

Avaliação da Cobertura de Sinal 5G em Área Urbana de Mossoró Através do Uso de Interpolação Numérica Espacial

Pedro Arthur F. da Silva¹, Humberto Dionísio de Andrade², Nickson Saymon de Oliveira Lopes³

Resumo— O avanço das telecomunicações tem impulsionado novas tecnologias, tal como o 5G, que propõe maior velocidade e menor latência na transmissão de dados. Este estudo visa medir e analisar o nível de potência do sinal com base em RSSI na faixa de 5G em área urbana de Mossoró, verificando a potência do sinal e sua conformidade com os protocolos do IEEE e regulamentado pelo órgão da ANATEL, utilizando métodos de interpolação espacial e validação cruzada. Os resultados auxiliam na compreensão da eficiência da cobertura e dos desafios na implementação da tecnologia.

Palavras-Chave— 5G, analisador de espectro, campanha de medição, interpolação espacial, RSSI, validação cruzada.

Abstract— Advances in telecommunications have driven new technologies, such as 5G, which offers higher speeds and lower latency in data transmission. This study aims to measure and analyze signal strength levels based on RSSI in the 5G frequency band within an urban area of Mossoró, assessing signal power and its compliance with IEEE protocols and ANATEL regulations, using spatial interpolation methods and cross-validation. The results contribute to understanding the efficiency of network coverage and the challenges in implementing the technology.

Keywords— 5G, spectrum analyzer, measurement campaign, spatial interpolation, RSSI, cross-validation.

I. INTRODUÇÃO

O advento das telecomunicações tem permitido a implementação de novas tecnologias, sendo o 5G um dos avanços mais significativos [1]. No entanto, sua cobertura ainda apresenta desafios, com relatos de variações na qualidade do sinal em diferentes ambientes. Fatores como a densidade de usuários e a infraestrutura disponível influenciam diretamente na recepção, tornando essencial a análise do desempenho do 5G em cenários urbanos e periféricos.

Em algumas regiões, o sinal ainda apresenta instabilidade, interferências ou baixa intensidade, prejudicando a conexão dos usuários que dependem dessa tecnologia em dispositivos móveis, sistemas IoT e equipamentos de automação. Os motivos principais para estas falhas estão associados a fatores como barreiras físicas, falta de infraestrutura adequada e a necessidade de ajustes técnicos na distribuição das faixas de frequência utilizadas pelo 5G.

Nos últimos anos de desenvolvimento tecnológico na área de telecomunicações, a evolução de novas técnicas para melhorar a qualidade de sinal vem sendo amplamente discutida no mundo, onde o 5G é a tecnologia de 5ª geração sucessora do 4G, que promete avanços significativos em velocidade, latência reduzida e maior capacidade de conexão simultânea.

A padronização do 5G é definida pelo *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, que estabelece as especificações técnicas da tecnologia, incluindo arquitetura de rede, protocolos de comunicação e alocação espectral [2]. No Brasil, a ANATEL regulamentou a operação do 5G na faixa de 3,5 GHz, principal banda de frequência utilizada globalmente. Os principais provedores de serviços móveis já implementam essa faixa para oferecer conectividade aprimorada, viabilizando aplicações de baixa latência e alta capacidade de transmissão de dados.

Além da faixa de 3,5 GHz, utilizada para a implementação do 5G no Brasil, as principais provedoras de serviços móveis – TIM, Claro e Vivo – operam em diferentes porções do espectro. A TIM, em particular, detém a faixa entre 3.500 e 3.600 MHz [3], que será o foco deste estudo para a realização da campanha de medição. A análise dessa frequência específica permitirá avaliar o desempenho da rede em termos de cobertura, intensidade do sinal e possíveis interferências, contribuindo para um melhor entendimento da qualidade da recepção em ambientes urbanos.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo realizar a análise da situação do espalhamento espectral com foco na aferição com RSSI do sinal 5G na faixa de 3,56GHz. São realizados estudos detalhados, utilizando equipamentos especializados como o analisador de espectro e antena do tipo dipolo, para medir a qualidade e intensidade do sinal 5G em diferentes condições geográficas e urbanas.

