



Projeto Brasil 6G Fase III

Atividade 4.3 – Avaliação de desempenho da rede em condições reais - Parte 2



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	30/06/2026	Anderson Reis Rufino Marins Eddy Hernández Inguanzo Juliano Silveira Ferreira Luiz Gustavo Barros Guedes	Elaboração de conteúdo
2	24/07/2026	Juliano Silveira Ferreira Luciano Leonel Mendes Luiz Gustavo Barros Guedes Anderson Reis Rufino Marins	Revisão de texto

Lista de Figuras

1	Sinal entregue à uma das antenas do terminal BS.	4
2	Predição preliminar de cobertura da BS da rede de acesso Brasil 6G instalada na Serra do Paredão considerando potência média total de 26 dBm.	6
3	Visão em satélite da região de estudo e das localidades preliminarmente selecionadas para os testes de campo em Santa Rita do Sapucaí.	7
4	BS instalada na Serra do Paredão em Santa Rita do Sapucaí.	8
5	Cenário de recepção associado ao UE 1 no ponto de medição Inatel.	9
6	Perfil topográfico do enlace entre a BS e o UE instalado no Inatel.	10
7	Medida espectral do sinal recebido do enlace de <i>downlink</i> no Inatel.	11
8	Resultados de <i>throughput</i> para os enlaces de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> entre a BS e o UE 1.	12
9	Resultado do teste obtido por meio do <i>SpeedTest</i> no ponto de medição Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel).	13
10	Visão geral da instalação na fazenda.	13
11	Cenário de recepção associado ao UE 2 no ponto de medição fazenda Delta <i>Black</i>	14
12	Perfil topográfico do enlace entre a BS e o UE instalado na fazenda Delta <i>Black</i>	14
13	Espectro do sinal recebido no UE 2 no ponto de medição fazenda Delta <i>Black</i>	15
14	Resultados de testes dos enlaces entre a BS e o UE instalado na fazenda Delta <i>Black</i>	16
15	Resultado do teste obtido por meio do <i>SpeedTest</i> no ponto de medição fazenda Delta <i>Black</i>	17
16	Resultados de <i>downlink</i> para diferentes níveis de potência de transmissão na fazenda Delta <i>Black</i>	18
17	Visão da interface do terminal <i>Base Station</i> (BS) durante comunicação com múltiplos usuários.	19
18	Comparação do espectro no ponto Inatel antes da transmissão e durante o ensaio de longa duração. As linhas vermelhas delimitam a faixa ocupada pelo sinal.	22
19	Resultado do teste de longa duração para UDP em <i>downlink</i> , considerando taxa de transmissão e métricas da camada física.	24
20	Resultados do teste de longa duração para UDP em <i>uplink</i>	25
21	Resultado do teste de <i>ping</i> de longa duração, considerando latência RTT e <i>jitter</i> estimado.	26
22	Visão geral do Campus da UFC em Quixadá, com destaque para a torre disponível.	29
23	Perspectivas interna e externa da instalação da BS no campus da UFC em Quixadá.	29
24	Espectro do sinal de RF entregue à uma das antenas da BS (23 dBm).	30
25	Predição preliminar de cobertura da BS da rede de acesso Brasil 6G instalada na UFC considerando potência média total de 26 dBm.	32
26	Visão em satélite da região de estudo e das localidades preliminarmente selecionadas para os testes de campo em Quixadá.	33
27	Perspectivas interna e externa da instalação do UE 1 no ponto Mosteiro.	35
28	Perfil geográfico do enlace entre a BS e o UE 1 no ponto Mosteiro.	35
29	Espectro do sinal de <i>downlink</i> recebido pelo terminal UE 1, instalado na localidade Mosteiro.	36
30	Resultados de <i>throughput</i> nos enlaces de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> entre a BS e o UE 1.	37

31	Resultado do teste de <i>throughput</i> obtido por meio do <i>SpeedTest</i> para a localidade Mosteiro.	39
32	Localidade Riacho Verde: visão da escola e instalação do protótipo do terminal <i>User Equipment</i> (UE).	39
33	Antena instalada na localidade Riacho Verde.	40
34	Perfil geográfico do enlace entre a BS e o UE 2 no ponto Riacho Verde, com obstrução parcial do percurso de propagação.	40
35	Medida do sinal de <i>downlink</i> recebido pelo UE na localidade Riacho Verde. . . .	41
36	Resultados de <i>throughput</i> para os enlaces de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> entre a BS e o UE 2 no ponto de medição Riacho Verde.	42
37	Resultado do teste obtido por meio do <i>SpeedTest</i> no ponto de medição Riacho Verde.	43
38	Teste de <i>throughput</i> simultânea com terminais do tipo UE.	45

Lista de Tabelas

1	Localidades selecionadas e predições de recepção para testes em Santa Rita do Sapucaí.	5
2	Resumo dos parâmetros obtidos nos testes de <i>throughput</i> no ponto de medição Inatel.	10
3	Resumo dos parâmetros obtidos nos testes de <i>throughput</i> no ponto de medição fazenda Delta <i>Black</i>	15
4	Comunicação multiusuário em Santa Rita: parâmetros do enlace de <i>uplink</i>	20
5	Resumo consolidado dos parâmetros de desempenho em <i>downlink</i> no cenário de Santa Rita do Sapucaí.	20
6	Resumo dos parâmetros de desempenho em <i>uplink</i> no cenário de Santa Rita do Sapucaí.	21
7	Resumo estatístico dos testes de longa duração do enlace de rádio com UDP. . .	26
8	Resumo estatístico do teste de <i>ping</i> de longa duração.	27
9	Localidades selecionadas e predições iniciais de potência de recepção (<i>Radio Mobile</i>).	34
10	Resumo dos testes de comunicação para o enlace entre a BS e o UE 1 instalado na localidade Mosteiro.	36
11	Resumo dos resultados obtidos de testes com <i>iperf</i> na localidade Riacho Verde. .	40
12	Comunicação multiusuário em Quixadá: parâmetros do enlace de <i>uplink</i>	44
13	Resumo consolidado dos parâmetros de desempenho em <i>downlink</i> no cenário de Quixadá.	46
14	Resumo consolidado dos parâmetros de desempenho em <i>uplink</i> no cenário de Quixadá.	46

Acrônimos

6G	Sexta Geração de Rede Móvel Celular
ACPR	<i>Adjacent Channel Power Ratio</i>
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BS	<i>Base Station</i>
CRR	<i>Centro de Referência em Radiocomunicações</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
GFDM	<i>Generalized Frequency Division Multiplexing</i>
GTEL	Grupo de Pesquisa em Telecomunicações Sem Fio
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
Inatel	Instituto Nacional de Telecomunicações
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITM	<i>Irregular Terrain Model</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
NIC.br	Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OOBE	<i>Out-of-Band Emission</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Ratio</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RTT	<i>Round-Trip Time</i>
SEFICE	Serviço Especial para Fins Científicos e Experimentais
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TVWS	TV White Space
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>

Sumário

1	Introdução	1
2	Planejamento e testes de campo em Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais	2
2.1	Planejamento dos testes de campo em Santa Rita do Sapucaí	2
2.1.1	Potência de transmissão da BS e planejamento preliminar de cobertura .	3
2.1.2	Definição preliminar das localidades de teste	5
2.2	Testes de campo em Santa Rita do Sapucaí	8
2.2.1	Testes de comunicação entre BS e UE localizada no Inatel	9
2.2.2	Testes de comunicação entre BS e UE 2 localizada na fazenda Delta <i>Black</i>	12
2.2.3	Teste de comunicação multiusuário: terminais e UEs localizados no Inatel e na fazenda	17
2.2.4	Análise consolidada dos resultados dos testes em Santa Rita do Sapucaí .	20
2.3	Análises e testes de estabilidade	21
3	Planejamento e testes de campo em Quixadá, Ceará	28
3.1	Planejamento dos testes de campo em Quixadá, Ceará	28
3.1.1	Potência de transmissão da BS fixa e planejamento preliminar de cobertura	28
3.1.2	Definição preliminar das localidades de teste	31
3.2	Testes de campo em Quixadá, Ceará	34
3.2.1	Comunicação entre BS e terminal UE localizada no ponto Mosteiro . . .	35
3.2.2	Comunicação entre BS e terminal UE instalado na localidade Riacho Verde	38
3.2.3	Teste de comunicação multiusuário: terminais UEs localizadas nos pontos Mosteiro e Riacho Verde	43
3.2.4	Análise consolidada dos resultados dos testes em Quixadá	44
4	Conclusão	47

1 Introdução

As definições em torno da próxima geração de redes de comunicação móvel, a Sexta Geração de Rede Móvel Celular (6G), devem considerar uma ampla variedade de cenários de uso, requisitos técnicos e aplicações emergentes. Entre esses cenários, destaca-se a necessidade de prover conectividade em áreas remotas, rurais que não são atendidas adequadamente por redes convencionais. Esse desafio é particularmente relevante em países de grande extensão territorial, como o Brasil, nos quais fatores como baixa densidade populacional, longas distâncias, limitações de infraestrutura, relevo e custo de implantação podem dificultar a expansão de redes terrestres tradicionais.

Nesse contexto, o Projeto Brasil 6G busca contribuir de forma efetiva para o desenvolvimento de tecnologias, plataformas e soluções experimentais alinhadas às demandas futuras de conectividade. O projeto tem papel estratégico ao viabilizar a pesquisa aplicada, a prototipação e a validação prática de soluções voltadas a problemas relevantes para o cenário nacional. Entre essas soluções, destaca-se o desenvolvimento de uma rede de acesso voltada ao atendimento de áreas remotas e rurais, rede de acesso Brasil 6G, que permite investigar alternativas tecnológicas capazes de ampliar a cobertura, melhorar a disponibilidade de comunicação e apoiar aplicações digitais em regiões atualmente pouco atendidas. Vale destacar que nesse contexto, a utilização oportunística de canais disponíveis na faixa de TV White Space (TVWS) representa uma alternativa relevante para ampliar a cobertura e favorecer aplicações de comunicação em áreas remotas e rurais [1][2][3]. Esta abordagem é considerada na implementação da rede de acesso Brasil 6G.

O presente relatório apresenta os resultados obtidos no âmbito da atividade 4.3 da Fase III do Projeto Brasil 6G, cujo objetivo principal é avaliar o desempenho da rede de acesso em condições operacionais realistas, por meio de planejamento, execução e análise de testes de campo. Inicialmente, foram executados testes em condições laboratoriais e controladas, conforme apresentado em [4], e em seguida foram implementadas otimizações nos algoritmos base do transceptor, assim como ajustes de operação, conforme apresentado em [5]. A partir desses avanços, os protótipos funcionais dos transceptores que compõe a rede de acesso foram utilizados para a realização de experimentos práticos em diferentes localidades e cenários de propagação. Os testes de campo descritos neste relatório representam uma etapa importante de evolução da solução desenvolvida, pois aproximam a rede de acesso das condições reais de uso previstas para aplicações em áreas remotas e rurais.

A execução dos testes em Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais, e em Quixadá, Ceará, permitiram avaliar a rede de acesso em contextos distintos, considerando diferentes distâncias, pontos de instalação e condições de propagação. Em Santa Rita do Sapucaí, foram realizados testes envolvendo comunicação entre a BS e terminais UEs localizados em pontos previamente definidos, incluindo cenários de comunicação ponto-a-ponto e multiusuário. Em Quixadá, os experimentos permitiram avaliar o comportamento da rede em uma região com características de relevo desafiadoras e também aderentes ao contexto de conectividade remota e rural, ampliando a representatividade dos resultados obtidos.

Com o objetivo de apresentar os testes da rede de acesso em condições realistas e os respectivos resultados, o presente relatório foi organizado da seguinte forma: a Seção 2 descreve o planejamento, a execução dos testes e os resultados obtidos na cidade de Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais; a Seção 3 apresenta o planejamento e os testes realizados em Quixadá, Ceará, bem como os resultados de desempenho observados nas diferentes localidades avaliadas; por fim, a Seção 4 reúne as considerações finais e as principais conclusões.

2 Planejamento e testes de campo em Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais

A primeira etapa de avaliação da rede de acesso em condições realistas foi realizada no município de Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais, onde está localizado o campus do Inatel. A escolha desse cenário foi estratégica, pois permitiu explorar uma infraestrutura experimental mais controlada e, ao mesmo tempo, suficientemente representativa para a realização de testes externos ao ambiente laboratorial. Dessa forma, tornou-se possível avaliar o comportamento da rede em diferentes condições de instalação, distância, visada, recepção de sinal e configuração operacional.

Para a execução dos testes, o terminal BS da rede de acesso foi instalado em uma posição estratégica, de modo a viabilizar enlaces com terminais UE localizados em pontos distintos do município. Inicialmente, foram realizados testes com um terminal UE instalado nas dependências do Inatel, no laboratório do *Centro de Referência em Radiocomunicações* (CRR), o que facilitou a execução de validações preliminares, ajustes de configuração, verificação da estabilidade do enlace e acompanhamento mais próximo do desempenho da comunicação. Essa etapa foi importante para consolidar o funcionamento básico da solução em ambiente externo, mas ainda com maior facilidade de acesso à infraestrutura de apoio.

Em seguida, os testes foram expandidos para um ponto localizado em uma área rural do município, especificamente em uma fazenda produtora de café. Esse segundo cenário permitiu submeter a rede de acesso a condições mais próximas daquelas esperadas para aplicações em áreas remotas e rurais, nas quais fatores como distância, relevo, limitações de infraestrutura e variações de propagação podem impactar diretamente o desempenho do enlace. Assim, a avaliação deixou de se restringir a um ambiente institucional e passou a contemplar também um cenário de uso mais aderente ao objetivo principal da tecnologia em desenvolvimento.

Nas subseções seguintes, são apresentados inicialmente os aspectos relacionados ao planejamento dos testes em Santa Rita do Sapucaí, incluindo a análise preliminar de potência de transmissão, cobertura e definição das localidades de avaliação. Em seguida, são descritos os testes e os respectivos resultados obtidos nos diferentes cenários de comunicação, contemplando os testes ponto a ponto, a operação multiusuário e a análise consolidada do desempenho observado durante essa etapa de validação em campo.

2.1 Planejamento dos testes de campo em Santa Rita do Sapucaí

O planejamento dos testes realizados em Santa Rita do Sapucaí, MG, foi estruturado a partir da definição dos pontos de instalação da BS e dos UEs. A BS foi instalada em um ponto estratégico na Serra do Paredão, também conhecida como Morro das Três Torres, localizada na divisa entre os municípios de Santa Rita do Sapucaí e São Sebastião da Bela Vista, ambos no estado de Minas Gerais. O local dispõe de um abrigo de alvenaria e de uma torre, na qual foram instaladas as antenas da BS. Esse ponto de instalação foi também utilizado em uma campanha de testes de campo realizada em uma fase anterior do projeto, conforme descrito em [6]. O espaço no abrigo das Três Torres foram cedidos para a realização dos testes pela rádio local denominada de Difusora 2 FM (D2 FM).

Um conjunto composto por dois terminais UEs foi utilizado na realização de testes iniciais, com o objetivo de avaliar a comunicação simultânea com múltiplos terminais instalados em diferentes localidades. Duas localidades principais foram selecionadas para a instalação dos terminais UEs: o próprio Inatel e uma fazenda produtora de café, denominada de Delta *Black*,

que fica localizada em uma área rural de Santa Rita do Sapucaí, no bairro Vintém. Para os pontos considerados, foram levantadas informações de localização, incluindo as coordenadas geográficas de latitude e longitude, além da análise visual dos trajetos e das condições do entorno por meio do *Google Maps*. Além disso, foram realizadas simulações computacionais para estimar o perfil topográfico dos percursos de propagação. Essas análises possibilitaram uma avaliação preliminar das condições de propagação antes da execução dos testes em campo.

2.1.1 Potência de transmissão da BS e planejamento preliminar de cobertura

O protótipo da rede de acesso Brasil 6G utiliza como faixa de operação a banda de *Ultra High Frequency* (UHF), pois, esta faixa de frequência propicia a comunicação em longo alcance, uma vez que atenuação no espaço livre é menor em relação a frequências mais elevadas. Como as emissoras e as retransmissoras de TV são os usuários primários da banda de UHF, a rede de acesso, que utiliza oportunisticamente os canais livres dessa banda, pode ser classificada como um sistema de TVWS. Desta forma, visando conformidade com a regulamentação vigente para a operação de dispositivos TVWS no Brasil [7], os testes realizados em Santa Rita do Sapucaí consideraram a operação da rede com potência de pico de 1 W (30 dBm) em cada canal de 6 MHz. Como a rede de acesso Brasil 6G emprega uma configuração *Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO) com duas antenas transmissoras e duas antenas receptoras, a potência mencionada foi igualmente distribuída entre as duas cadeias de transmissão. Dessa forma, a potência de pico configurada em cada antena correspondeu a 0,5 W, equivalente a aproximadamente 27 dBm por canal de 6 MHz.

Os testes foram realizados considerando a transmissão pela BS, ou seja, enlace de *downlink*, foram realizados com largura de banda de 24 MHz, obtida pela agregação dos canais 47, 48, 49 e 50 da faixa de UHF, correspondentes ao intervalo de frequências entre 668 MHz e 692 MHz. Essa faixa foi utilizada a partir da autorização concedida pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), por meio de uma licença do tipo Serviço Especial para Fins Científicos e Experimentais (SEFICE). Devido à diferença entre a potência de pico e a potência média do sinal, ou *Peak-to-Average Ratio* (PAPR), característica das formas de onda multipartidoras, como o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) [8] e *Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM) [8, 9], é necessário considerar uma margem de proteção entre o valor da potência de pico em relação ao valor da potência média. Para o sistema em teste, foi considerada uma PAPR de 10 dB. Assim, a potência média total efetivamente transmitida em cada canal foi da ordem de 20 dBm, equivalente a aproximadamente 17 dBm por antena por um canal de 6 MHz. Considerando o uso de quatro canais contíguos, ou seja, 24 MHz, obteve-se uma potência média total de aproximadamente 26 dBm, correspondente a cerca de 23 dBm por cada antena. A Figura 1 mostra uma visão do sinal entregue a uma das antenas do terminal BS para as condições de teste, ou seja, com a potência de 23 dBm. Pode-se destacar na medida em questão o valor de *Adjacent Channel Power Ratio* (ACPR) do sinal que é inferior a -53 dB tanto no canal inferior quanto no superior. O valor reduzido de ACPR é proporcionado, em parte, graças à forma de onda utilizada pelo sistema, que é o GFDM, que possui uma baixa emissão fora de faixa, *Out-of-Band Emission* (OOBE), o que propicia a convivência harmoniosa da rede de acesso com os usuários primários da banda [9].

Vale destacar que a largura de banda reservada para cada terminal UE realizar suas transmissões, ou seja, enlace de *uplink*, foi de 6 MHz, com potência de transmissão de 17 dBm entregue à cada antena, atendendo aos mesmos critérios utilizados para definição da potência de *downlink* e que foram apresentados anteriormente. Para o enlace de *uplink* foi utilizada a

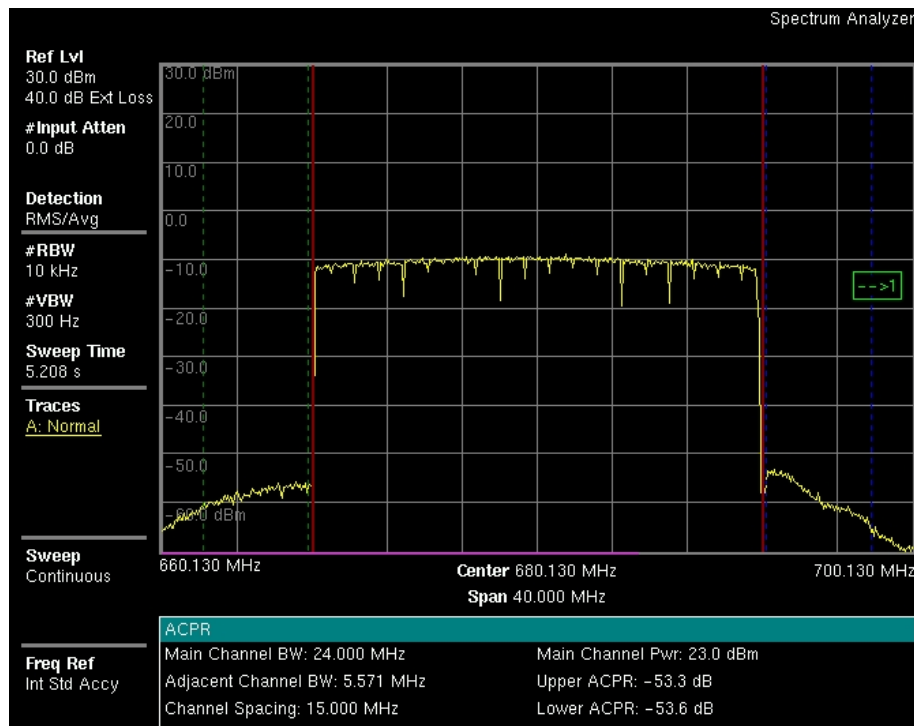


Figura 1: Sinal entregue à uma das antenas do terminal BS.

faixa de 548 MHz a 572 MHz, que corresponde aos canais 27, 28, 29 e 30 da banda de UHF. Esses canais correspondem à faixa outorgada pela Anatel para a realização dos testes.

