areas in communications*, 40(6):1728–1767.
- [13] Wei, Z., Qu, H., Wang, Y., Yuan, X., Wu, H., Du, Y., Han, K., Zhang, N., and Feng, Z. (2023). Integrated sensing and communication signals towards 5g-a and 6g: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*.
- [14] D. K. Pin Tan et al., "Integrated Sensing and Communication in 6G: Motivations, Use Cases, Requirements, Challenges and Future Directions," 2021 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S), Dresden, Germany, 2021, pp. 1–6.
- [15] Quan, S., Qian, W., Guo, J., and Zhang, V. (2014). Radar-communication integration: An overview. In *The 7th IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology*, pages 98–103.
- [16] Cook, C. E. (1974). Linear fm signal formats for beacon and communication systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-10(4):471–478.