II. REFERENCIAL

A. 5G

De acordo com as definições de [2], o 5G é a próxima geração de sistemas de rádio e arquitetura de rede, sucedendo o 4G e a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*). O 5G oferece banda larga extrema, conectividade ultra robusta e de baixa latência, além de redes massivas para a Internet das Coisas (IoT). A tecnologia LTE, parte integrante do 4G, já trouxe melhorias significativas na velocidade e eficiência das comunicações sem fio. No entanto, o 5G amplifica ainda mais essas capacidades, estabelecendo um novo padrão para atender à crescente demanda dos consumidores por velocidades de comunicação mais elevadas e experiências de rede mais responsivas.

Pedro Arthur Freitas da Silva¹, *, e-mail: pedro.silva67350@alunos.ufersa.edu.br; Humberto Dionísio de Andrade², *, e-mail: humbertodionisio@ufersa.edu.br; Nickson Saymon de Oliveira Lopes³, *, e-mail: nicksonsaymon@gmail.com. Este trabalho foi parcialmente financiado por CNPq PIBIC-Af IC (PIB20016-2020).

*Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Semi-Árido, Mossoró-RN

O 5G utiliza da tecnologia *New Radio* (NR), interface aérea desenvolvida especificamente para redes 5G pela *3rd Generation Partnership Project* (3GPP). As redes 5G utilizam um espectro diversificado de frequências para oferecer uma cobertura ampla e de alto desempenho. Essas frequências são categorizadas em três principais grupos: baixa frequência (Sub-1 GHz), que oferece excelente cobertura de longo alcance e melhor penetração em ambientes internos, sendo ideal para áreas rurais e urbanas densas; média frequência (1-6 GHz), que equilibra cobertura e capacidade, oferecendo boas velocidades de transmissão de dados e sendo amplamente utilizada em áreas suburbanas e urbanas; e alta frequência (*mmWave*, acima de 24 GHz), que fornece velocidades extremamente altas e capacidade, mas com alcance menor e menor penetração em edificações, sendo ideal para áreas urbanas densamente povoadas e *hotspots* de alta demanda [4]. No Brasil, as operadoras utilizam a faixa 5G por volta de 3,5 GHz, num intervalo entre 3,3 e 3,6 GHz [3].

B. Received Strength Signal Indicator

O indicador de potência de sinal recebido (RSSI) [6], é o parâmetro de radiofrequência utilizado para melhor visualização da potência do sinal medido em dBm. Os campos elétricos medidos possuem uma faixa de potência que varia entre escalas fentowatts (10^{-15}) a microwatts (10^{-6}) o que acaba por dificultar a sua visualização. Para facilitar a sua compreensão, é utilizado a base logarítmica para linearizar essa escala, conforme descrito pela Equação 1.

$$RSSI(dBm) = 10 \times \log_{10} \frac{RSSI(W)}{1mW} \quad (1)$$

A Figura 1 demonstra a aplicação da escala logarítmica, destacando a relação entre a frequência, expressa em GHz, e a potência correspondente, medida em dBm. Essa representação permite uma melhor compreensão da variação dos valores e da forma como a escala logarítmica influencia a análise dos dados.

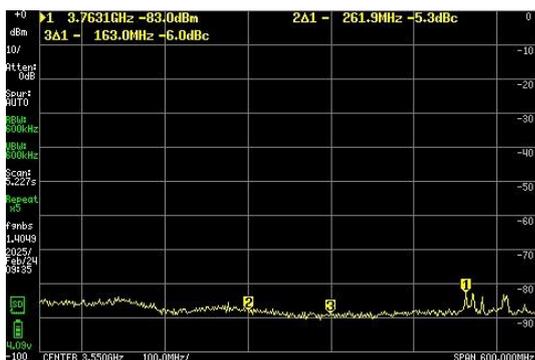


Fig. 1. Exemplo de medição do Analisador de Espectro.