Com base nessa configuração de potência e na faixa de frequências considerada, foram realizadas estimativas de cobertura destinadas a subsidiar a seleção das localidades candidatas às campanhas de medição em campo. As simulações foram conduzidas com o *software Radio Mobile* [10], que permite configurar parâmetros como frequência de operação, características e alturas das antenas transmissoras e receptoras e perdas nos cabos, além de considerar o perfil topográfico do terreno. A ferramenta utiliza o modelo de propagação *Irregular Terrain Model* (ITM), fundamentado no modelo *Longley-Rice* [11, 12], sendo adequada à análise de cenários caracterizados por irregularidades de relevo. Para este planejamento, foram empregados mapas topográficos gerados a partir de dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) do tipo SRTM3. Como as simulações não incorporam informações detalhadas sobre vegetação, morfologia urbana ou obstruções locais, seus resultados devem ser interpretados como estimativas preliminares das condições de cobertura.

A Figura 2 apresenta o resultado da estimativa de cobertura para a BS instalada na Serra do Paredão, nas coordenadas geográficas de latitude $-22,19764^\circ$ e longitude $-45,74194^\circ$, a uma altitude aproximada de 1385 m. Na simulação, foram considerados parâmetros condizentes com a instalação e com o protótipo da BS como: antena diretiva com ganho de 9,5 dBi, instalada na torre metálica a aproximadamente 12 m acima do nível do solo e tendo como direção de apontamento o bairro rural de Santa Rita do Sapucaí denominado de Vintém, região selecionada para a instalação de um dos terminais durante os testes em campo. Foram adotadas a potência média total de 26 dBm e a largura de banda de 24 MHz previamente descritas. O resultado permitiu identificar as regiões potencialmente atendidas pelo sinal da BS, analisar a influência do relevo sobre a propagação e apoiar a definição dos pontos candidatos para instalação dos UEs.

2.1.2 Definição preliminar das localidades de teste

A predição de cobertura obtida com o *Radio Mobile* foi utilizada como referência inicial para a seleção das localidades candidatas aos testes de campo em Santa Rita do Sapucaí. Como a simulação não contempla integralmente fatores como vegetação, obstruções locais, multipercursos e desalinhamento das antenas, os pontos foram selecionados de modo a representar diferentes condições de propagação. A Figura 2 apresenta o mapa de cobertura com as localidades inicialmente selecionadas, enquanto a Figura 3 mostra uma imagem de satélite da região, obtida por meio do Google Earth, com a distribuição dos pontos de medição.

A Tabela 1 reúne as principais informações das localidades inicialmente selecionadas para as medições em campo, incluindo as coordenadas geográficas, a distância em linha reta até a Serra do Paredão, local de instalação da BS, e os níveis de potência recebida estimados pelo *software Radio Mobile*. Essas estimativas foram obtidas com base nos parâmetros técnicos definidos no planejamento de cobertura apresentado anteriormente.

Tabela 1: Localidades selecionadas e predições de recepção para testes em Santa Rita do Sapucaí.

Local	Latitude Longitude	Enlace linha reta [km]	<i>Path loss</i> previsto [dB]	Potência de recepção estimada [dBm]	Motivação/ Justificativa
Serra do Paredão	-22,19764 -45,74194	0	-	-	Ponto estratégico de instalação da BS
Fazenda Delta <i>Black</i>	-22.207002 -45.671232	7,35	113,7	-64,8	Distância intermediária Fazenda para futuros testes
Inatel / CRR	-22.257627 -45.695605	8,09	107,2	-73,2	Execução de testes e validações preliminares

As localidades inicialmente selecionadas permitem avaliar o desempenho da rede de acesso Brasil 6G em cenários com diferentes condições de enlace. A fazenda Delta *Black* foi escolhida por ser um ambiente rural, com facilidade de acesso e por representar um cenário potencial para futuras campanhas experimentais. Destacando que as antenas da BS foram direcionadas para o bairro rural no qual se localiza tal fazenda. O Inatel, por sua vez, fica em uma direção lateral à direção de apontamento da antena da BS, o que justifica o menor nível de recepção estimado, conforme indica a Tabela 1.

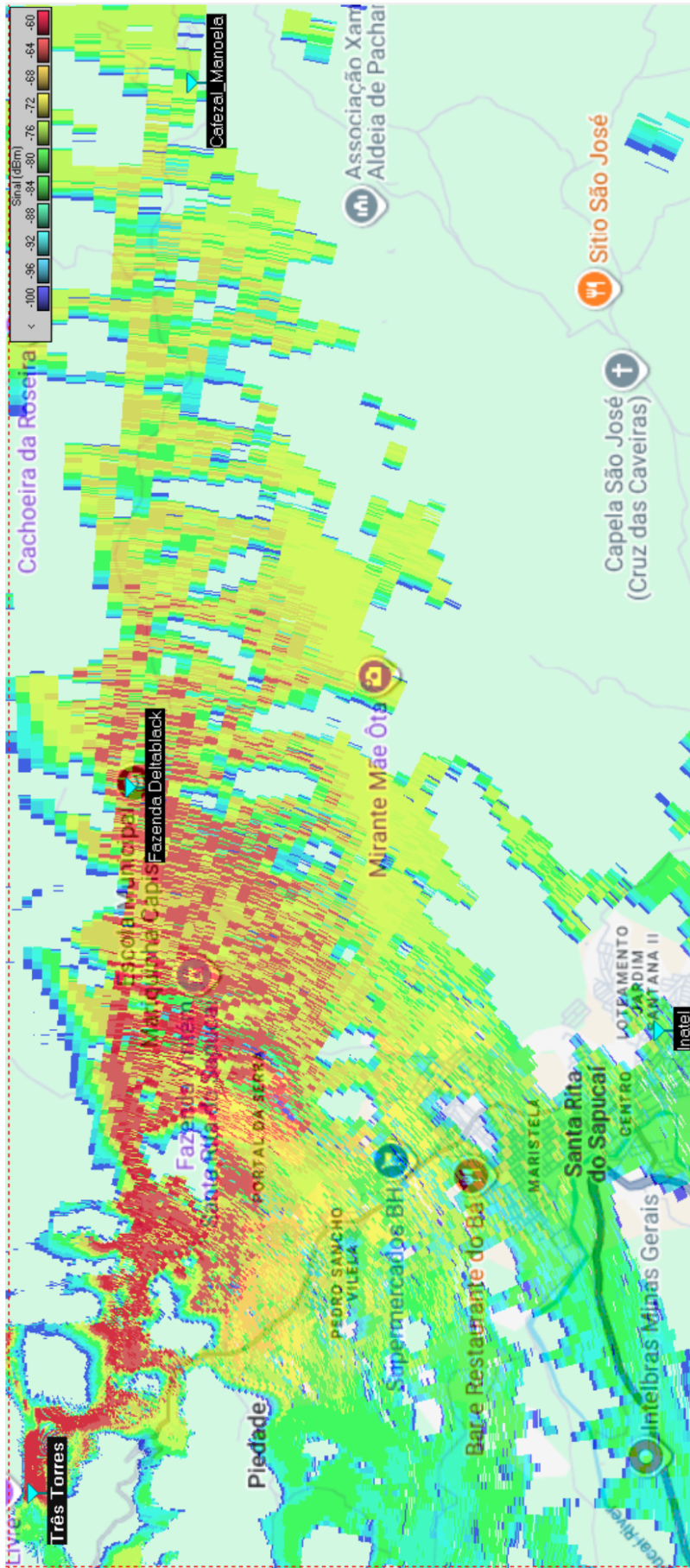


Figura 2: Predição preliminar de cobertura da BS da rede de acesso Brasil 6G instalada na Serra do Paredão considerando potência média total de 26 dBm.

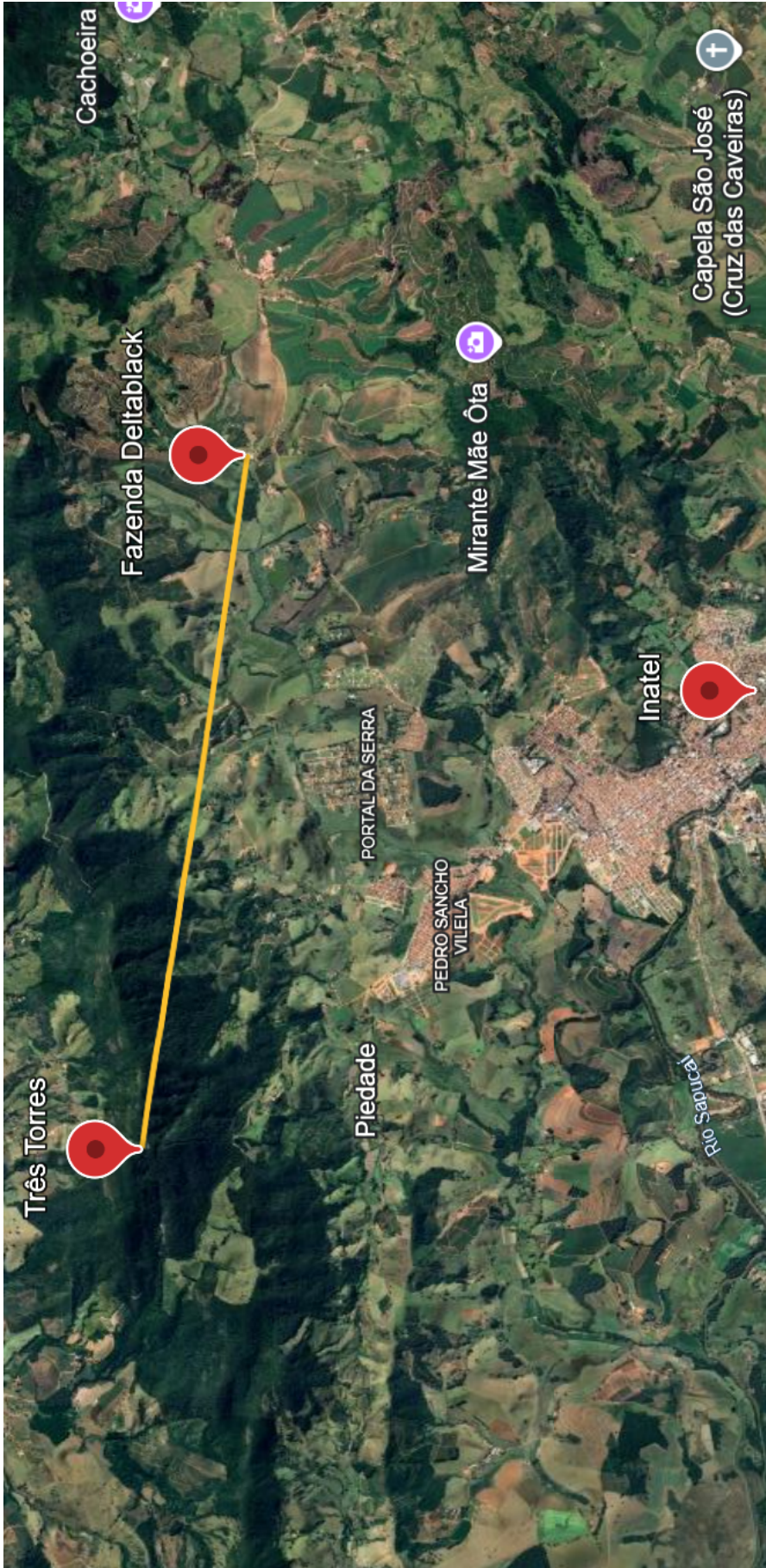


Figura 3: Visão em satélite da região de estudo e das localidades preliminarmente selecionadas para os testes de campo em Santa Rita do Sapucaí.

2.2 Testes de campo em Santa Rita do Sapucaí

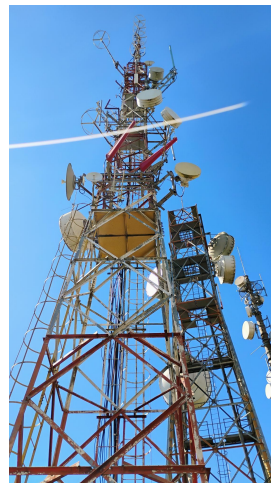
Após a etapa de planejamento, foram realizados os testes de campo nas localidades previamente selecionadas. Nessa etapa, foram realizados testes de comunicação entre a BS, instalada na Serra do Paredão e os UEs posicionados em duas localidades distintas no município de Santa Rita do Sapucaí: o campus do Inatel e a fazenda Delta *Black*. A seleção desses pontos de medição teve como objetivo avaliar o desempenho da rede de acesso Brasil 6G em diferentes condições de propagação, considerando variações de distância, relevo e características do ambiente de instalação.

Durante a campanha experimental, foram estabelecidas conexões individuais entre a BS e cada UE, permitindo avaliar separadamente o desempenho do sistema em cada ponto de medição. Portanto, inicialmente, os testes foram conduzidos em uma configuração equivalente à de usuário único, na qual cada terminal foi analisado de forma independente. Posteriormente, foram realizados ensaios com a operação simultânea de mais de um UE, com o objetivo de verificar o funcionamento do sistema em um cenário multiusuário. Nessa configuração, os terminais permaneceram conectados simultaneamente à BS, de acordo com as condições definidas para cada ensaio, possibilitando a troca de informações de controle e a realização das medições de desempenho da comunicação simultânea entre BS e os dois terminais UE.

A visão da BS instalada no abrigo da Serra do Paredão, assim como a torre na qual foram instaladas as antenas da rede protótipo, pode ser visualizada nas Figuras 4a e 4b, respectivamente. As antenas da rede de acesso são as antenas na cor vermelha da figura 4b. Como apenas a localização dos UEs foi alterada entre os diferentes cenários, foi possível comparar o desempenho dos enlaces em distintos pontos de recepção, mantendo constantes as condições de instalação da BS.



(a) BS instalada no abrigo.



(b) Torre de instalação das antenas da BS.

Figura 4: BS instalada na Serra do Paredão em Santa Rita do Sapucaí.

Os resultados detalhados para cada ponto de medição são apresentados nas subseções seguintes, juntamente com os registros fotográficos dos cenários de teste, as medições espectrais realizadas em campo e as métricas de desempenho obtidas durante a campanha experimental.

2.2.1 Testes de comunicação entre BS e UE localizada no Inatel

O primeiro teste de campo executado considerou a comunicação entre a BS e o terminal UE, denominado UE 1, instalado no campus do Inatel. Esse cenário foi utilizado para realizar uma validação inicial do funcionamento do sistema em condições mais controladas para o terminal UE, contemplando o estabelecimento da comunicação entre os terminais, o acompanhamento das métricas da camada física e a avaliação das taxas de transmissão nos enlaces de *downlink* e *uplink*.

A Figura 5 apresenta uma visão do terminal UE instalado no campus do Inatel. A Figura 5a mostra o protótipo do transceptor que compõe o terminal UE 1 instalado no ambiente do laboratório do CRR, sendo que o rack do terminal UE aparece do lado direito da foto, enquanto do lado esquerdo aparece o rack com dispositivos de *Internet of Things* (IoT) que são eventualmente integrados ao terminal para testes específicos. A Figura 5b mostra, por sua vez, a visão das antenas do terminal em questão, que são as antenas vermelhas instaladas em cima do prédio do laboratório. Estas antenas foram instaladas tendo como apontamento a Serra do Paredão.



(a) Instalação do UE no Inatel.



(b) Instalação das antenas do UE.

Figura 5: Cenário de recepção associado ao UE 1 no ponto de medição Inatel.

A Figura 6 apresenta o perfil do relevo e o enlace estabelecido entre a BS, localizada na Serra do Paredão ou Três Torres, e o UE posicionado no ponto Inatel. Com base no perfil observado, verifica-se que não há obstruções do relevo que possam comprometer o enlace.

A Figura 7 apresenta o espectro de recepção no Inatel do sinal de *downlink*. Esta medida foi realizada com analisador de espectro configurado com as características do sinal de *downlink*: largura de banda de 24 MHz e frequência central de 680 MHz. A potência de recepção do sinal recebido, com a marca 1 em verde na Figura 7, foi de $-66,7$ dBm. O sinal à direita do sinal de *downlink* é um sinal de um retransmissor de TV local que ocupa o canal 51 de UHF. Portanto, os testes em Santa Rita do Sapucaí foram realizados com a rede de acesso convivendo com um sinal de um usuário primário em seu canal adjacente que, inclusive, possui um nível de recepção superior ao sinal em teste, no caso da recepção no Inatel.

Durante os testes realizados no campus do Inatel, foram avaliados parâmetros associados aos enlaces de *downlink* e *uplink* estabelecidos entre a BS e o terminal UE 1. As medições tiveram como objetivo verificar a capacidade de transmissão do sistema nos dois sentidos da

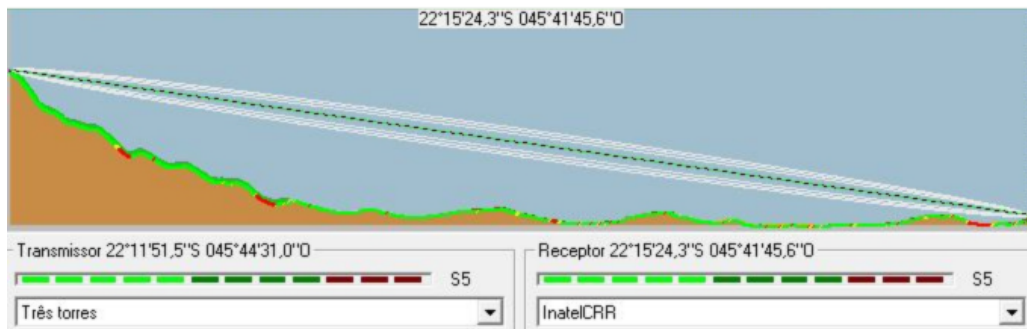


Figura 6: Perfil topográfico do enlace entre a BS e o UE instalado no Inatel.

comunicação, bem como analisar a estabilidade do enlace e o comportamento das principais métricas da camada física durante a operação. Para isso, foram realizados testes de tráfego com a ferramenta *iperf*, a partir dos quais foram obtidas as taxas médias de transmissão, enquanto o próprio sistema registrou parâmetros associados à qualidade da comunicação e ao desempenho da camada física. A Tabela 2 resume os principais resultados obtidos nessa etapa, permitindo comparar o desempenho dos enlaces de *downlink* e *uplink* e verificar sua adequação às condições de propagação observadas nesse ponto de medição. Especificamente, os parâmetros analisados são: taxa média de transmissão (*throughput*), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) média, ordem de modulação *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), taxa de codificação (*code rate*) e *Bit Error Rate* (BER).

Tabela 2: Resumo dos parâmetros obtidos nos testes de *throughput* no ponto de medição Inatel.

Parâmetro	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Taxa média	81,5 Mbps	19,5 Mbps
SNR média	25,24 dB	27,10 dB
Modulação	64-QAM	64-QAM
<i>Code rate</i>	0,792	0,784
BER	0	$2,258 \times 10^{-5}$

A Figura 8 mostra a interface gráfica dos dois terminais da rede sendo que a Figura 8a mostra a interface da BS, enquanto a Figura 8b mostra a interface do terminal UE. As figuras apresentam na parte inferior esquerda os resultados instantâneos da taxa de comunicação ou *throughput* obtida nos enlaces de *downlink* e *uplink*, respectivamente. Na parte superior esquerda de cada figura é possível observar parâmetros associados a cada enlace, como SNR e parâmetros associados à modulação e codificação, *Modulation and Coding Scheme* (MCS), adotados de forma dinâmica e automática pelo sistema. Na parte direita de cada figura é possível observar gráficos com a constelação ou visualização no domínio do tempo do sinal recebido.

Conforme evidenciado na Tabela 2 e Figura 8, no enlace de *downlink*, foi obtida uma taxa média de comunicação de aproximadamente 81,5 Mbps, com SNR média de 25,24 dB. Durante o ensaio o sistema operou com modulação 64-QAM, taxa de código ou *code rate* de 0,792 e BER igual a zero, indicando que não foram detectados erros de bit no intervalo avaliado.

No caso do enlace de *uplink*, conforme também evidenciam a Tabela 2 e Figura 8, foi registrada uma taxa média de aproximadamente 19,5 Mbps, associada a uma SNR média de 27,10 dB. O sistema também operou com modulação 64-QAM, utilizando *code rate* de 0,784,

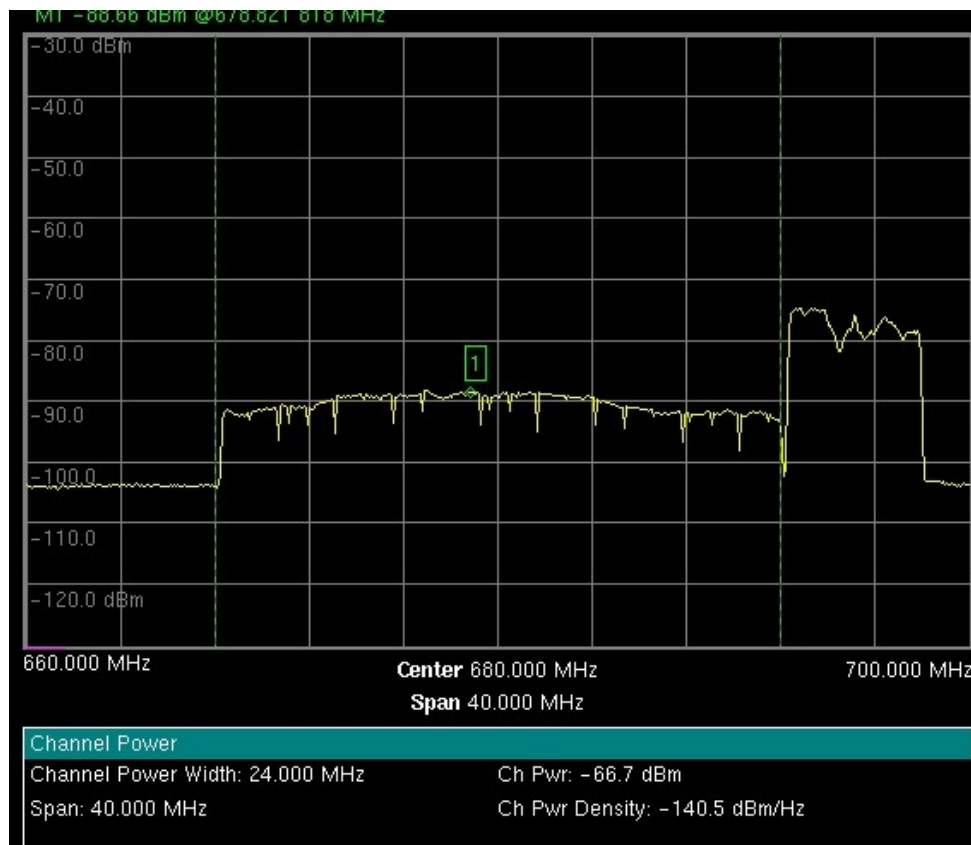
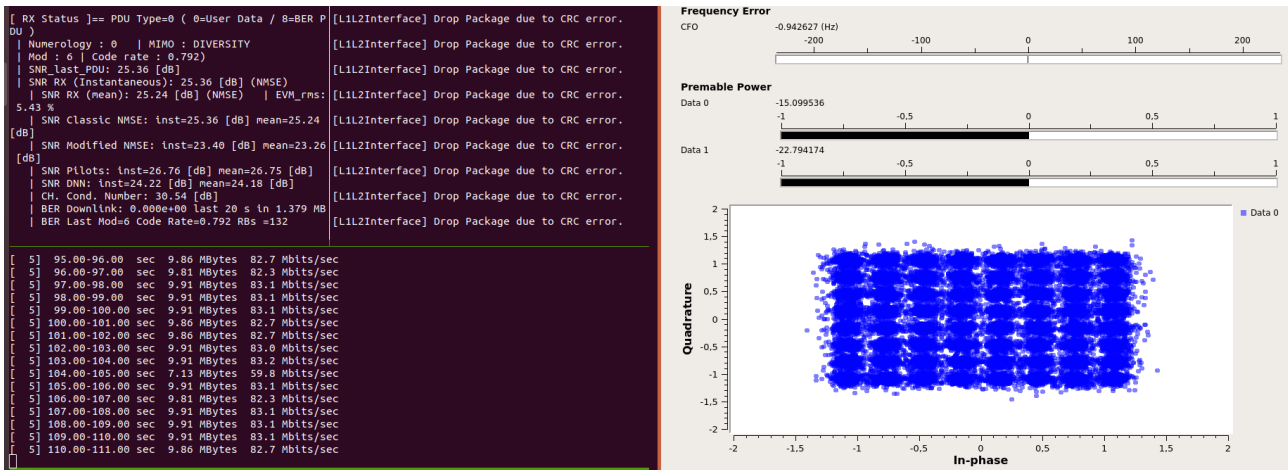


Figura 7: Medida espectral do sinal recebido do enlace de *downlink* no Inatel.

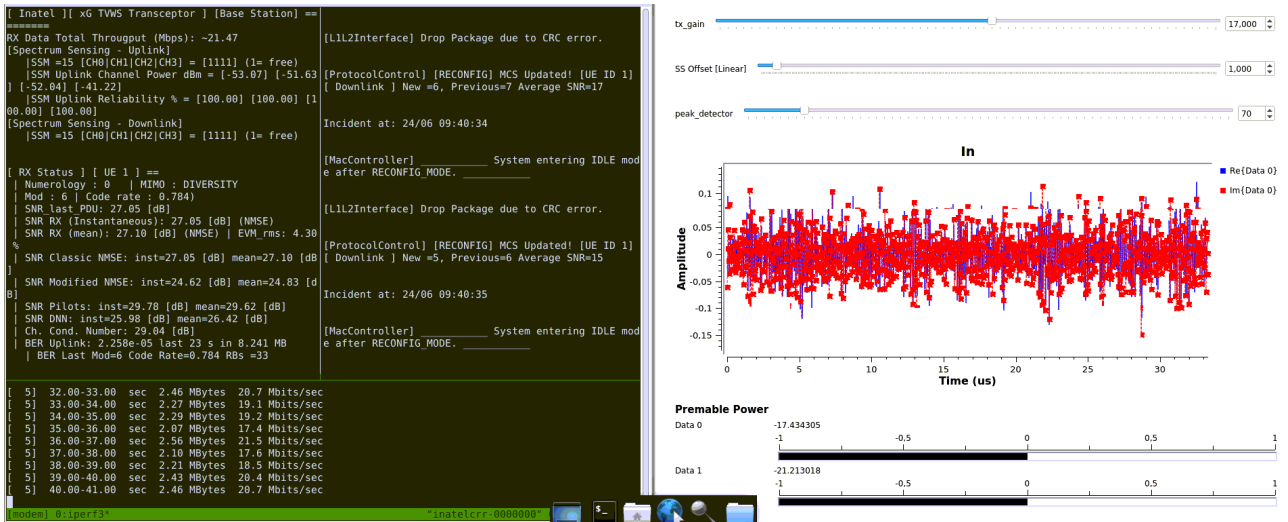
e apresentou BER de $2,258 \times 10^{-5}$. Embora esse resultado demonstre a ocorrência de erros de bit, estes não comprometeram a continuidade e a estabilidade da comunicação durante o teste.

Por fim, a Figura 9 apresenta o resultado obtido com a ferramenta web de medida de taxa de comunicação denominada *SpeedTest* [13]. Esse ensaio foi realizado como avaliação complementar do desempenho em nível de aplicação, considerando o acesso à internet por meio da rede de acesso Brasil 6G, já que o terminal BS possui acesso à internet e provê conectividade ao terminal UE. O teste com o *SpeedTest* registrou taxas de aproximadamente 81,82 Mbps em *download* e 19,29 Mbps em *upload*. Esses valores são próximos às taxas médias obtidas com a ferramenta *iperf*, mostradas anteriormente, como, por exemplo, na Figura 8.

De modo geral, os resultados demonstram que o sistema manteve comunicação bidirecional estável no campus do Inatel, com taxas de transmissão adequadas à SNR e desempenho satisfatório em ambos os sentidos do enlace. As métricas da camada física indicaram condições adequadas para a utilização de modulação 64-QAM e taxas de codificação elevadas. Adicionalmente, os resultados de *throughput* obtidos com o *iperf* foram corroborados pelas medições realizadas com a ferramenta *SpeedTest*, evidenciando desempenho consistente tanto em nível de enlace quanto na utilização de uma aplicação de acesso à Internet. Dessa forma, o conjunto de medições confirma a capacidade da rede de acesso Brasil 6G de fornecer conectividade com taxas coerentes com o cenário, mantendo desempenho adequado nos sentidos de *downlink* e *uplink*.



(a) Interface do UE durante teste de *throughput* no enlace de *downlink* (81,5 Mbps).



(b) Interface da BS durante teste de *throughput* no enlace de *uplink* (19,5 Mbps).

Figura 8: Resultados de *throughput* para os enlaces de *downlink* e *uplink* entre a BS e o UE 1.

2.2.2 Testes de comunicação entre BS e UE 2 localizada na fazenda Delta Black

Em uma segunda bateria de testes, a BS permaneceu instalada na Serra do Paredão, enquanto um terminal UE, denominado de UE 2, foi instalado na fazenda Delta Black, localizada na área rural de Santa Rita do Sapucaí. Esse cenário permitiu avaliar o desempenho do sistema em um enlace com distância ligeiramente superior à considerada no primeiro teste e sob condições de propagação distintas das observadas no campus do Inatel. A Figura 10 mostra uma visão geral do ambiente onde foi montado temporariamente o terminal UE. O protótipo do terminal foi instalado na carroceria de uma camionete, para facilitar a locomoção até o local do teste. A camionete foi estacionada à frente de uma construção da fazenda e as antenas foram posicionadas à direita dessa mesma construção, visando obter uma melhor visada com a Serra do Paredão.

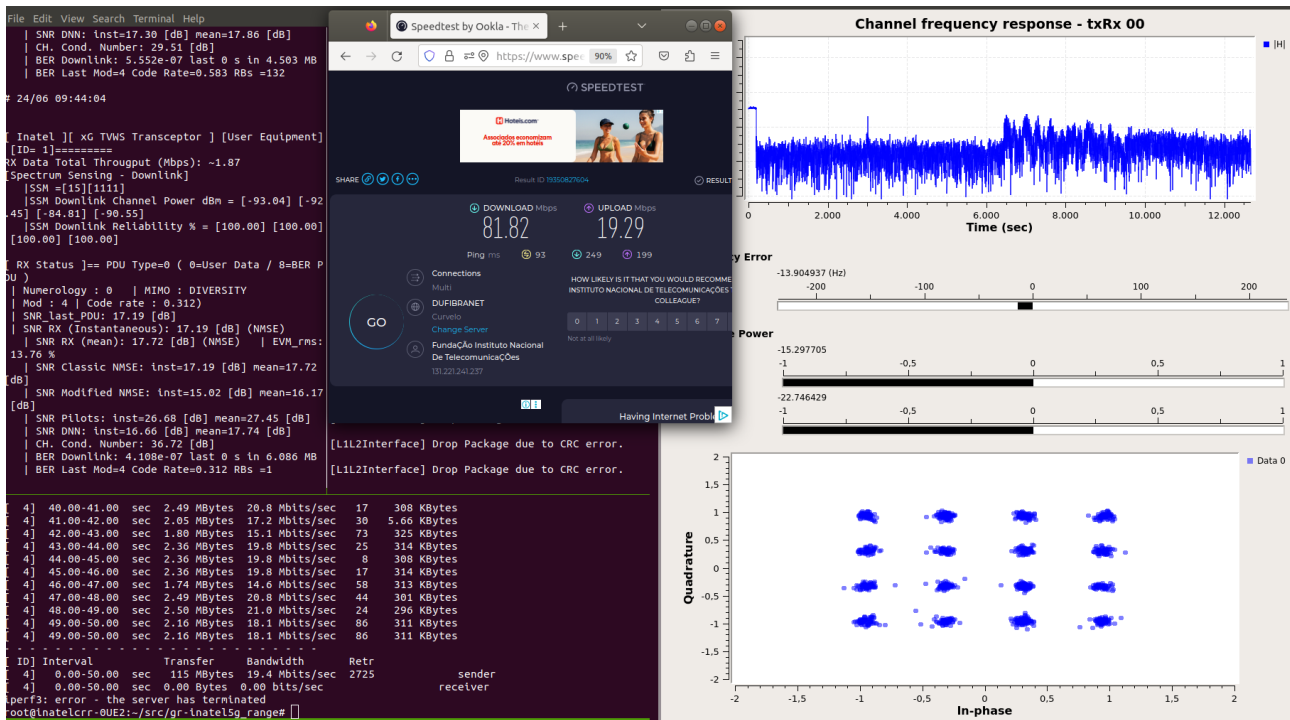


Figura 9: Resultado do teste obtido por meio do *SpeedTest* no ponto de medição Inetel.



Figura 10: Visão geral da instalação na fazenda.

A Figura 11 mostra mais detalhes do *setup* na fazenda. A Figura 11a mostra uma visão do terminal UE instalado na carroceria da camionete, enquanto a Figura 11b mostra o apontamento das antenas com a Serra do Paredão ao fundo.



(a) Instalação do UE 2.



(b) Instalação das antenas do UE 2.

Figura 11: Cenário de recepção associado ao UE 2 no ponto de medição fazenda Delta *Black*.

Para caracterizar o segundo cenário de teste, a Figura 12 apresenta o perfil topográfico do enlace estabelecido entre a BS, instalada na Serra do Paredão ou morro das Três Torres, e o terminal UE 2, posicionado na fazenda Delta *Black*. A distância aproximada entre os pontos de transmissão e recepção é de 7,35 km. O perfil indica condições topográficas favoráveis à propagação do sinal, especialmente pela ausência de obstruções significativas ao longo do trajeto, que poderiam comprometer o desempenho e a estabilidade da comunicação.

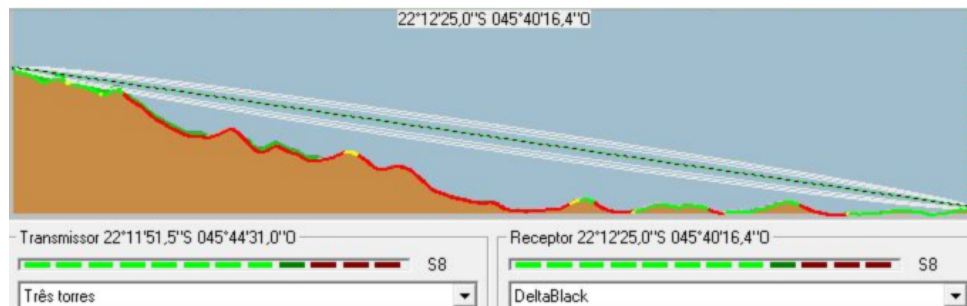


Figura 12: Perfil topográfico do enlace entre a BS e o UE instalado na fazenda Delta *Black*.

A Figura 13 apresenta o espectro do sinal de *downlink* recebido pelo UE 2 na fazenda Delta *Black*, obtido por meio de um analisador de espectro durante a campanha experimental. Considerando uma largura de banda de 24 MHz, com frequência central de 680 MHz, foi medida uma potência de canal de aproximadamente $-64,4$ dBm. O sinal mais elevado e à direita na referida figura é o sinal da retransmissora de TV local sendo recebido em canal adjacente ao da rede de acesso (canal 51 de UHF).

Após análise das condições de recepção, foram realizados testes de *throughput* nos enlaces de *downlink* e *uplink*, com o objetivo de avaliar o desempenho bidirecional da rede de acesso. A Figura 14 mostra a interface gráfica dos dois terminais da rede, sendo que a Figura 14a mostra a interface do UE, enquanto a Figura 14b mostra a interface do terminal BS, que serão melhor descritas a seguir.

A figura 14a apresenta na parte inferior esquerda, resultados instantâneos da taxa de comunicação ou *throughput* obtida nos testes do enlace de *downlink*, cuja taxa média é da ordem de 95 Mbps. A figura mostra na parte superior esquerda os parâmetros do enlace de comunicação, na parte superior direita uma visão da resposta em frequência do canal e na parte inferior direita a constelação do sinal recebido. A Figura 14b, por sua vez, apresenta na parte

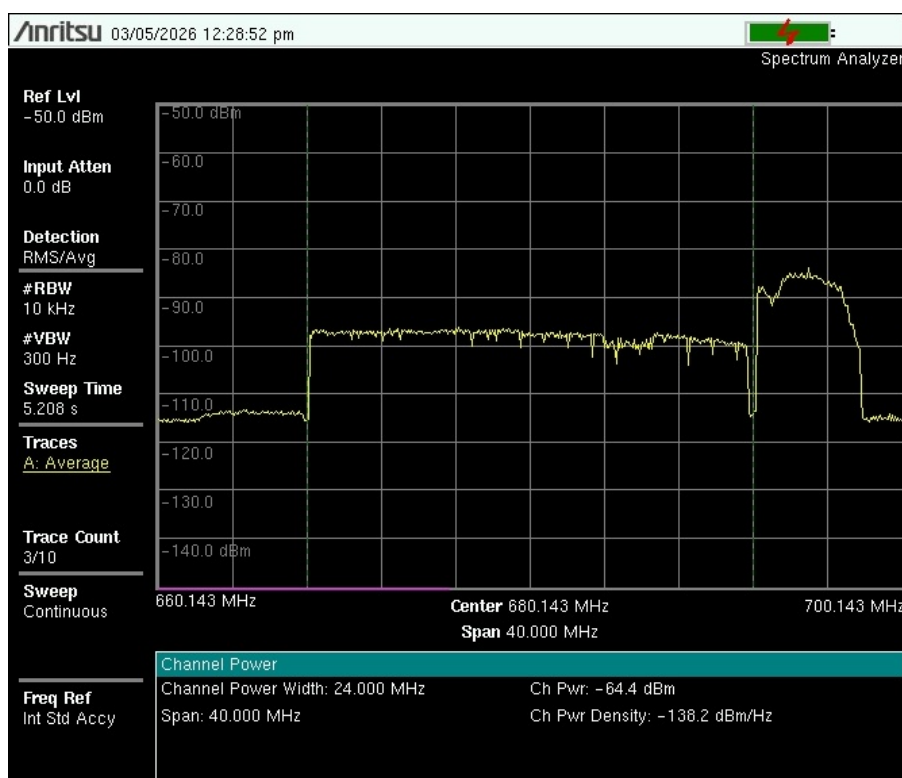


Figura 13: Espectro do sinal recebido no UE 2 no ponto de medição fazenda Delta Black.

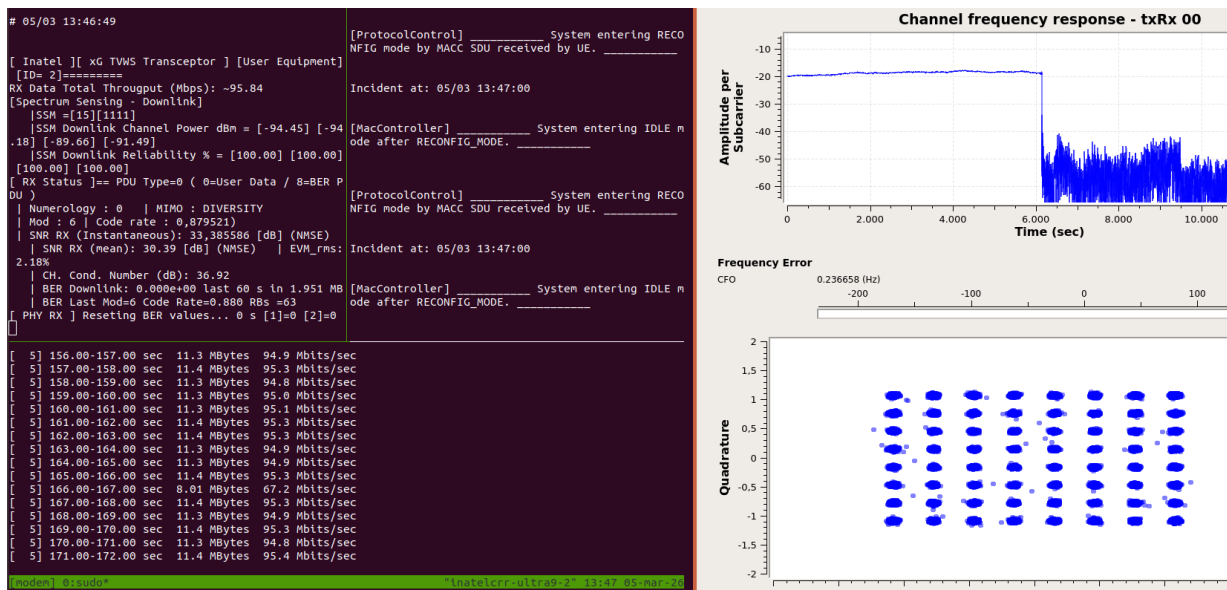
inferior direita os resultados instantâneos do *throughput* obtido nos testes do enlace de *uplink*, cujo valor médio é da ordem de 24 Mbps, e mostra na parte superior esquerda os parâmetros deste enlace.