Os valores obtidos na medição a partir do analisador de espectro captado com a antena trata-se de um faixa que variam de -90 a -30 dBm, onde valores muito próximos de -90 dBm são facilmente ocultados e indistinguíveis de ruído do próprio ambiente devido a sensibilidade dos equipamentos.

C. Interpolação Espacial

No estudo de potência de sinal fornecido por uma operadora

de telefonia móvel em uma determinada área de cobertura, os dados obtidos são naturalmente pontuais. Por este motivo, para fins de predição dos campos espectrais é necessário um método de suavização destes dados. Dessa forma as regiões localizadas nos intermédios dos pontos medidos precisam ser consideradas, resultando em um mapeamento mais preciso [7].

Para o escopo do trabalho, foram utilizados 3 métodos de interpolação espacial: Curvatura Mínima, Inverso do Quadrado da Potência e *Kriging*, nos quais serão comparados e discutidos, afim de se obter um melhor processamento de dados que se adeque à realidade da situação dentro da região a ser estudada.

O método do Inverso do Inverso da Potência utiliza de um cálculo de forma a assumir os valores de uma localização desconhecida podem ser aproximados com base na média ponderada dos valores dentro de uma certa distância denominada de distância de corte, ou de um determinado número de pontos mais próximos [8]. Na equação 2, p representa a potência aplicada à distância, controlando a influência dos pontos amostrais, enquanto o valor 2 é comumente adotado como parâmetro padrão de ponderação.

$$F(s) = \sum_{i=1}^n w_i z(s_i) = \frac{\sum_{i=1}^n z(s_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{|s - s_j|^p}} \quad (2)$$

Para o método de Curvatura mínima são funções por partes usando alguns pontos por vez. As previsões de interpolação podem ser calculadas rapidamente e as previsões são muito próximas dos valores que estão sendo interpolados, desde que os erros de medição associados aos dados sejam pequenos.

Já o *Kriging* ou Krigagem é baseada no conceito de funções aleatórias, em que a superfície é considerada uma realização de um processo estocástico com covariância espacial conhecida [8]. Na Equação (3), a estimativa $\hat{Z}(x_0)$ é dada por uma combinação linear ponderada dos valores amostrados $Z(x_i)$, com pesos λ_i .

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

III. METODOLOGIA

A. Campanha de Medição

A Campanha de medição consistiu no mapeamento realizado dentro do alcance de 4 ERBs, em um segmento da região urbana de Mossoró/RN com objetivo de estudar o nível de sinal na faixa 3,5 GHz do 5G fornecida pela operadora estudada. Após realizado o mapeamento, deu início ao processo de medição utilizando o analisador de espectro configurado na faixa de 3,5 à 3,6 GHz, frequência esta, definida pelo órgão regulador nacional ANATEL.

As localizações das 4 ERBs (Estação Rádio Base) foram obtidas no site da ANATEL, e inseridas no *software* Google Earth®, conforme mostrado na Figura 2.



Fig. 2. Localização das 4 ERBs. [3]

Com base nessas informações, foram realizadas capturas da potência do sinal em 70 pontos distribuídos na região entre as estações, conforme ilustrado na Figura 3, de forma que os pontos foram captados de forma que a antena utilizada estivesse a cerca de 1,50m do chão de forma a simular a posição dos aparelhos móveis sujeitos a receber o sinal, com um tempo de estabilização por volta de 1 – 2 minutos. É destacada em amarelo a área de estudo, e o ponto em vermelho como o ponto 55.



Fig. 3. Região e posições dos pontos estudados.