A Tabela 3 resume os principais parâmetros registrados durante essa etapa de testes. Os resultados obtidos demonstram condições favoráveis de propagação e operação estável do enlace. Tanto no *downlink* quanto no *uplink*, os valores de SNR permitiram a utilização de modulação 64-QAM, com *code rate* de 0,88 no *downlink* e 0,562 no *uplink*. Além disso, a ausência de erros de bit nos dois sentidos de transmissão reforça a qualidade do enlace e a adequação das condições de operação nesse ponto de medição.

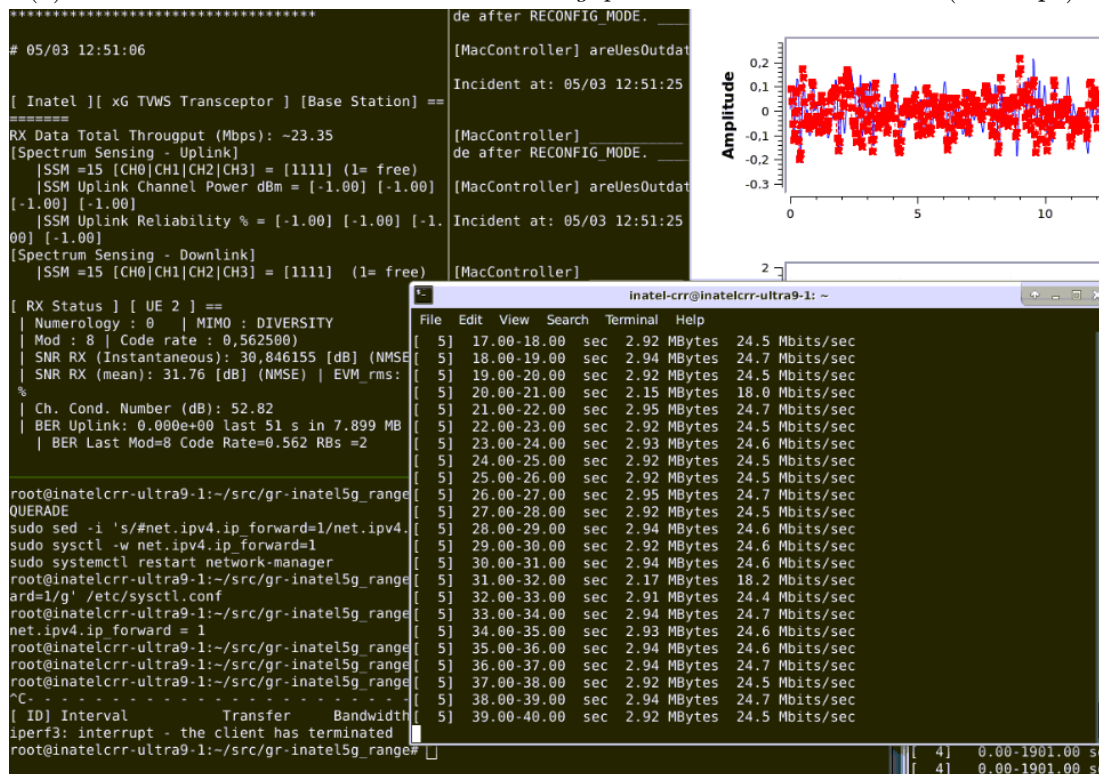
Tabela 3: Resumo dos parâmetros obtidos nos testes de *throughput* no ponto de medição fazenda Delta Black.

Parâmetro	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Taxa média	95 Mbps	24 Mbps
SNR média	30,39 dB	31,76 dB
Modulação	64-QAM	64-QAM
<i>Code rate</i>	0,88	0,562
BER	0	0

Foram realizados testes de taxa de acesso à internet como uma avaliação complementar do desempenho em nível de aplicação. A Figura 15 apresenta o resultado obtido por meio da ferramenta web denominada de Minha Conexão [14]. Destacando que a conectividade com a internet foi provida pelo terminal BS que possui acesso direto à internet. A taxa de comunicação da referida ferramenta registra o valor de 88,6 Mbps de *download* e de 25 Mbps de *upload*, sendo estes valores próximos aos obtidos nos testes com a ferramenta *Iperf*.



(a) Interface do UE durante testes de *throughput* do enlace de *downlink* (95 Mbps).



(b) Interface da BS durante teste de *throughput* do enlace de *uplink* (24 Mbps).

Figura 14: Resultados de testes dos enlaces entre a BS e o UE instalado na fazenda Delta *Black*.

Foram realizados testes complementares para avaliação do impacto do aumento da potência de transmissão do terminal BS, a fim de identificar o impacto da restrição de potência imposta aos sistemas de TVWS. Portanto, foram realizados testes no enlace de *downlink* considerando diferentes níveis de potência de transmissão da BS e a recepção no terminal UE instalado na fazenda Delta *Black*. As Figuras 16a e 16b apresentam, respectivamente, os resultados obtidos

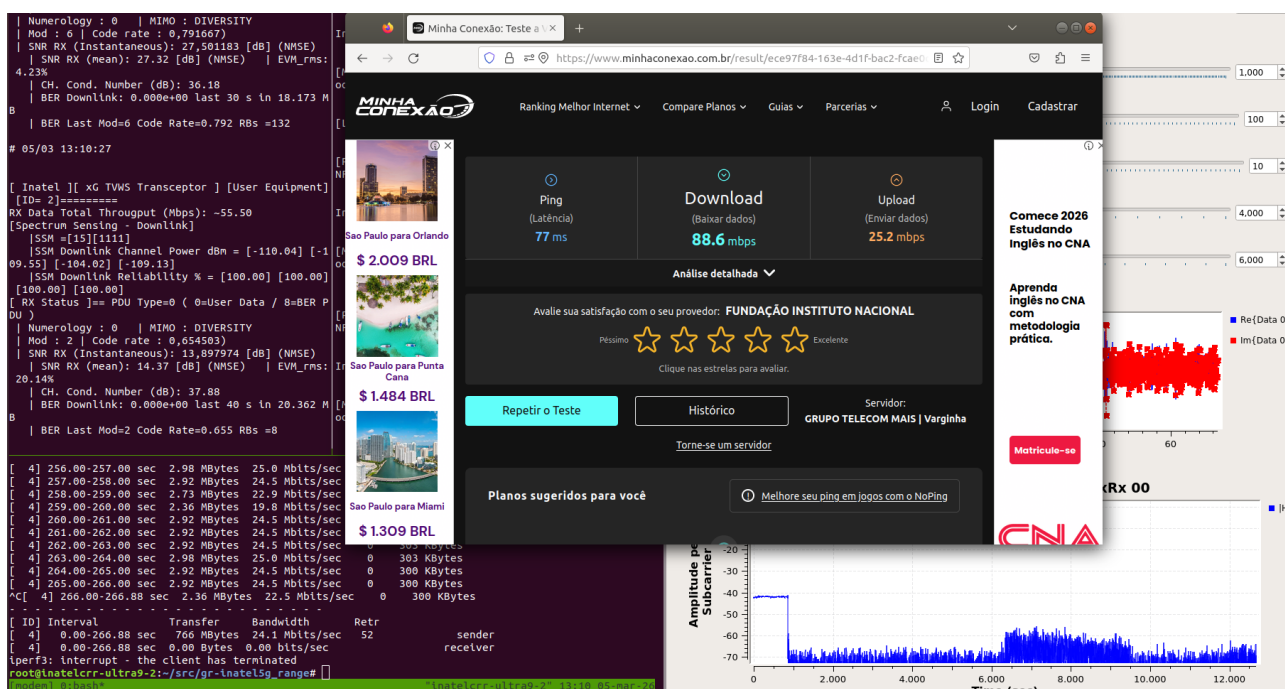


Figura 15: Resultado do teste obtido por meio do *SpeedTest* no ponto de medição fazenda Delta Black.

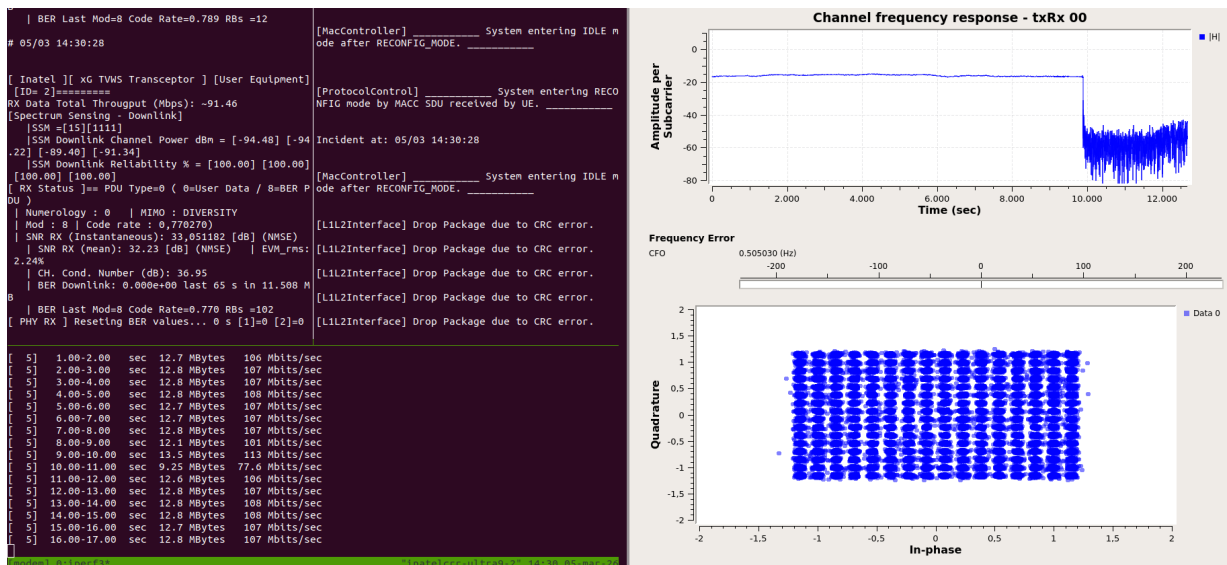
para potência de transmissão aproximadamente 26 dBm e 28 dBm entregue à cada antena de transmissão. Para fins de comparação, nos resultados apresentados na Figura 14, foi considerada uma potência de transmissão de 23 dBm entregue a cada antena. Com o aumento da potência, foram alcançadas taxas de comunicação da ordem de 107 Mbps e 114 Mbps, respectivamente. Esses resultados indicam que, nas condições avaliadas, o incremento da potência transmitida contribuiu significativamente para a melhoria do desempenho do enlace.

De forma geral, os resultados obtidos nesse cenário evidenciam que as condições do enlace foram favoráveis para o estabelecimento da comunicação entre a BS e o UE 2 na fazenda Delta Black. Observou-se desempenho estável ao longo dos testes, com ausência de erros de bit, elevados níveis de SNR e utilização de modulação com valores de *code rate* compatíveis com a qualidade do canal.

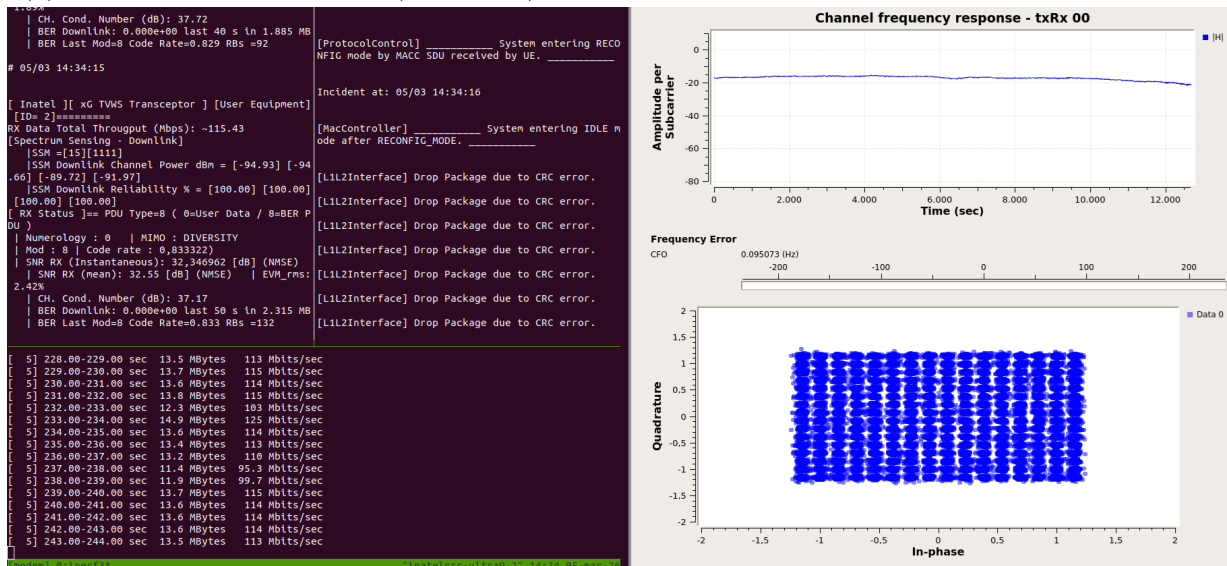
Como resultado, foram alcançadas taxas elevadas de transmissão, próximas de 95 Mbps em *downlink* e 24 Mbps em *uplink*, conforme evidenciam as Figuras 14a e 14b, garantindo uma comunicação eficiente e estável ao longo do enlace. Adicionalmente, para níveis mais elevados de potência de transmissão da BS, foram obtidas taxas superiores a 100 Mbps em *downlink*, demonstrando o bom desempenho do sistema sob condições mais favoráveis.

2.2.3 Teste de comunicação multiusuário: terminais e UEs localizados no Inatel e na fazenda

Além dos testes individuais conduzidos em cada ponto de medição, conforme evidenciado nas seções anteriores, foi realizada avaliação da operação da rede de acesso Brasil 6G em uma configuração multiusuário. Nesse ensaio, a BS permaneceu instalada na Serra do Paredão, com potência de transmissão de 23 dBm entregue a cada antena. Os dois terminais UEs operaram simultaneamente em localidades distintas: o UE 1, no campus do Inatel, e o UE 2, na fazenda Delta Black. Essa configuração permitiu verificar o comportamento do sistema



(a) Teste vazão de *Downlink* (107 Mbps) com potência de transmissão de 26 dBm por antena.



(b) Teste vazão de *Downlink* (114 Mbps) com potência de transmissão de 28 dBm por antena.

Figura 16: Resultados de *downlink* para diferentes níveis de potência de transmissão na fazenda Delta Black.

diante do atendimento simultâneo à terminais submetidos a diferentes distâncias e condições de propagação.

O ensaio concentrou-se na transmissão da BS para os dois terminais, situação em que a capacidade disponível do sistema é compartilhada entre os usuários ativos. O objetivo foi avaliar se a inclusão de um segundo terminal comprometeria a estabilidade da comunicação ou reduziria significativamente a capacidade agregada da rede. Além disso, buscou-se observar a distribuição das taxas de transmissão entre os UEs, considerando que diferenças nas condições de cada enlace podem influenciar a alocação dos recursos e o desempenho individual dos terminais.

A visão da interface do terminal BS durante a realização dos testes com comunicação com os múltiplos terminais está apresentada na Figura 17. A Figura 17 mostra do lado superior esquerdo uma visão dos parâmetros do enlace de comunicação de *uplink* com cada terminal.

A janela do lado superior esquerdo na referida figura mostra o resultado instantâneo da comunicação de *downlink* com o terminal UE 1, instalado no Inatel. A janela do lado inferior esquerdo, por sua vez, mostra o resultado instantâneo da comunicação de *downlink* com o terminal UE 2, instalado na fazenda. Conforme mostrado na figura, a taxa de comunicação estabelecida com o terminal instalado no Inatel foi da ordem de 44 Mbps, e a comunicação com o terminal instalado na fazenda foi da ordem de 49 Mbps. A soma das taxas individuais resultou em uma capacidade agregada próxima de 90 Mbps ao longo do intervalo analisado, indicando que o sistema manteve elevado aproveitamento dos recursos disponíveis mesmo com dois usuários ativos. O tráfego de dados entre os terminais UEs e a BS foi gerado de maneira simultânea fazendo uso da ferramenta *iperf*.

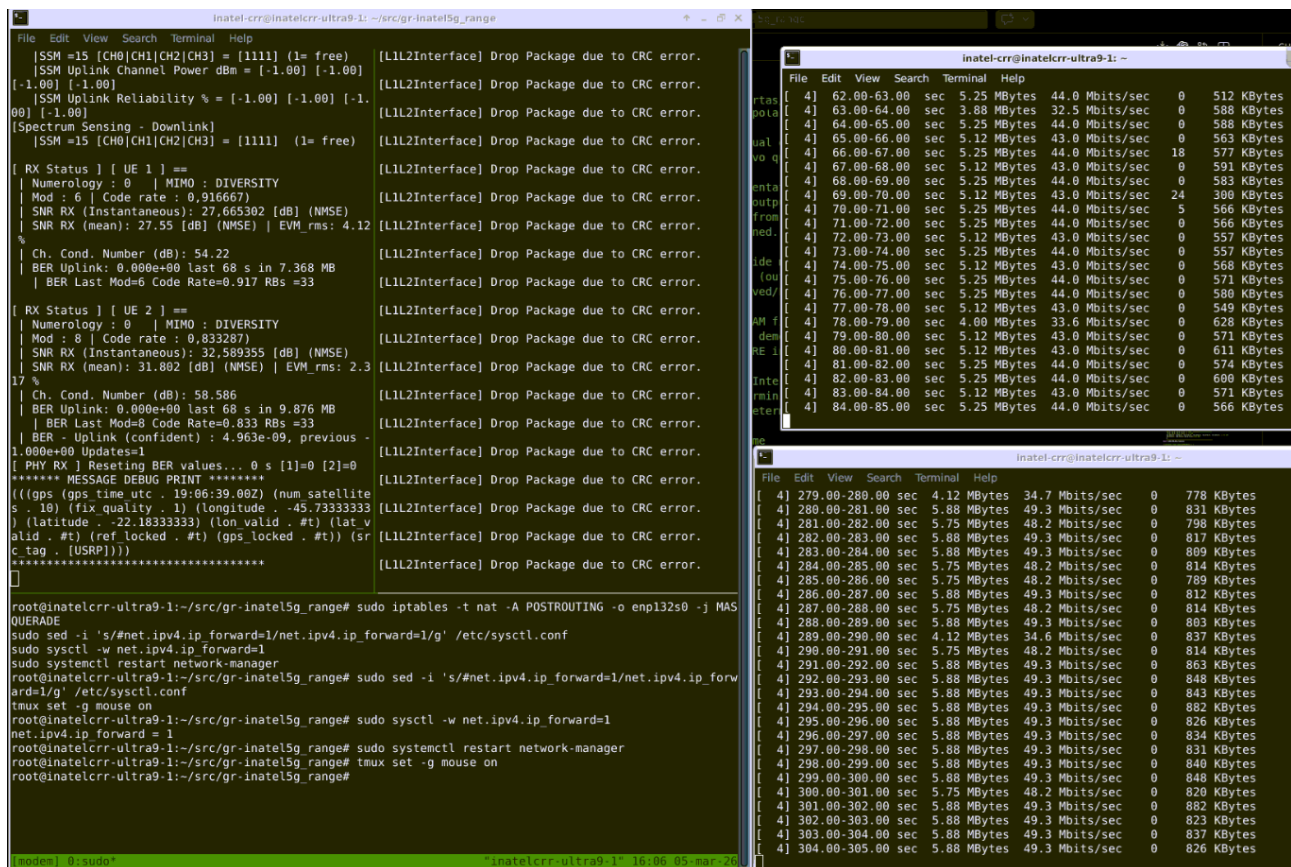


Figura 17: Visão da interface do terminal BS durante comunicação com múltiplos usuários.

Com relação às informações associadas ao enlace de *uplink* de terminal, registradas pela BS e mostradas na parte superior esquerda da Figura 17, pode-se visualizar as informações resumidas na Tabela 4. A comunicação com os múltiplos terminais, cada um operando com parâmetros associados ao seu enlace de maneira distinta e adequada às condições particulares demonstram a flexibilidade e capacidade de adaptação da rede.

O teste de comunicação simultânea confirmou a capacidade da rede de acesso Brasil 6G de atender múltiplos terminais instalados em localidades distintas, sem redução significativa da capacidade total de transmissão. Os resultados também demonstram que a arquitetura multiusuário permite compartilhar os recursos de transmissão com os diferentes terminais, que o terminal BS foi capaz de processar dados originados por diferentes terminais, a etapa de sincronização operou adequadamente e, além disso, pode-se observar a estabilidade da comunicação.

Tabela 4: Comunicação multiusuário em Santa Rita: parâmetros do enlace de *uplink*.

Parâmetro	Terminal	
	UE 1	UE 2
SNR (de recepção na BS)	27,55 dB	31,9 dB
EVM %	4,12	2,3
Modulação	64-QAM	256-QAM
Taxa de codificação	0,92	0,83

Apesar do número de terminais envolvidos ser reduzido, foi possível testar os algoritmos principais que viabilizam o suporte à múltiplos terminais.