B. Softwares Utilizados

Para o escopo do trabalho, foram utilizadas ferramentas computacionais como o Google Earth ® versão 7.3.6.10201, empregado como ferramenta de mapeamento e planejamento para a definição dos locais de medição do nível de potência do sinal 5G. Diante disso, foram delimitados os 70 pontos dentro da região situada entre as quatro antenas previamente identificadas e citadas nas Figuras 2 e 3. A abordagem permitiu selecionar pontos que representassem diferentes ambientes de propagação do sinal, considerando a influência de obstáculos urbanos e a cobertura oferecida na faixa de 3,5 a 3,6 GHz, operada pela TIM.

Para o processamento e georreferenciamento dos dados coletados, foi utilizado o software Surfer® versão 13 [9], que permitiu a interpolação e visualização espacial das medições de nível de potência do sinal 5G obtidas a partir dos valores de RSSI. Com essa ferramenta foram gerados mapas de distribuição do sinal na área estudada, facilitando a análise da variação da intensidade do sinal em função da localização geográfica e da presença de obstáculos urbanos.

C. Equipamentos Utilizados

É apresentado na Figura 4 o analisador de espectro, modelo TinySA ULTRA em conjunto com uma antena do tipo dipolo que opera na faixa de 600 MHz a 6 GHz utilizados durante as medições. O analisador foi configurado com a frequência

central de 3,55 GHz como um SPAN de 300 MHz, RBW (Resolution Bandwidth) de 500 kHz.

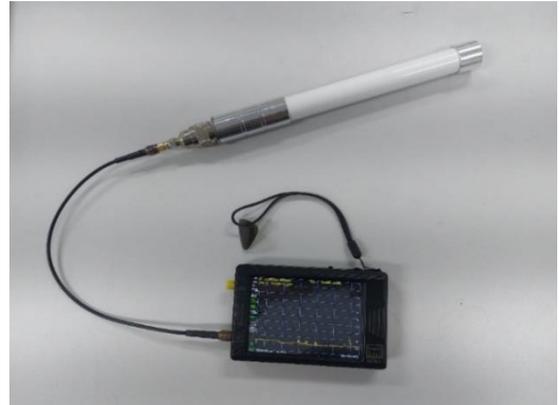


Fig. 4. Analisador de espectro e Antena.

Com relação a configuração do analisador, foram empregados 3 marcadores, onde 2 deles seriam fixos para delimitar os limites da frequência de sinal transmitido (3,5 e 3,6 GHz), e mais um que possibilitasse a visualização de cada ponto individualmente, como observado pela Figura 5. Desta forma foi possível visualizar outras faixas de frequências pertencentes ao domínio do 5G como de outras provedoras, permitindo comparar o efeito de somreamento dos respectivos sinais.



Fig. 5. Leitura com o analisador de espectro no ponto 55.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentadas análises quanto aos resultados da pesquisa, de forma a representar o desempenho dos métodos de interpolação espacial aplicados à área de estudo. São discutidos os dados obtidos por meio da validação cruzada, considerando métricas estatísticas como média, mediana, variância e raiz do erro quadrático médio (RMSE), além da avaliação qualitativa das superfícies geradas por cada método. Os mapas resultantes da campanha de medição e do posterior processamento dos dados são apresentados e comparados, a fim de identificar as diferenças na representação espacial do fenômeno observado, bem como a adequação de cada técnica às características dos dados coletados. Na Figura 6 apresenta o histograma em vermelho com seus valores descritos pelo eixo à esquerda, representando a frequência das amostras obtidas. Em laranja, a função de densidade de massa (FDM) com o seu respectivo eixo à direita. Por fim o eixo inferior representa o nível de potência dos sinais obtidos. Os valores apresentaram uma faixa compreendida entre -89,9 dBm a -72 dBm, onde os valores estavam acima de -84dBm, nas proximidades da antena

(cerca de 1 km). Tal comportamento é atribuído a fatores como o fenômeno sombreamento, larga escala de área de estudo, e baixa resposta da antena mais ao norte, nos quais os resultados mais frequentes foram de regiões de baixa intensidade.