2.2.4 Análise consolidada dos resultados dos testes em Santa Rita do Sapucaí

Esta seção apresenta a análise consolidada dos resultados obtidos nos pontos avaliados no cenário de Santa Rita do Sapucaí, considerando os enlaces estabelecidos entre a BS e as UEs posicionadas nas localidades Inatel e fazenda Delta *Black*.

O objetivo desta análise é correlacionar os níveis de potência recebida, os valores de SNR, os esquemas de modulação e codificação adotados pelo sistema e as taxas efetivas de transmissão obtidas nos enlaces de *downlink* e *uplink*. Entretanto, é importante destacar que a potência recebida não deve ser interpretada, isoladamente, como indicador direto do desempenho final do enlace. Embora exista uma relação geral entre maior potência recebida e melhores condições de recepção, os valores de SNR também dependem do nível de ruído e interferência no local, das condições de propagação, da presença de multipercurso, de possíveis obstruções parciais, da desobstrução da zona de Fresnel e do alinhamento das antenas, destacando que a antena da BS está apontada para a fazenda e o Inatel fica na lateral da direção deste apontamento.

Essa observação é particularmente relevante porque os resultados mostram que enlaces com potências recebidas relativamente próximas podem apresentar diferenças de SNR. Por exemplo, a diferença de potência recebida entre fazenda Delta *Black* e Inatel é da ordem de 2 dB, mas a diferença observada na SNR é maior, chegando a cerca de 5 dB. Isso indica que, além da atenuação do percurso, as condições locais de recepção e o ambiente de propagação influenciaram diretamente a qualidade efetiva do sinal recebido. Há no laboratório do Inatel outros sistemas em teste que podem também gerar interferências locais e prejudicar a recepção. A Tabela 5 reúne os principais parâmetros obtidos no enlace de *downlink* para os diferentes cenários de posicionamento dos UEs. São apresentados a distância entre cada UE e a BS ("Dist. (km)"), a potência recebida em *downlink* ("Pot. DL (dBm)"), a SNR medida nesse enlace ("SNR DL (dB)"), a modulação empregada ("Mod"), a taxa de codificação ("CR", do inglês *code rate*) e a taxa média de transmissão de dados em *downlink* ("Taxa DL").

Tabela 5: Resumo consolidado dos parâmetros de desempenho em *downlink* no cenário de Santa Rita do Sapucaí.

Cenário	Dist. (km)	Pot. DL (dBm)	SNR DL (dB)	Mod.	CR	Taxa DL
Inatel	8,09	-66,7	25,24	64-QAM	0,792	81,5 Mbps
Fazenda Delta <i>Black</i>	7,35	-64,4	30,39	64-QAM	0,88	95 Mbps

Nos resultados de *downlink*, os dois pontos avaliados apresentaram comportamento estável e taxas efetivas elevadas. A maior taxa foi obtida na fazenda Delta *Black*, atingindo aproximadamente 95 Mbps. No ponto Inatel, a taxa média foi próxima de 81,5 Mbps. Esses resultados mostram que o sistema conseguiu manter desempenho adequado nos dois cenários, desde que as condições de SNR permanecessem favoráveis.

Em relação ao enlace de *uplink*, a Tabela 6 reúne os principais parâmetros obtidos para os diferentes cenários de posicionamento do UE. São apresentados os valores de SNR medidos no *uplink*, identificados como “SNR UL (dB)”, a modulação empregada (“Mod”), a taxa de codificação (“CR”) e a taxa média de transmissão de dados em *uplink* (“Taxa UL”).

Tabela 6: Resumo dos parâmetros de desempenho em *uplink* no cenário de Santa Rita do Sapucaí.

Cenário	SNR UL (dB)	Mod.	CR	Taxa UL
Inatel	27,10	64-QAM	0,784	19,5 Mbps
Fazenda Delta <i>Black</i>	31,76	64-QAM	0,562	24 Mbps

Nos enlaces de *uplink*, também foi observado desempenho estável nos dois cenários avaliados. A maior taxa média foi obtida na fazenda Delta *Black*, com aproximadamente 24 Mbps. No ponto Inatel foi obtida taxa de aproximadamente 19,5 Mbps. Apesar das diferenças entre os valores de SNR e *code rate*, os dois enlaces mantiveram taxas compatíveis com uma operação estável do sistema.

Os testes mencionados acima foram realizados utilizando a ferramenta *iperf*. Testes de vazão considerando a comunicação com a internet, provida pelo terminal BS, e utilizando ferramentas *web* indicaram taxas de comunicação similares àquelas obtidas nos testes com *iperf*, confirmando que a metodologia utilizada é coerente.

De forma geral, os resultados obtidos no cenário de Santa Rita do Sapucaí demonstram que o sistema apresentou desempenho coerente com o esperado tanto no enlace de *downlink* quanto no *uplink*, mantendo taxas de comunicação nos pontos avaliados. A análise consolidada também mostra que a qualidade final do enlace não depende apenas da distância entre a BS e o UE, mas de um conjunto de condições reais de propagação, interferência local, potência recebida, SNR e configuração de transmissão adotada pelo sistema.

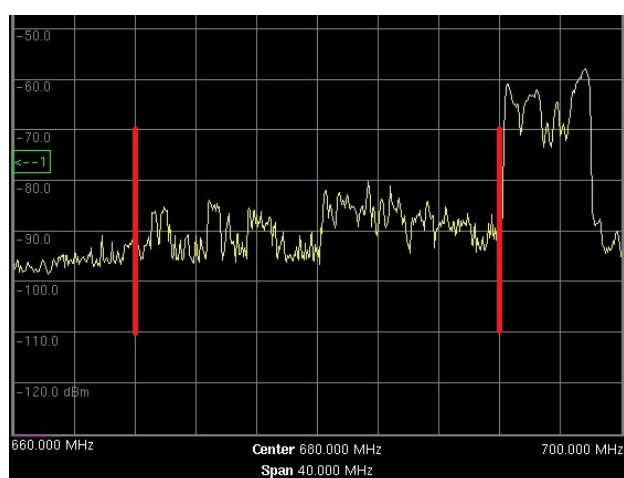
2.3 Análises e testes de estabilidade

Além dos testes de desempenho descritos nas seções anteriores, foram conduzidos ensaios e análise com maior duração com o objetivo de avaliar a estabilidade temporal do enlace da rede de acesso Brasil 6G sob operação contínua. Os testes foram realizados considerando a comunicação entre a BS instalada na Serra do Paredão e o terminal UE instalado no campus do Inatel e contemplando transmissões em *downlink* e *uplink*. Cada teste teve duração aproximada de 14.000 s, correspondente a cerca de 3 h e 53 min. Ao longo desse período, os parâmetros de desempenho foram registrados em intervalos de aproximadamente 1 s, possibilitando analisar tanto o comportamento médio do enlace quanto eventuais variações e instabilidades ao longo do tempo.

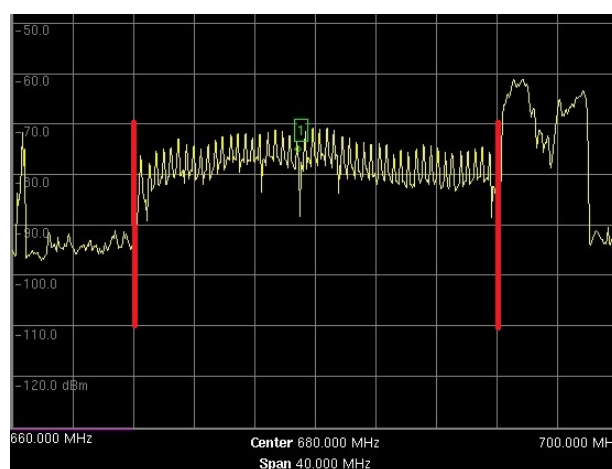
Nesta análise, foram considerados os ensaios realizados com tráfego de dados com o protocolo *User Datagram Protocol* (UDP). Para cada condição de operação, foram registrados a taxa efetiva de transmissão, a SNR, o esquema de modulação empregado, a BER e o *Error*

Vector Magnitude (EVM). Ao término da campanha, também foi executado um teste de *ping* para avaliar a latência, expressa pelo *Round-Trip Time* (RTT), e a variabilidade temporal da resposta do enlace, utilizada como estimativa de *jitter*. Dessa forma, os testes de longa duração permitiram examinar, de maneira conjunta, a *throughput* obtida em UDP, a estabilidade dos principais parâmetros da camada física e o comportamento temporal da comunicação.

Antes da análise temporal dos resultados, foi realizada uma avaliação espectral no ponto de recepção, com o objetivo de caracterizar as condições do ambiente rádio no momento dos ensaios. A Figura 18 apresenta a comparação entre o espectro observado no ponto Inatel antes da realização das transmissões e o espectro medido durante a recepção do sinal no ensaio de longa duração. Em ambos os casos, a região delimitada pelas linhas vermelhas representa a faixa de frequências efetivamente utilizada pelo sistema durante os testes.



(a) Espectro sem sinal da BS.



(b) Espectro durante a recepção de sinal da BS.

Figura 18: Comparação do espectro no ponto Inatel antes da transmissão e durante o ensaio de longa duração. As linhas vermelhas delimitam a faixa ocupada pelo sinal.

Para a obtenção dos espectros apresentados na Figura 18, foi inserido um *Low Noise Amplifier* (LNA), com ganho aproximado de 20 dB, na cadeia de recepção do analisador de espectro. Esse ganho adicional elevou o nível dos sinais na entrada do equipamento, facilitando a identificação da ocupação espectral e de possíveis componentes interferentes na faixa analisada. Como consequência, os valores absolutos de potência mostrados nessa figura incluem o ganho introduzido pelo LNA e, portanto, não podem ser comparados diretamente com as medições de potência recebida nas demais etapas deste relatório, nas quais a antena foi conectada diretamente ao instrumento de medição. Assim, os espectros da Figura 18 devem ser interpretados de forma predominantemente comparativa entre si, com ênfase nas diferenças observadas antes e durante a transmissão, e não como uma medida absoluta da potência recebida pelo sistema.

A comparação entre os dois espectros permite observar que os testes foram realizados em um ambiente sujeito a interferências dentro e próximo da faixa utilizada pelo sistema. No espectro observado antes da transmissão, já é possível identificar componentes espectrais interferentes na região de interesse. Durante a recepção do sinal, observa-se a ocupação espectral associada ao enlace em operação, sobreposta a um ambiente que não se encontrava livre de interferências.

Durante a campanha de medição, observou-se que as interferências presentes no ambiente não permaneceram constantes ao longo do tempo. Em alguns instantes, os sinais interferentes apresentaram amplitudes menores e consequente ocupação espectral menos evidente, enquanto

em outros momentos surgiram componentes de maior intensidade dentro ou próximas da faixa utilizada pelo sistema. Esse comportamento intermitente reforça que o enlace foi avaliado em um cenário real de operação, sujeito a variações temporais do ambiente de rádio e à presença de interferências externas durante os testes.

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam os resultados temporais obtidos nos testes de longa duração. De forma geral, os ensaios demonstraram operação contínua e estável da rede de acesso Brasil 6G ao longo do período analisado, mesmo diante da presença de interferências no ambiente de medição. No teste de *downlink*, a taxa de transmissão permaneceu praticamente constante em torno da taxa configurada para o ensaio, de 70 Mbps, apresentando apenas oscilações pontuais, pequenas e de curta duração. No caso do *uplink*, também foi observada operação contínua, com taxa próxima ao valor configurado para o teste, de 18 Mbps, conforme esperado pela configuração assimétrica do sistema.

Na Figura 19, percebe-se que, ao longo dos aproximadamente 14.000 s do ensaio em *downlink*, a taxa de transmissão permaneceu concentrada em torno de 70 Mbps, apresentando apenas pequenas oscilações, geralmente inferiores a 1 Mbps, e poucos valores isolados entre aproximadamente 67,5 e 72,5 Mbps; embora esses eventos pareçam visualmente destacados devido à escala reduzida do eixo vertical, eles foram pontuais e não indicam uma mudança persistente na taxa de transmissão. A SNR manteve-se predominantemente entre 23 e 26 dB, com quedas pontuais próximas de 20 dB e uma discreta redução de seu nível médio em determinados intervalos, especialmente entre aproximadamente 9.000 e 12.000 s. Em resposta a essas variações do canal, o *code rate* foi ajustado dinamicamente, permanecendo, na maior parte do tempo, entre cerca de 0,6 e 0,85, com reduções breves para valores inferiores quando as condições de recepção se tornaram menos favoráveis. De forma coerente, a modulação 64-QAM foi empregada durante a maior parte do teste, enquanto transições temporárias para 16-QAM ocorreram como mecanismo de aumento da robustez. A BER permaneceu próxima de zero durante quase todo o período, com eventos localizados da ordem de 10^{-4} e picos inferiores a 9×10^{-4} , observados principalmente nas proximidades de 6.500, 9.800 e 12.800 s. O EVM, por sua vez, concentrou-se majoritariamente entre 4% e 8%, apresentando poucos aumentos isolados, entre os quais se destaca um pico próximo de 20% em torno de 9.700 s. A ocorrência simultânea de reduções da SNR, ajustes do *code rate*, mudanças temporárias de modulação e aumentos localizados da BER e do EVM indica a atuação do mecanismo de adaptação do enlace; ainda assim, a manutenção da taxa próxima de 70 Mbps demonstra que essas perturbações foram pontuais e não comprometeram a estabilidade global da transmissão.

No ensaio de *uplink*, que resultou na Figura 20, o comportamento do enlace também se manteve estável ao longo dos aproximadamente 14.000 s de observação. A taxa permaneceu, na maior parte do tempo, próxima de 17 Mbps, com pequenas oscilações e algumas quedas pontuais que, embora visualmente destacadas pela escala do gráfico, não se prolongaram nem comprometeram a continuidade da transmissão. A SNR variou apenas levemente, mantendo-se em torno de 26 a 27 dB, o que permitiu ao sistema operar com modulação 64-QAM durante todo o teste. As adaptações às pequenas variações do canal ocorreram principalmente por meio de ajustes no *code rate*, que permaneceu próximo de 0,8 na maior parte do período, com reduções breves em alguns instantes. A BER apresentou valores muito baixos, predominantemente da ordem de 10^{-5} , enquanto o EVM se concentrou aproximadamente entre 4,4% e 5,3%. Uma perturbação localizada, observada por volta de 1.500 s, resultou simultaneamente em redução da SNR, aumento do EVM e queda momentânea da taxa, mas o enlace retornou rapidamente ao comportamento habitual. Em conjunto, esses resultados mostram que a transmissão em *uplink* permaneceu consistente durante o ensaio de longa duração, sem variações persistentes

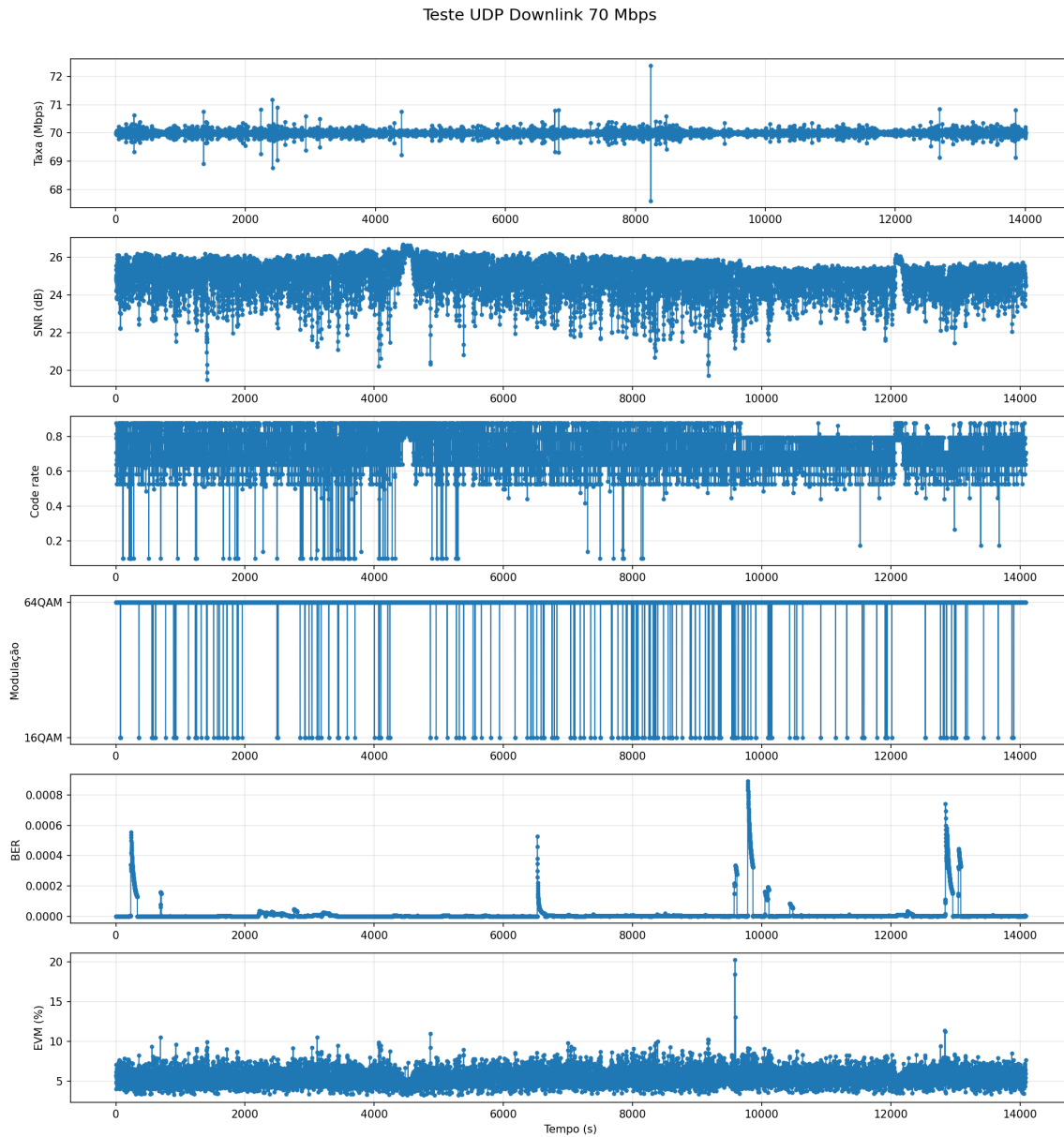


Figura 19: Resultado do teste de longa duração para UDP em *downlink*, considerando taxa de transmissão e métricas da camada física.

nos principais indicadores de desempenho.

Além das taxas de transmissão, o teste de *ping*, realizado por meio do protocolo *Internet Control Message Protocol* (ICMP), permitiu avaliar a estabilidade temporal da comunicação durante o ensaio de longa duração. Conforme apresentado na Figura 21, a latência RTT permaneceu predominantemente entre 54 e 66 ms, com valor médio próximo de 60 ms. Essa faixa corresponde a uma variação de aproximadamente ± 6 ms em torno da média, considerada moderada para um enlace sem fio e compatível com oscilações associadas ao escalonamento dos recursos de rádio, ao processamento dos pacotes, à ocupação momentânea dos *buffers* e às variações das condições de propagação. Embora os valores instantâneos tenham oscilado continuamente dentro desse intervalo, não foi observada tendência de aumento da latência ao longo do teste, o que indica ausência de degradação progressiva da resposta temporal da rede. O *jitter*

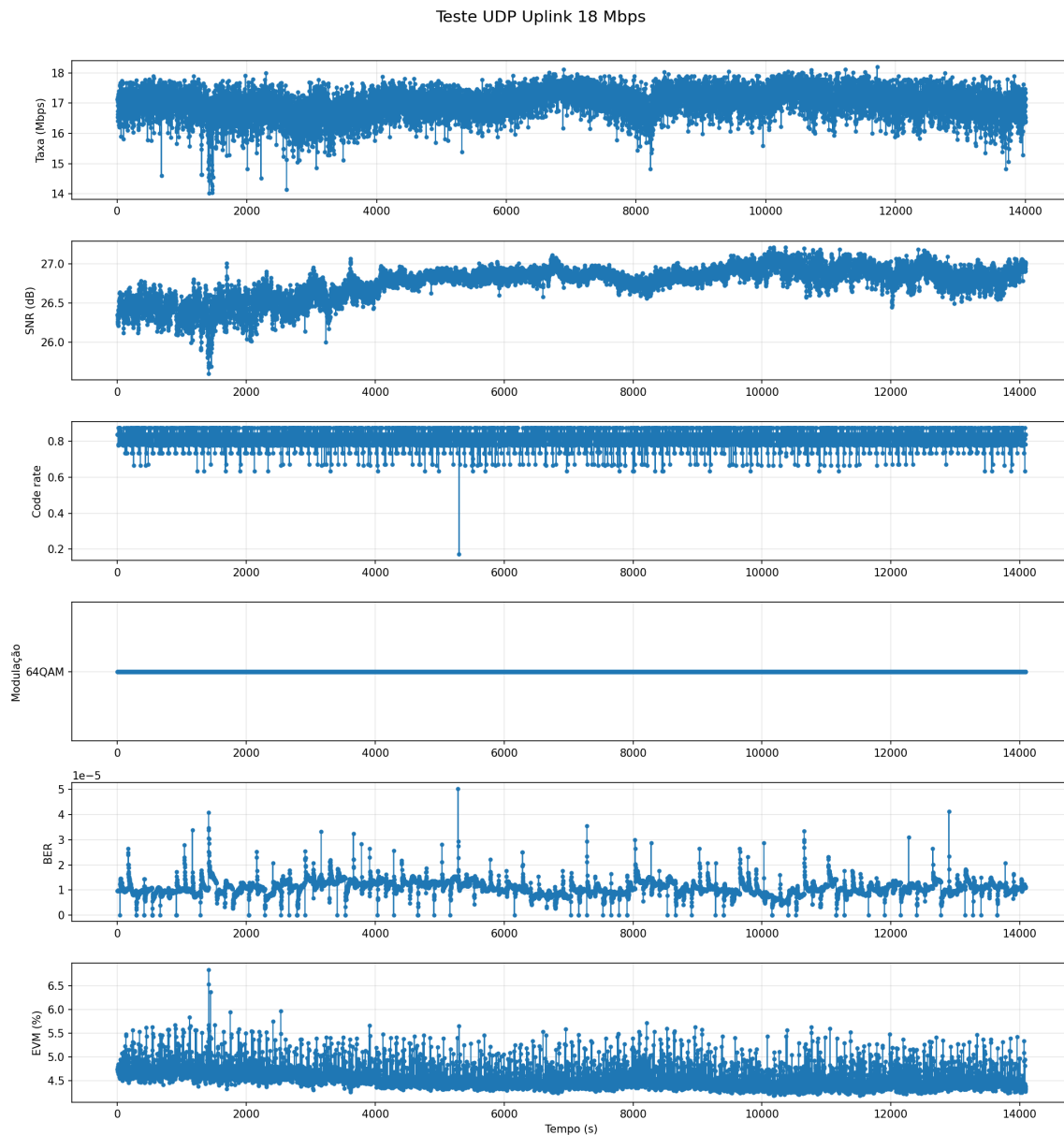


Figura 20: Resultados do teste de longa duração para UDP em *uplink*.

estimado apresentou maior instabilidade apenas no início da medição, incluindo um pico isolado próximo de 4,7 ms, e convergiu posteriormente para aproximadamente 3,7 ms, mantendo-se praticamente constante durante o restante do período. Em conjunto, a estabilidade do valor médio de RTT e a baixa variabilidade do atraso entre respostas sucessivas indicam comportamento temporal regular, favorecendo aplicações de voz, vídeo, telemetria e monitoramento remoto.

A Tabela 7 reúne o resumo estatístico dos principais parâmetros medidos nos ensaios de longa duração com o protocolo UDP. Para cada métrica, são apresentados a média, que representa o comportamento central das amostras, e o desvio padrão, que indica o grau de dispersão dos valores em torno dessa média. Também é informada a faixa compreendida entre os percentuais de 2,5% e 97,5%, dentro da qual se encontram aproximadamente 95% das observações registradas. Diferentemente de um intervalo de confiança da média, essa faixa descreve diretamente a distribuição das amostras medidas ao longo do teste. Dessa forma, sua análise permite

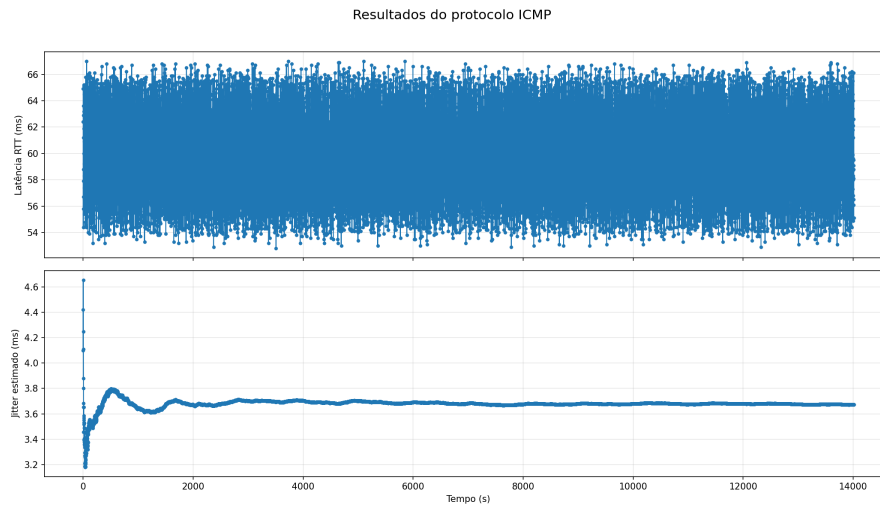


Figura 21: Resultado do teste de ping de longa duração, considerando latência RTT e *jitter* estimado.

identificar o intervalo típico de operação de cada parâmetro e avaliar sua estabilidade, reduzindo a influência de picos isolados, quedas momentâneas ou outros eventos pouco representativos do comportamento predominante do enlace.

Tabela 7: Resumo estatístico dos testes de longa duração do enlace de rádio com UDP.

Teste	Métrica	Unid.	Média $\pm$ desvio padrão	Faixa 95%
UDP DL	Taxa	Mbps	$70,00 \pm 0,07$	69,88–70,13
	SNR	dB	$24,90 \pm 0,83$	22,88–26,12
	BER	–	$(1,41 \pm 6,18) \times 10^{-5}$	$4,14 \times 10^{-7}$ – $1,72 \times 10^{-4}$
	EVM	%	$5,64 \pm 0,94$	4,02–7,58
UDP UL	Taxa	Mbps	$17,00 \pm 0,45$	16,02–17,73
	SNR	dB	$26,76 \pm 0,21$	26,27–27,05
	BER	–	$(1,08 \pm 0,28) \times 10^{-5}$	$5,74 \times 10^{-6}$ – $1,59 \times 10^{-5}$
	EVM	%	$4,52 \pm 0,20$	4,29–5,07

Os resultados são expressos como média $\pm$ desvio padrão. A coluna “Faixa de 95%” indica o intervalo entre os percentis de 2,5% e 97,5%, no qual se concentram aproximadamente 95% das amostras registradas.

Os resultados estatísticos indicam que os testes de longa duração mantiveram comportamento estável nos dois sentidos de transmissão. No *downlink*, a taxa média permaneceu praticamente igual ao valor configurado para o ensaio, de 70 Mbps, verificado justamente pela média desse parâmetro em torno de 70,00 Mbps e seu desvio padrão de apenas 0,07 Mbps. Além disso, 95% das amostras ficaram concentradas entre 69,88 Mbps e 70,13 Mbps, evidenciando variação muito reduzida ao longo do período analisado.

No *uplink*, o ensaio foi configurado para uma taxa de 18 Mbps, enquanto a taxa média efetivamente medida foi de aproximadamente 17,00 Mbps, com desvio padrão de 0,45 Mbps. Nesse caso, 95% das amostras ficaram entre 16,02 Mbps e 17,73 Mbps. Esse comportamento também indica estabilidade da transmissão durante todo o intervalo analisado, mesmo com taxa inferior à observada no *downlink*, conforme esperado pela configuração assimétrica do sistema.

As métricas da camada física também indicam estabilidade do enlace durante os ensaios. A SNR permaneceu em níveis adequados nos dois sentidos de transmissão, com média de 24,90 dB no *downlink* e 26,76 dB no *uplink*. A modulação permaneceu predominantemente em 64-QAM,

indicando que o sistema conseguiu sustentar uma configuração de maior eficiência espectral durante a maior parte do período analisado.

Mesmo em um ambiente com presença de interferência, conforme observado na Figura 18, os valores de BER permaneceram baixos nos dois sentidos de transmissão. No *downlink*, a BER média foi da ordem de $1,41 \times 10^{-5}$, com alguns eventos pontuais de erro ao longo do teste, mas sem comprometer a continuidade da transmissão. No *uplink*, a BER apresentou comportamento ainda mais concentrado, com média de aproximadamente $1,08 \times 10^{-5}$ e faixa de 95% entre $5,74 \times 10^{-6}$ e $1,59 \times 10^{-5}$. Esses resultados indicam que os mecanismos de processamento da camada física, incluindo recursos como *interleaving*, codificação de canal e adaptação dos parâmetros de transmissão, contribuíram para mitigar os efeitos das interferências e manter a comunicação estável.

O EVM também apresentou valores compatíveis com a operação observada, com média de 5,64% no *downlink* e 4,52% no *uplink*. Esses valores, em conjunto com os baixos níveis de BER e a estabilidade das taxas medidas, reforçam que o enlace manteve qualidade suficiente para sustentar transmissões prolongadas em condições reais de operação.

A Tabela 8 apresenta o resumo estatístico do teste de *ping*. A latência RTT média foi de aproximadamente 59,56 ms, com desvio padrão de 3,46 ms. O *jitter* estimado apresentou valor médio de 3,68 ms, com desvio padrão de 0,04 ms, indicando estabilidade temporal nas respostas de rede durante o período analisado.

Tabela 8: Resumo estatístico do teste de *ping* de longa duração.

Métrica	Média	Desvio padrão	Faixa 95%
Latência RTT	59,56 ms	3,46 ms	54,20–65,70 ms
<i>Jitter</i> estimado	3,68 ms	0,04 ms	3,62–3,72 ms

A "Faixa 95%" corresponde ao intervalo entre os percentis de 2,5% e 97,5%.

De forma geral, os testes de longa duração demonstram que o enlace de rádio manteve operação estável durante aproximadamente 14 000 s de avaliação contínua em cada condição de tráfego. As taxas médias de transmissão permaneceram próximas aos valores configurados para os ensaios, com baixa dispersão e faixas de 95% bastante concentradas. Esse resultado é particularmente relevante porque foi obtido em um ambiente sujeito a interferências externas e variações temporais no espectro utilizado. Assim, os baixos níveis de BER, a estabilidade da SNR, os valores consistentes de EVM e o comportamento regular da latência e do *jitter* indicam que o sistema foi capaz de sustentar transmissões prolongadas em condições reais de operação, reforçando a robustez da rede de acesso Brasil 6G baseada em TVWS.

3 Planejamento e testes de campo em Quixadá, Ceará

A segunda etapa de avaliação da rede de acesso Brasil 6G em condições realistas foi realizada no município de Quixadá, Ceará, utilizando parte da infraestrutura do campus da Universidade Federal do Ceará (UFC) e com apoio e suporte também da equipe da UFC, mais especificamente do Grupo de Pesquisa em Telecomunicações Sem Fio (GTEL) [15], e também do Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR (NIC.br) [16]. A escolha desse cenário foi estratégica, pois permitiu ampliar a avaliação para uma região com características geográficas distintas das observadas em Santa Rita do Sapucaí. A cidade em questão é conhecida como a cidade dos monólitos, por apresentar montanhas e blocos de pedras espalhados por sua área geográfica. Este tipo de relevo é bastante desafiador e, por isso, apresenta-se como um cenário de avaliação da rede em condições menos favoráveis.

Para a execução dos testes em Quixadá, o terminal BS da rede de acesso foi instalado em uma posição estratégica nas dependências da UFC, de modo a viabilizar enlaces com terminais UE localizados em pontos distintos do município. Inicialmente, foram realizados testes com um terminal UE instalado na localidade denominada Mosteiro, que apresentava condições mais favoráveis de propagação, com presença de visada direta e baixa ocorrência de obstruções ao longo do enlace, porém, com uma distância maior. Esse cenário facilitou a realização das validações iniciais, a verificação da estabilidade da comunicação e o acompanhamento do desempenho da rede em condições adequadas de propagação.

Em um segundo momento, os testes consideraram a localidade denominada Riacho Verde, mais especificamente uma escola de um bairro rural. Esse segundo cenário permitiu submeter a rede de acesso Brasil 6G a condições mais desafiadoras, caracterizadas por variações do relevo, com monólitos, e pela presença de obstrução parcial da zona de Fresnel. Tais características possibilitaram avaliar o comportamento da comunicação em uma condição menos favorável, na qual fatores associados à topografia e às obstruções existentes ao longo do enlace poderiam impactar diretamente a qualidade do sinal, a estabilidade da conexão e as taxas de transmissão obtidas.

Nas subseções seguintes, são apresentados inicialmente os aspectos relacionados ao planejamento dos testes em Quixadá, incluindo a análise preliminar da potência de transmissão, da cobertura e da definição das localidades de avaliação. Em seguida, são descritos os testes e os respectivos resultados obtidos nos diferentes cenários de comunicação, contemplando os testes ponto a ponto e a análise consolidada do desempenho observado durante essa etapa de validação em campo.

3.1 Planejamento dos testes de campo em Quixadá, Ceará

Nesta seção, são apresentados os procedimentos adotados para a preparação da campanha de testes em Quixadá, abrangendo a organização do cenário experimental, a montagem dos equipamentos e a definição dos pontos escolhidos para as medições em campo.

3.1.1 Potência de transmissão da BS fixa e planejamento preliminar de cobertura

Uma visita técnica à cidade de Quixadá, Ceará, permitiu identificar que o campus da UFC teria uma infraestrutura adequada para a instalação da BS da rede de acesso Brasil 6G. No primeiro pavimento de um dos blocos do campus, foi disponibilizado um ambiente com espaço adequado para acomodar o *rack* do protótipo do transceptor, além de pontos de rede, alimentação elétrica de 220 Vca e sistema de climatização. Uma torre metálica existente em cima deste

mesmo bloco estava disponível para a instalação das antenas da BS. A Figura 22 mostra uma visão geral do campus da UFC, destacando a torre utilizada para a instalação das antenas. Ao fundo, veem-se monólitos característicos da região.

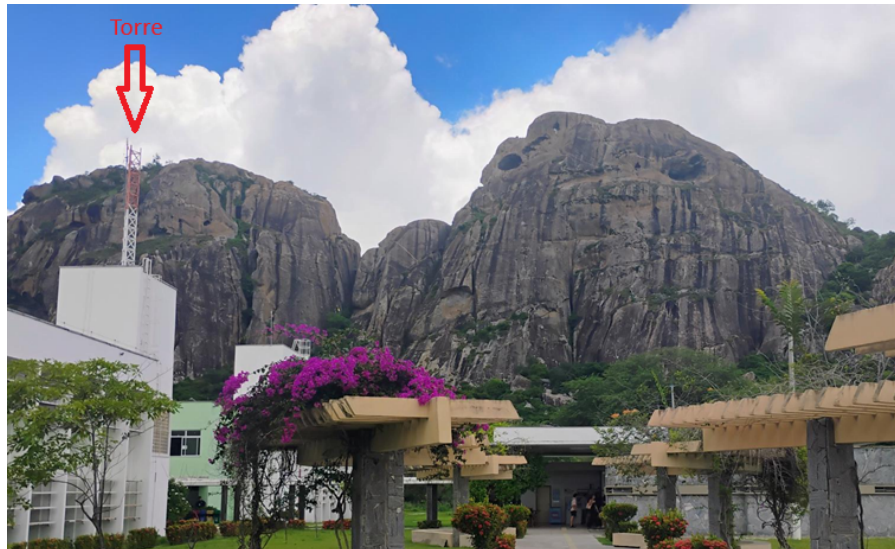


Figura 22: Visão geral do Campus da UFC em Quixadá, com destaque para a torre disponível.

A Figura 23 mostra o ambiente de instalação da BS. O protótipo do transceptor instalado no local disponibilizado pela UFC está mostrada na Figura 23a, enquanto as antenas instaladas estão apresentadas na Figura 23b. A torre disponibilizada possui uma das faces orientada para a Serra do Estêvão, para onde seriam apontadas as antenas da rede de acesso.



(a) Vista interna da instalação da BS.



(b) Vista externa da instalação das antenas.

Figura 23: Perspectivas interna e externa da instalação da BS no campus da UFC em Quixadá.

Para a realização de testes de campo em Quixadá, foram consideradas algumas características principais semelhantes aos testes realizados em Santa Rita do Sapucaí, como largura de banda e potência de transmissão. A comunicação do enlace de *downlink* foi configurada

também com largura de banda total de 24 MHz. A faixa de frequência utilizada para *down-link* compreendeu os canais 46, 47, 48 e 49 da faixa de UHF, correspondentes ao intervalo de frequências entre 662 e 686 MHz. Esta faixa foi utilizada de acordo com a licença de uso temporário do espectro concedida pela Anatel para testes em Quixadá.

Com relação à potência de transmissão, assim como em Santa Rita do Sapucaí, foram observadas as restrições impostas pela regulamentação atualmente imposta aos dispositivos de TVWS Brasil [7], ou seja, a potência de pico de 1 W para cada canal de 6 MHz. Desta forma, de maneira similar aos testes de Santa Rita, conforme detalhado e justificado na Seção 2.1.1, foi utilizada a potência de transmissão do enlace de *downlink* de 23 dBm entregue à cada antena transmissora, lembrando que o sistema emprega MIMO 2×2 e que a PAPR considerada foi de 10 dB.

A Figura 24 mostra o espectro do sinal de *Radio Frequency* (RF) entregue por uma das cadeias de transmissão da BS, considerando potência média de aproximadamente 23 dBm por antena. A partir da métrica de ACPR, foram medidos valores de aproximadamente $-53,6$ e $-52,0$ dB nos canais adjacentes superior e inferior, respectivamente. Esses resultados indicam reduzidos níveis de OOB, característica favorecida pela contenção espectral da forma de onda GFDM e considerada relevante para sua adoção na rede de acesso Brasil 6G. No contexto da operação em TVWS, a limitação das emissões nos canais adjacentes contribui para reduzir interferências e favorecer a coexistência da rede de acesso com o serviço primário de radiodifusão televisiva.

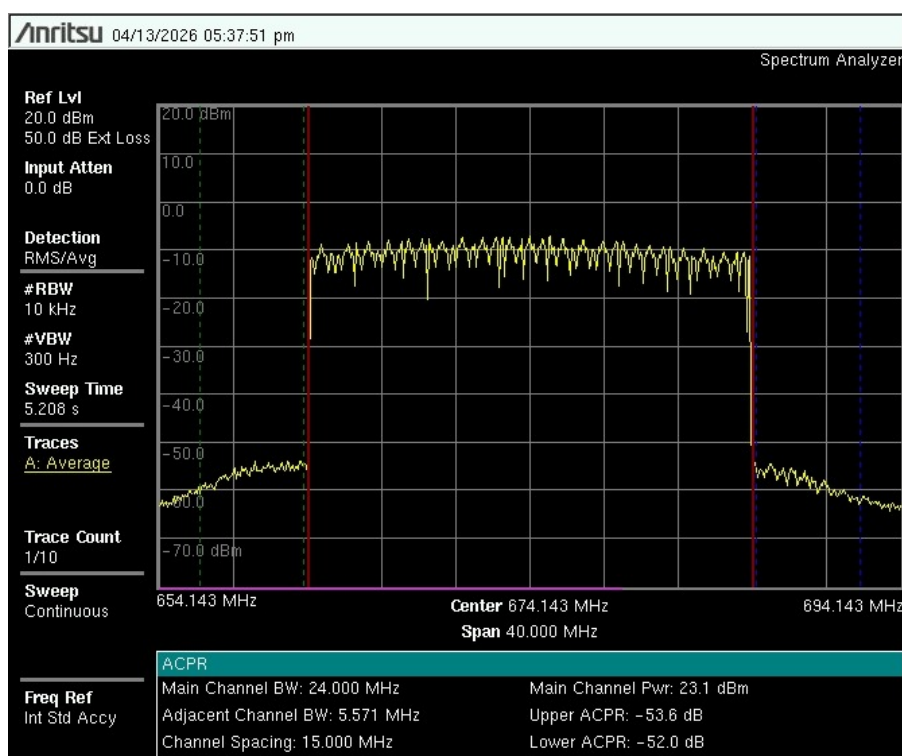


Figura 24: Espectro do sinal de RF entregue à uma das antenas da BS (23 dBm).

Vale destacar que, assim como nos testes de Santa Rita do Sapucaí, a largura de banda reservada para cada terminal UE realizar suas transmissões, ou seja, no enlace de *uplink*, foi de 6 MHz, com potência de transmissão de 17 dBm entregue à cada antena. Para o enlace de *uplink* foi reservada a faixa de 494 MHz a 518 MHz, que corresponde aos canais 18, 19, 20 e 21

da banda de UHF, de acordo com a licença concedida para a realização dos testes em Quixadá.