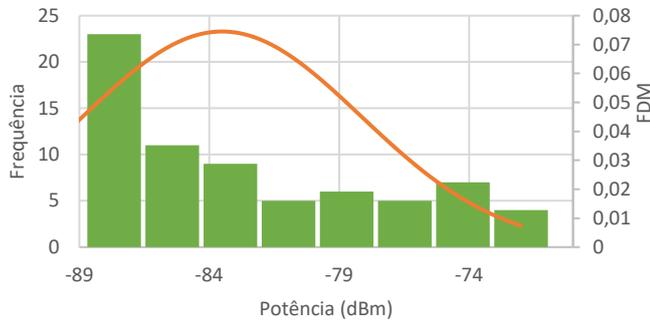


Fig. 6. Histograma e FDM sobrepostos.

É observado na Figura 6 a ocorrência de uma tendência maior à esquerda onde estão presentes sinais de baixo valor, que decrescem à medida que se distanciam das antenas e o número de obstáculos na região se somam intensificando a ocorrência de áreas de sombreamento.

Os dados geográficos e amostras dos dados obtidos ao passar pelo software para realizar a interpolação geraram os mapas geoestatísticos representados pelas Figuras 7, 8 e 9, onde a Figura 9 contendo o método de Curvatura Mínima apresenta um grau de magnitude com valores que seguem de -45 a -125 dBm em contraste com as demais que possuem uma escala cujo estaria contida entre -70 a -90 dBm. Desta forma, a comparação entre os métodos deve levar em conta a diferença de magnitude dos 3 métodos distintos.

A Figura 7, gerada pelo método de Curvatura Mínima, mostra que grande parte da região apresenta valores próximos à faixa de -80 dBm. No entanto, devido à grande distância entre os pontos de medição e à baixa resolução dos dados, os valores intermediários acabam divergindo, o que gera um mapa com perfil homogêneo. Essa uniformidade reduz a variação entre os dados e pode não representar com precisão a distribuição real do sinal.

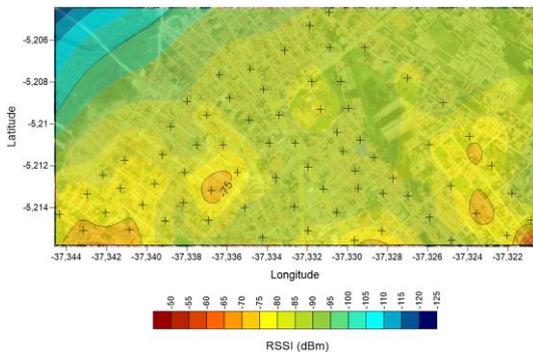


Fig. 7. Interpolação por método de Curvatura Mínima.

No tocante ao método do Inverso da Potência das Distâncias, há um comportamento no mapa em relação a distribuição do espectro do sinal. Contudo é possível notar quais os pontos onde foram coletadas as amostras devido a distância entre eles e o comportamento de como o cálculo do método funciona. O método do inverso da potência das distâncias ao realizar a estimativa das regiões não medidas,

toma por base a média ponderada dos valores vizinhos, de forma que para grandes variações, mostra uma mudança gradativa nos níveis como é mostrada na Figura 8.

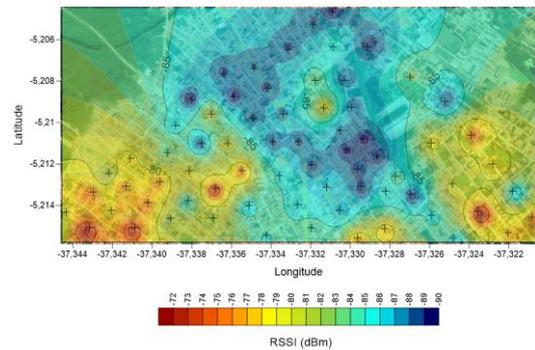


Fig. 8. Interpolação por método de Inverso da Potência das Distâncias.