A definição dos pontos de medição em Quixadá também foi apoiada por simulações de cobertura realizadas no *software Radio Mobile* [10]. A Figura 25 mostra o mapa de cobertura previsto para a BS instalada no campus da UFC em Quixadá. A simulação considerou potência média total de transmissão de 26 dBm em uma largura de banda de 24 MHz. A BS foi posicionada nas coordenadas de latitude $-4,979667^\circ$ e longitude $-39,056306^\circ$, em um ponto com altitude aproximada de 193,14 m. Também foi considerada uma antena diretiva com ganho de 9,5 dBd, instalada a cerca de 15 m do solo e com apontamento para a Serra do Estêvão. A partir desse cenário, foi possível delimitar as áreas com maior potencial de atendimento e selecionar os locais mais adequados para as medições em campo.

3.1.2 Definição preliminar das localidades de teste

As simulações realizadas com o *software Radio Mobile* foram utilizadas como referência inicial para a seleção das localidades candidatas aos testes de campo em Quixadá. Embora o modelo empregado considere as variações do relevo a partir dos dados topográficos SRTM, os resultados não incorporam de forma detalhada os efeitos de edificações, vegetação, obstruções locais, multipercurso, reflexões ou eventuais diferenças entre o direcionamento previsto e o posicionamento efetivo das antenas. Dessa forma, as estimativas foram utilizadas como suporte ao planejamento, devendo ser posteriormente confrontadas com as medições realizadas em campo.

A definição dos pontos de teste combinou critérios técnicos e operacionais, buscando selecionar localidades que permitissem avaliar a rede de acesso Brasil 6G sob diferentes condições de propagação. Foram considerados os seguintes aspectos:

- nível de potência recebida estimado em uma faixa compatível com o estabelecimento da comunicação, considerando os parâmetros de transmissão definidos anteriormente;
- Infraestrutura e acessibilidade às localidades durante a campanha experimental;
- viabilidade de posicionamento e direcionamento das antenas em relação à BS instalada no campus da UFC;
- diversidade das condições de propagação, contemplando tanto um cenário com visada mais favorável quanto outro sujeito a obstruções parciais associadas ao relevo;

A Figura 25 apresenta a estimativa de cobertura da BS e destaca as localidades inicialmente selecionadas para a campanha experimental. Complementarmente, a Figura 26 apresenta uma imagem de satélite da região, obtida por meio do Google *Earth*, permitindo observar a distribuição espacial dos pontos de medição e as principais características do relevo entre a BS e os locais previstos para instalação dos UEs: localidade denominada de Mosteiro, uma pousada em meio a Serra do Estêvão, e uma segunda localidade denominada de Riacho Verde, na qual encontra-se uma escola de um bairro rural da cidade.

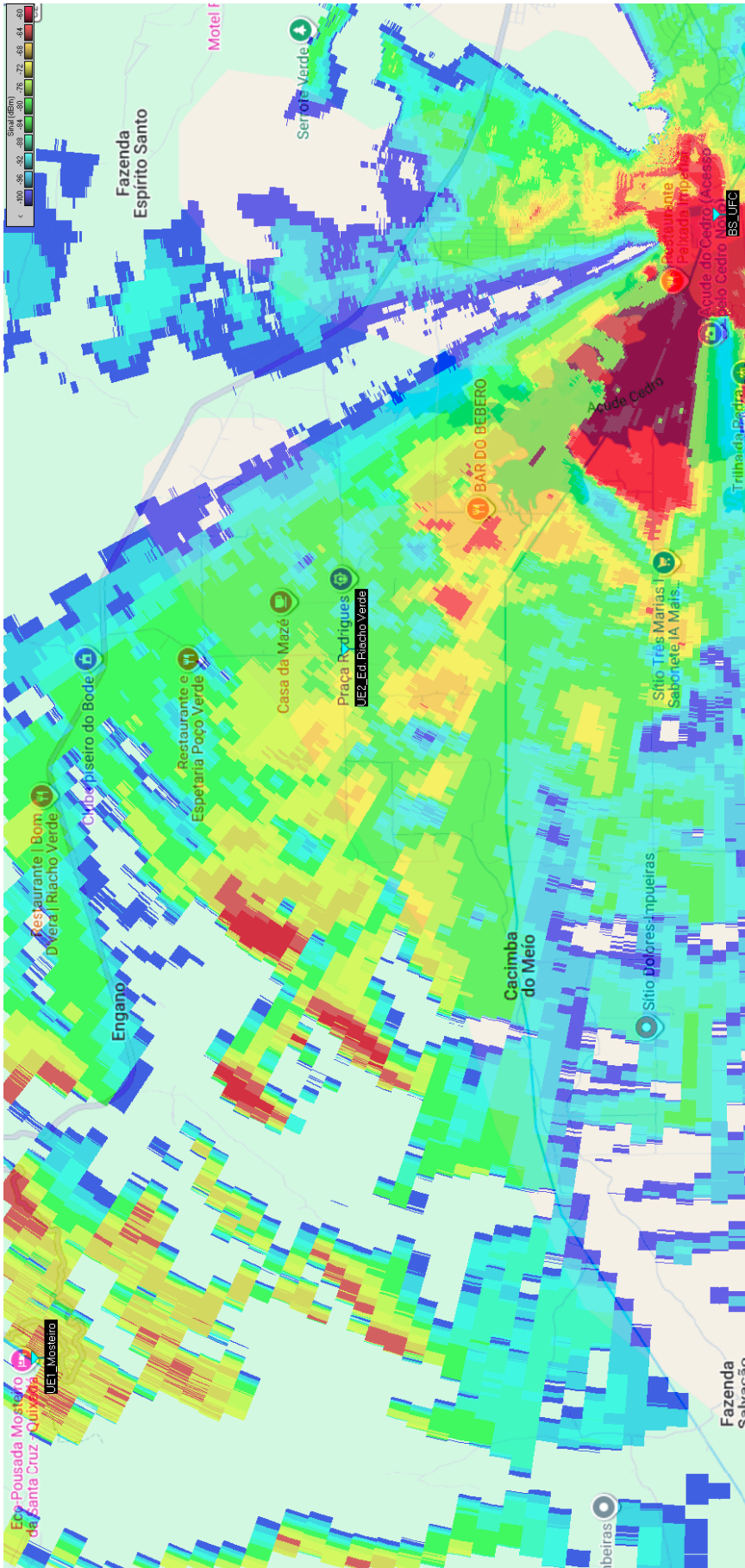


Figura 25: Predição preliminar de cobertura da BS da rede de acesso Brasil 6G instalada na UFC considerando potência média total de 26 dBm.

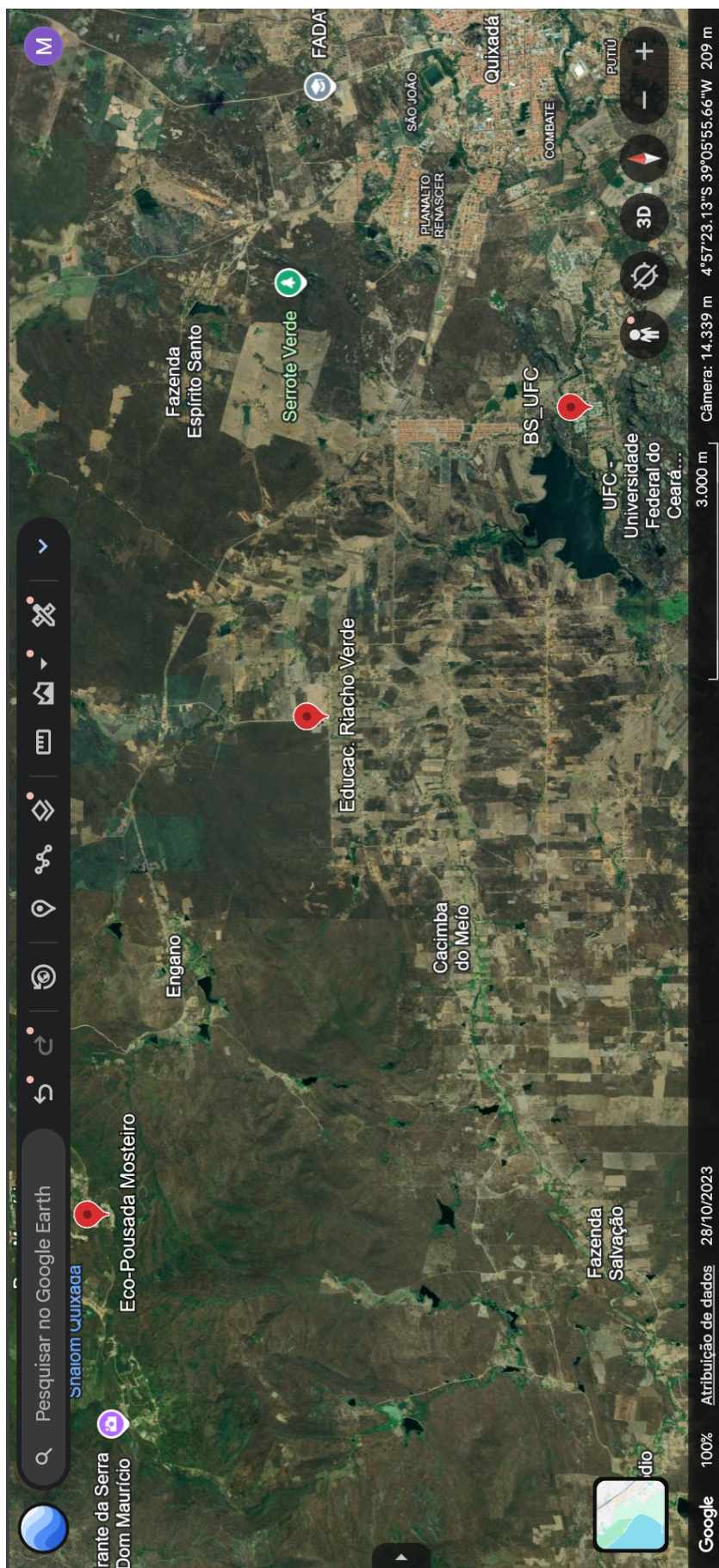


Figura 26: Visão em satélite da região de estudo e das localidades preliminarmente selecionadas para os testes de campo em Quixadá.

A Tabela 9 reúne as principais informações dos pontos inicialmente selecionados para os testes de campo. Para cada localidade, são apresentadas as coordenadas geográficas, a distância em linha reta até a BS instalada no campus da UFC, a perda de percurso estimada e a potência recebida prevista pelo *software Radio Mobile*. As estimativas foram obtidas com base nos parâmetros de transmissão e recepção descritos anteriormente, considerando, no ponto receptor, uma antena diretiva com ganho de 9,5 dBd e orientação voltada para a BS.

Tabela 9: Localidades selecionadas e predições iniciais de potência de recepção (*Radio Mobile*).

Local	Latitude Longitude	Enlace (linha reta) [km]	<i>Path loss</i> previsto [dB]	Potência recepção prevista [dBm]	Motivação/ Justificativa
UFC	-4.979667 -39.056306	0	-	-	Ponto estratégico para instalação da BS.
Riacho Verde	-4.950375 -39.090456	4,99	121,6	-79,1	Escola nas proximidades da UFC com relevo acidentado e dificuldade de acesso.
Mosteiro	-4.926097 -39.146206	11,60	117,4	-69,7	Possível enlace com <i>throughput</i> ~100 Mbps.

As localidades selecionadas representam condições distintas de propagação. O ponto Mosteiro apresenta maior distância em relação à BS, porém condições topográficas mais favoráveis, com baixa obstrução ao longo do percurso e potência recebida estimada compatível com a obtenção de taxas elevadas de transmissão. Por sua vez, o ponto Riacho Verde, embora mais próximo do campus da UFC, apresenta relevo mais acidentado e obstrução parcial do percurso de propagação. Portanto, a seleção conjunta desses locais permitiu avaliar a rede de acesso Brasil 6G tanto em uma condição favorável, a uma distância um pouco maior, quanto em um cenário mais desafiador com obstruções parciais do enlace.

3.2 Testes de campo em Quixadá, Ceará

Nesta etapa, foram realizados testes de comunicação entre a BS, instalada nas dependências da UFC, no município de Quixadá, no estado do Ceará, e terminais de usuário posicionados em duas localidades distintas, denominadas aqui como Mosteiro e Riacho Verde. A definição desses pontos de medição teve como objetivo avaliar o comportamento da rede de acesso em condições distintas de propagação, considerando variações de distância, relevo, visada, obstrução parcial da zona de Fresnel e características específicas do ambiente de instalação.

No cenário associado ao ponto Mosteiro, o UE apresentou condições mais favoráveis de propagação, com presença de visada direta e baixa obstrução ao longo do enlace. Já no ponto Riacho Verde, o enlace apresentou condições mais desafiadoras, devido à presença de obstruções parciais associadas ao relevo, permitindo avaliar o comportamento do sistema em um cenário de propagação menos favorável.

Os resultados detalhados para cada ponto de medição são apresentados nas subseções seguintes, juntamente com os registros fotográficos dos cenários de teste, os perfis geográficos dos enlaces, as medições espectrais realizadas em campo e as métricas de desempenho obtidas durante a campanha experimental, incluindo taxa de transmissão, SNR, modulação, taxa de codificação e BER.

3.2.1 Comunicação entre BS e terminal UE localizada no ponto Mosteiro

O primeiro teste consistiu no estabelecimento da comunicação entre a BS, instalada no campus da UFC, e o terminal UE, denominado UE 1, instalado na localidade Mosteiro. Conforme definido durante a etapa de planejamento, as antenas da BS foram orientadas em direção à Serra do Estêvão, região onde se localiza o presente ponto de medição.

As Figuras 27a e 27b apresentam, respectivamente, as perspectivas interna e externa da instalação do UE 1 no ponto Mosteiro. Nessa localidade, as antenas receptoras foram instaladas a aproximadamente 3 m acima do nível do solo e direcionadas para a BS. Esses registros permitem caracterizar as condições reais de implantação dos equipamentos e fornecem informações complementares para a interpretação dos resultados obtidos durante os testes de campo.



(a) Protótipo do terminal UE instalado.



(b) Vista externa da instalação do UE 1.

Figura 27: Perspectivas interna e externa da instalação do UE 1 no ponto Mosteiro.

A Figura 28 mostra o perfil topográfico do enlace estabelecido entre a BS e o UE 1 instalado na localidade Mosteiro. A distância aproximada é de 11,60 km em linha reta entre os pontos de transmissão e recepção. Apesar da extensão do enlace, observam-se condições favoráveis à propagação, com visada direta e baixa obstrução da zona de Fresnel ao longo do percurso, fatores que contribuem para a manutenção da comunicação.

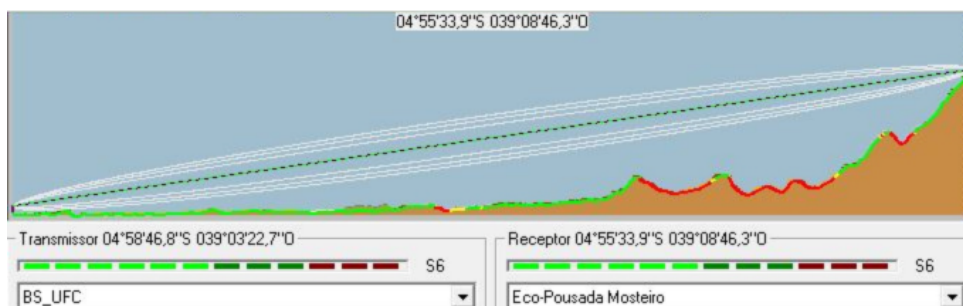


Figura 28: Perfil geográfico do enlace entre a BS e o UE 1 no ponto Mosteiro.

A Figura 29 mostra a medida do sinal recebido da BS, ou seja, sinal de *downlink*, na localidade Mosteiro. A potência medida do sinal direto da antena de recepção é de aproximadamente

−68,3 dBm para o sinal de *downlink*. O nível do sinal recebido está cerca de 18 dB acima do nível de ruído, como é possível observar pela medida de ACPR. Esse resultado caracteriza as condições de recepção observadas durante o teste e, em conjunto com o perfil topográfico, indica um cenário favorável à avaliação do desempenho da rede de acesso Brasil 6G, incluindo a utilização de esquemas de modulação de maior ordem, por exemplo.

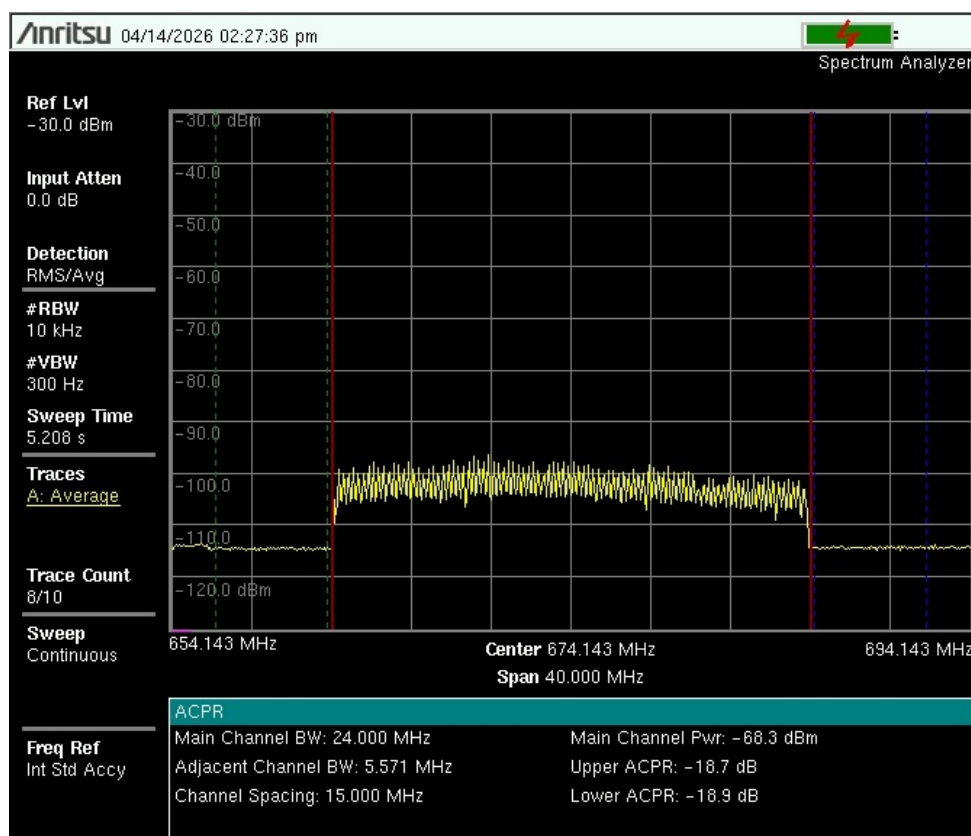


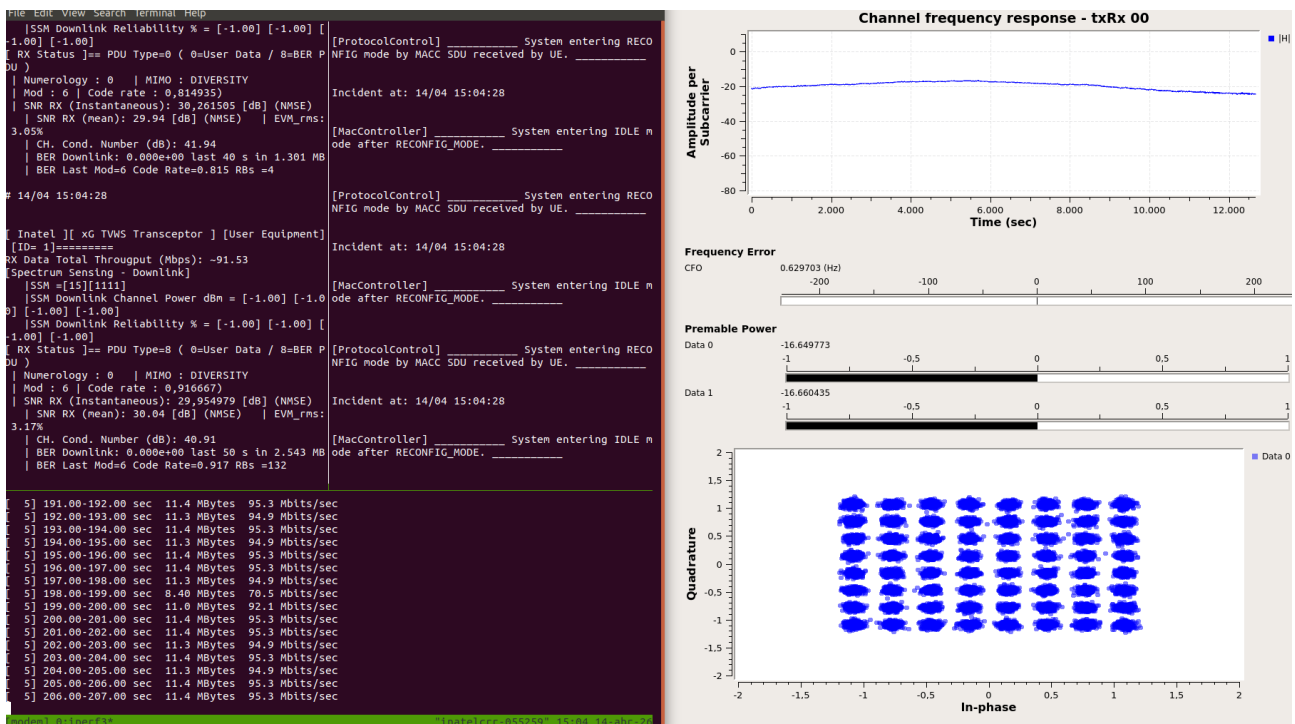
Figura 29: Espectro do sinal de *downlink* recebido pelo terminal UE 1, instalado na localidade Mosteiro.