Para a Figura 9, têm-se a interpolação por método de *Kriging*, o qual resultou numa interpolação mais suave apesar da distância entre os pontos medidos, cuja áreas intermediárias foram calculadas de forma a criar um mapeamento suave com um comportamento mais natural em relação à média dos valores obtidos no ato da medição. *Kriging* se destaca por considerar não apenas a distância entre os pontos, mas também a estrutura de correlação espacial dos dados, permitindo estimativas mais confiáveis. Em comparação, a Curvatura Mínima pode gerar superfícies excessivamente suavizadas, potencialmente distantes da realidade dos dados, enquanto o método do Inverso da Potência das Distâncias, embora prática, pode apresentar transições abruptas em áreas com menor densidade de pontos. Assim, o *Kriging* demonstra um equilíbrio ideal entre suavidade e precisão, tornando-se uma escolha robusta para representar padrões espaciais complexos.

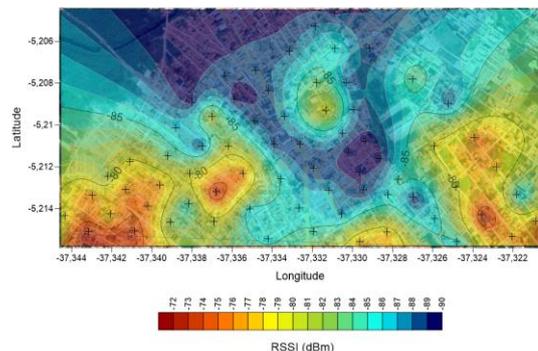


Fig. 9. Interpolação por método de *Kriging*.

Com base nos resultados, em áreas mais abertas e dentro de uma distância de aproximadamente 600 m do alcance das torres, o sinal se manteve com intensidade permeando -84dBm em comparação com registros em pontos mais distantes, onde há maior presença de anteparos com prédios, árvores, características do meio, etc.

São apresentados na Tabela I os dados de validação cruzada resultantes dos 3 métodos utilizados, exportados do software Surfer®, os quais incluem valores da média, mediana, variância e raiz do erro quadrático médio (RMSE) calculados para cada método de interpolação aplicado: Curvatura Mínima (*Spline*), *Kriging* e Inverso da Potência das Distâncias (IDW).

TABELA I. VALIDAÇÃO CRUZADA DOS MÉTODOS

Dados	Kriging	Spline	Inverso
Média	-0,019	-0,006	-0,241
Mediana	0,133	0,071	1,208
Curtosis	2,998	3,326	2,594
Variância	17,602	9,014	16,903
RMSE	4,165	2,981	4,089
MAE	4,706	3,323	4,59

Apesar dos melhores resultados estatísticos da Curvatura Mínima na validação cruzada, a superfície gerada apresentou uma suavização excessiva que não reflete a natureza física da propagação de sinais eletromagnéticos. Isso sugere que, em contextos com variabilidade local acentuada, a avaliação da qualidade da interpolação deve considerar não apenas métricas de erro, mas também a coerência espectral do mapa a ser gerado.

Além disso, foi observado uma baixa intensidade proveniente da antena mais ao norte (ERB 1). Durante a fase de medições, o primeiro ponto analisado situava-se a aproximadamente 100 m de distância dessa antena. Devido à proximidade, esperava-se uma intensidade pouco significativa, por volta de -90dbm, do sinal, pois em curtas distâncias, e a altura da antena, a intensidade do sinal na região diretamente abaixo da antena é muito baixa. No entanto, com o incremento gradual da distância, a mudança na intensidade do sinal não era perceptível, interpretado como se não houvesse antena próxima. Já nas demais 3 antenas, foi possível notar picos bem definidos dentro da faixa especificada.

Além disso, o sinal puro 5G SA (*Standalone*) não está presente em nenhuma das 9 torres listadas dentro da cidade até o momento [3], ou seja, todas elas dividem o seu core com o LTE 4G de forma que afete tanto a qualidade do nível do sinal, quanto ao fato de ser capaz de transmitir o nível de sinal na frequência 3,55GHz.

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho se propôs a analisar a intensidade dos níveis de potência de sinal na faixa de 5G em uma região urbana de Mossoró, avaliando a qualidade do sinal e sua adequação aos padrões estabelecidos por órgãos reguladores como a ANATEL e o IEEE, a partir da análise dos dados utilizando interpolação espacial e validação cruzada. Como principais resultados, foram obtidas curvas representativas da distribuição espacial da potência do sinal, utilizando métodos de interpolação e análise estatística. Os dados coletados indicaram que a intensidade de sinal apresenta regiões com muito sombreamento, com isso dificultando a conectividade. Além disso, fatores como a interferência de obstáculos urbanos e a heterogeneidade da infraestrutura de telecomunicações podem influenciar a propagação do sinal, exigindo análises complementares.

Com a utilização da ferramenta computacional foi possível realizar simulações em ambientes eletromagnéticos e realizar a aquisição de informações sobre o espalhamento espectral da tecnologia 5G. Diante dessas informações conclui-se que o conhecimento adquirido através da otimização computacional dos cenários é de extrema relevância, uma vez

que esse estudo possibilita que os projetos de propagação de sinal de tecnologia 5G sejam mais eficazes. Portanto, o presente trabalho demonstra que a informação obtida está em concordância com a literatura e com os padrões normativos, e diante da mesma, o ambiente simulado apresenta como uma ferramenta importante para pré-diagnóstico do estudo de propagação de sinal do sinal que está sendo entregue para os usuários.

Há possibilidade futura de realização de campanhas de medição mais extensas, abrangendo uma maior área, com instrumentação de maior precisão e técnicas de modelagem mais avançadas a fornecer subsídios valiosos para profissionais da área, auxiliando na otimização da infraestrutura e no planejamento de futuras expansões da rede.

AGRADECIMENTOS

Esse estudo foi financiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e é parte da pesquisa de um Bolsista do CNPq/UFERSA/Af. Os autores agradecem também, a CAPES, UFERSA, GEPEAT, ao capítulo Estudantil MTTs – UFERSA, ao ramo Estudantil IEEE UFERSA e a equipe do Laboratório de Telecomunicações e Micro-ondas da UFERSA.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Cai, H. Zhang, H. Guo, G. Zhang and W. Xie, *5G Network Evolution and Dual-mode 5G Base Station*. 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2020, pp. 283-287.
- [2] M. Shafiq et al., *5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221.
- [3] ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. *Estações do Serviço Móvel Pessoal*. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/outorga-e-licenciamento/estacoes-do-smp/>>. Acesso em: 28 de jan. 2025.
- [4] G. Amitabha, M. Andreas, B. Mathew & C. Devaki. *5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15*. Nokia Bell Labs, Naperville, IL 60563, USA, Vol 7, 2019.
- [5] WirelessBRASIL – Portal Independente de Telecomunicações e Tecnologia. Disponível em: <http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/msantos/smc_02.html>. acesso em: 22 de fev. 2025.
- [6] CASTELLANOS, Pedro Vladimir Gonzalez. *Caracterização do canal de propagação banda larga na faixa UHF para aplicações de TV digital*. 2009. Tese DOUTORADO– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [7] L. J. HEAP, A. D. *A review of Spatial interpolation methods for environmental scientists*. Camberra: Geoscience Australia, 2008.
- [8] Ikechukwu, M.; Ebinne, E.; Idorenyin, U.; Raphael, N. *Accuracy Assessment and Comparative Analysis of IDW, Spline and Kriging in Spatial Interpolation of Landform (Topography): An Experimental Study*. J. Geogr. Inform. Syst. 2017, 9, 354–371.
- [9] Golden Software, LLC, Surfer®, Version 13: Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers, Golden, Colorado, USA, 2015.