Considerando essa condição de recepção, foram conduzidos testes de *throughput* nos enlaces de *downlink* e *uplink* utilizando a ferramenta *iperf*. A Tabela 10 apresenta um resumo dos principais parâmetros obtidos nessa avaliação, contemplando a taxa média de transmissão e as métricas da camada física associadas ao enlace.

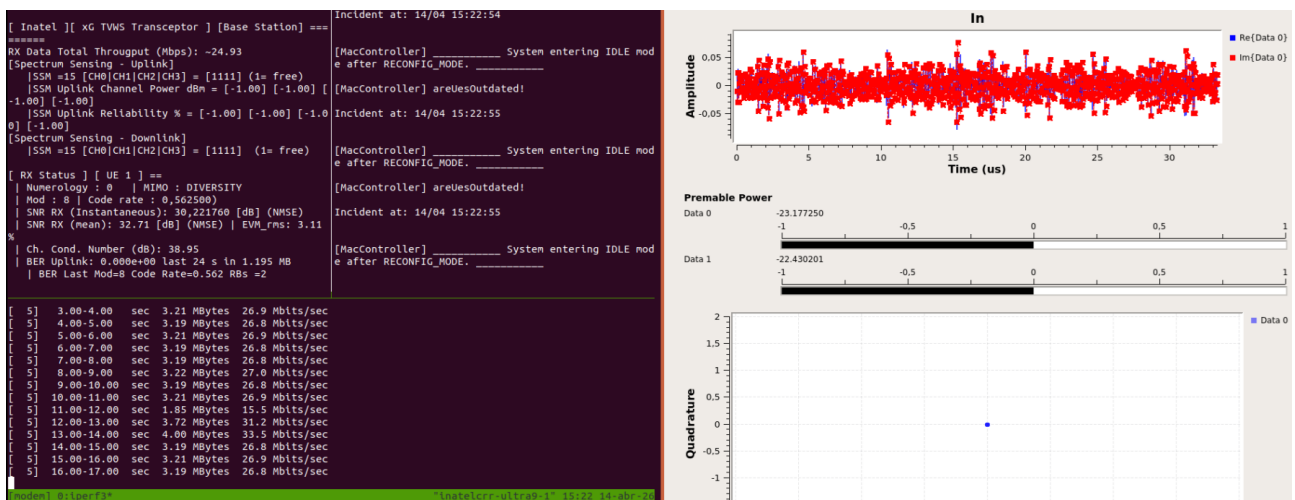
Tabela 10: Resumo dos testes de comunicação para o enlace entre a BS e o UE 1 instalado na localidade Mosteiro.

Parâmetro	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Taxa média	95 Mbps	27 Mbps
SNR média	30,04 dB	32 dB
Modulação	64-QAM	64-QAM
<i>Code rate</i>	0,917	0,562
BER	0	0

As Figuras 30a e 30b mostram os registros obtidos durante os testes de vazão de dados para os enlaces de *downlink* e *uplink*.



(a) Interface do terminal UE durante testes de *throughput* no enlace de *downlink* (95 Mbps).



(b) Interface do terminal BS durante testes de *throughput* no enlace de *uplink* (27 Mbps).

Figura 30: Resultados de *throughput* nos enlaces de *downlink* e *uplink* entre a BS e o UE 1.

A Figura 30a mostra, em específico, a interface do terminal UE durante os testes de vazão de dados no enlace de *downlink*. Do lado inferior esquerdo é possível observar a taxa de comunicação instantânea, com valores da ordem de 95 Mbps. No lado superior esquerdo é possível observar parâmetros associados a sinal recebido pelo terminal em questão, ou seja, enlace de *downlink*. Do lado superior direito é possível observar a resposta do canal de recepção e na parte inferior direita a constelação do sinal recebido. A Figura 30b mostra, por sua vez, a interface do terminal BS durante os testes de vazão de dados no enlace de *uplink*. Do lado inferior esquerdo é possível observar a taxa de comunicação instantânea, com valores da ordem de 27 Mbps. Na parte superior esquerda é possível visualizar os parâmetros associados ao

signal recebido pelo terminal BS, e do lado superior direito é possível visualizar informação do sinal recebido no domínio do tempo. Esses registros permitem observar o comportamento do *throughput* durante os ensaios, cujos valores e parâmetros principais estão resumidos na Tabela 10.

Os resultados obtidos nos testes e resumidos na Tabela 10 indicam que o enlace estabelecido entre a BS e o UE 1 instalado na localidade Mosteiro apresentou desempenho elevado e consistente. Foram alcançadas taxas médias de 95 Mbps em *downlink* e 27 Mbps em *uplink*. Além disso, os valores médios de SNR, iguais a 30,04 dB no *downlink* e 32 dB no *uplink*, permitiram a operação com modulação 64-QAM e *code rate* de 0,917 no enlace de *downlink* e de 0,562 no enlace de *uplink*. A ausência de erros de bit, refletida pela BER nula em ambos os sentidos da comunicação durante os testes, reforça a qualidade do enlace e a adequação das condições de propagação observadas nesse ponto.

Como avaliação complementar da comunicação, foi realizado um teste da taxa de acesso à internet utilizando a ferramenta web *SpeedTest*, cujo resultado está apresentado na Figura 31. O resultado obtido, que pode ser observado na referida figura, foi a taxa de *download* de aproximadamente 94 Mbps e taxa de *upload* de aproximadamente 29 Mbps, que são valores próximos aos observados nos testes com *iperf*. A proximidade dos valores obtidos no teste da ferramenta *iperf* e da ferramenta web reforça a consistência dos resultados e metodologia adotada para medida de vazão de dados. Destacando que o acesso à internet ao terminal UE foi provido pelo terminal BS que, por sua vez, tem acesso à internet por meio de conexão direta à rede de UFC.

De forma geral, os resultados obtidos na localidade Mosteiro mostram que o enlace apresentou condições favoráveis de operação, com níveis adequados de sinal, valores elevados de SNR, BER nula e taxas compatíveis com a configuração empregada. O conjunto das medições, incluindo os testes com *iperf* e com *SpeedTest*, evidenciam a estabilidade da comunicação e a capacidade do sistema de sustentar taxas elevadas em um cenário com boas condições de propagação.

3.2.2 Comunicação entre BS e terminal UE instalado na localidade Riacho Verde

A segunda localidade considerada para a realização de testes práticos de campo em Quixadá foi uma escola situada na localidade rural Riacho Verde. A escolha desse ponto foi motivada em função das condições de propagação mais restritivas em relação às observadas na localidade Mosteiro, especialmente pela maior influência do relevo e pela presença de obstruções parciais ao longo do enlace. Esse cenário permitiu verificar o desempenho da rede de acesso Brasil 6G em uma condição mais desafiadora de comunicação. A Figura 32 apresenta os registros do local denominado de Riacho Verde, com destaque para a escola na Figura 32a e a instalação do terminal UE em uma de suas salas de aula, como mostrado na Figura 32b. A Figura 33 mostra, por sua vez, a instalação e apontamento das antenas do terminal UE em tal localidade. As antenas foram instaladas a cerca de 2,5 m do solo, com obstáculos próximos, como muros e com apontamento para a BS.

A Figura 34 apresentam o perfil topográfico do enlace estabelecido entre a BS e o terminal UE na localidade Riacho Verde obtida a partir da ferramenta *Radio Mobile*. A distância em linha reta entre os terminal é de aproximadamente 5,49 km. Embora a distância desse percurso seja menor do que o enlace avaliado na localidade Mosteiro, o relevo apresenta obstruções parciais ao longo do trajeto, comprometendo a desobstrução da zona de Fresnel. Essa condição caracteriza um cenário de propagação mais desafiador e pode provocar maior atenuação e

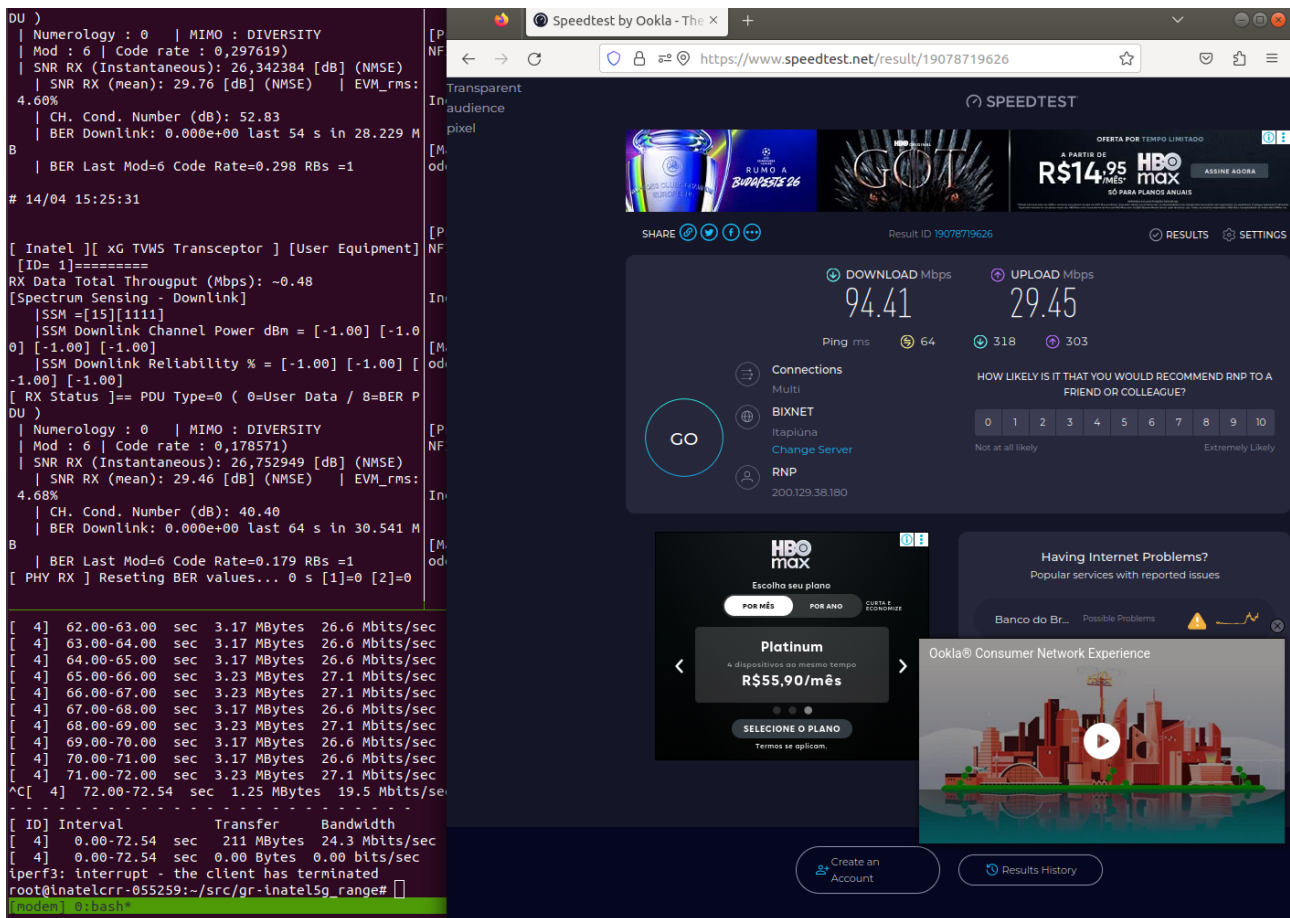


Figura 31: Resultado do teste de *throughput* obtido por meio do *SpeedTest* para a localidade Mosteiro.



(a) Vista externa da escola.



(b) Terminal UE instalado em uma sala da escola.

Figura 32: Localidade Riacho Verde: visão da escola e instalação do protótipo do terminal UE.

instabilidade do sinal recebido.

A Figura 35 mostra o resultado da medida do espectro de recepção do sinal da BS, ou seja, de *downlink*, medida direto da antena na localidade em questão. A medida indicou potência recebida de aproximadamente -80 dBm. O nível do sinal recebido encontra-se próximo ao nível de ruído, como pode ser observado na referida figura, o que reduz a margem de recepção e torna o enlace mais suscetível a variações do canal, interferências e eventuais desalinhamentos das antenas. Assim, mesmo com menor distância em relação ao ponto Mosteiro, as condições de



Figura 33: Antena instalada na localidade Riacho Verde.

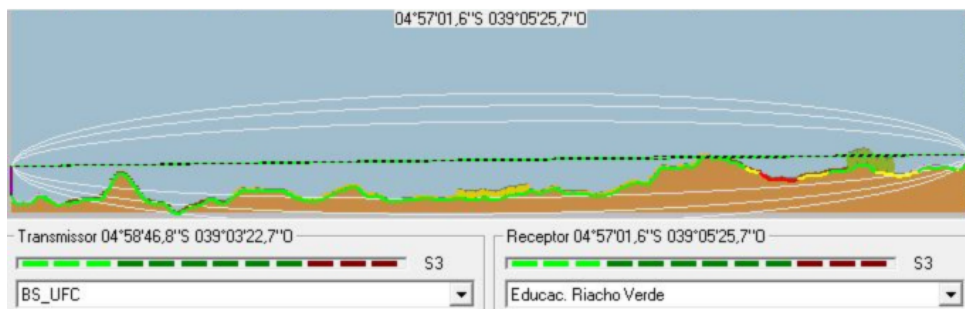


Figura 34: Perfil geográfico do enlace entre a BS e o UE 2 no ponto Riacho Verde, com obstrução parcial do percurso de propagação.

relevo e obstrução tornaram o enlace de Riacho Verde mais desafiador para o estabelecimento da operação da rede de acesso Brasil 6G.

Dadas as condições de instalação e recepção apresentadas, foram realizados testes de *throughput* do enlace de *downlink* e *uplink* utilizando a ferramenta *iperf*. Os principais resultados obtidos estão apresentados na Tabela 11, incluindo taxa média de transmissão, SNR média, modulação, taxa de código (*code rate*) e BER.

Tabela 11: Resumo dos resultados obtidos de testes com *iperf* na localidade Riacho Verde.

Parâmetro	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Taxa média	48 Mbps	5,1 Mbps
SNR média	19,7 dB	15,82 dB
Modulação	16-QAM	16-QAM
<i>Code rate</i>	0,672	0,405
BER	0	$2,207 \times 10^{-2}$

De acordo com os resultado obtidos nos testes, resumidos na Tabela 11, pode-se verificar que, mesmo sob condições de propagação mais restritivas, o enlace permaneceu operacional, alcançando taxas médias de aproximadamente 48 Mbps em *downlink* e 5,1 Mbps em *uplink*. Entretanto, a menor SNR observada no ponto Riacho Verde, em comparação com a registrada

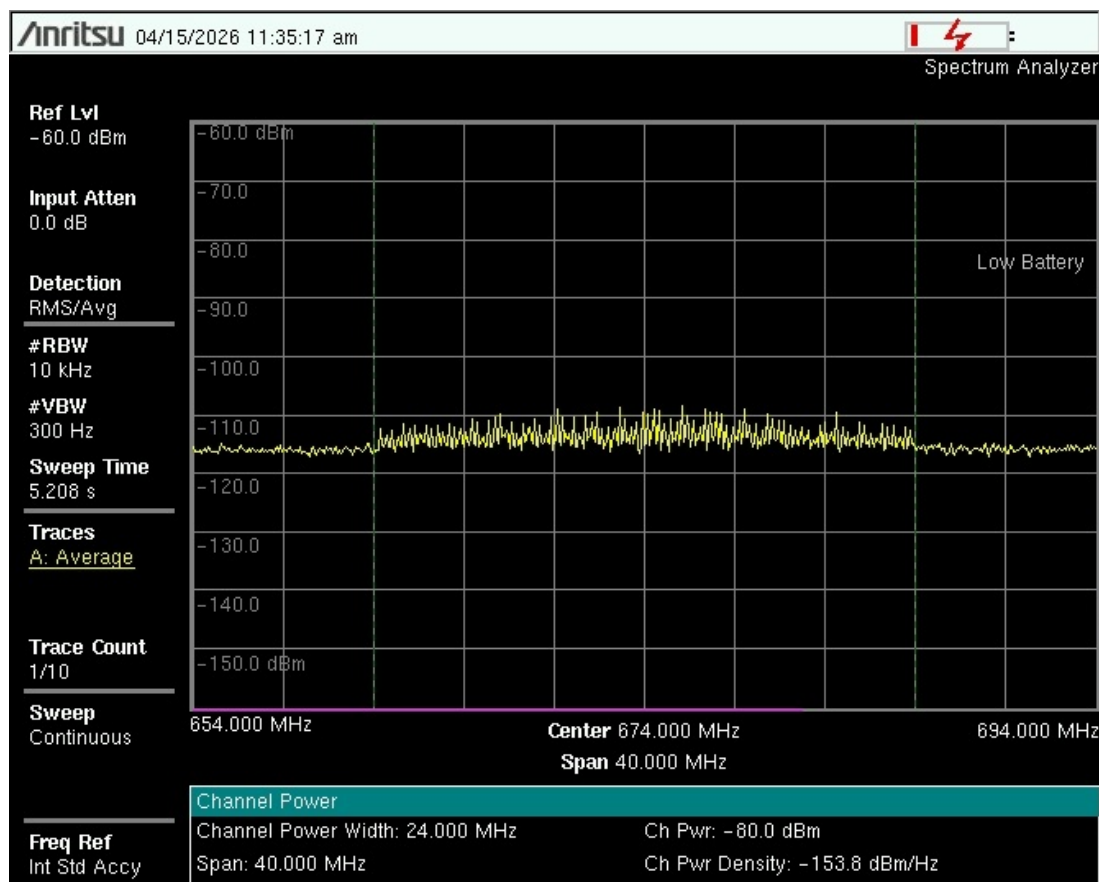


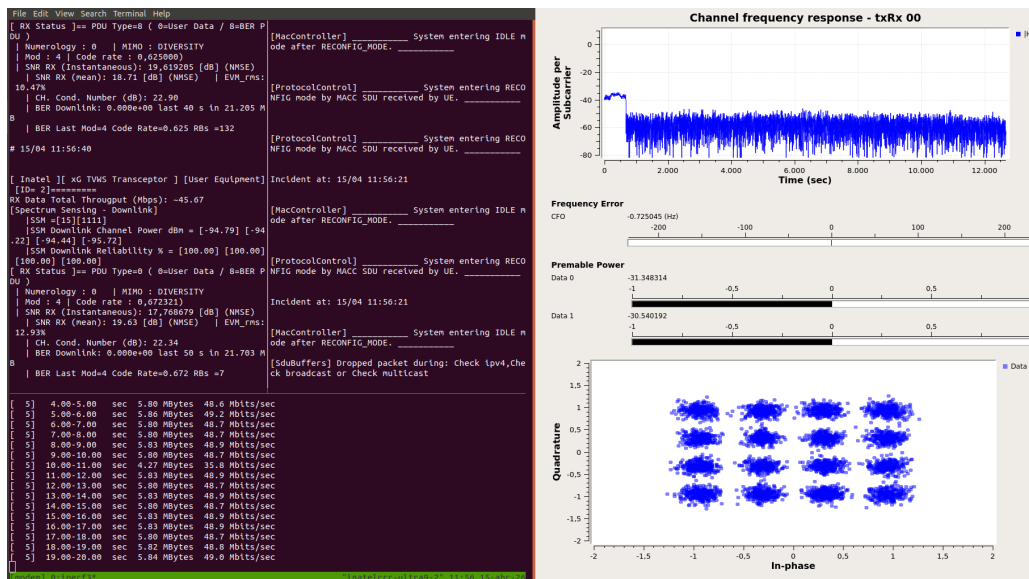
Figura 35: Medida do sinal de *downlink* recebido pelo UE na localidade Riacho Verde.

no Mosteiro, levou o sistema a empregar modulação 16-QAM em ambos os sentidos de transmissão. Essa alteração evidencia a flexibilidade e adaptação automática do sistema às condições específicas e instantâneas do enlace e canal de comunicação.

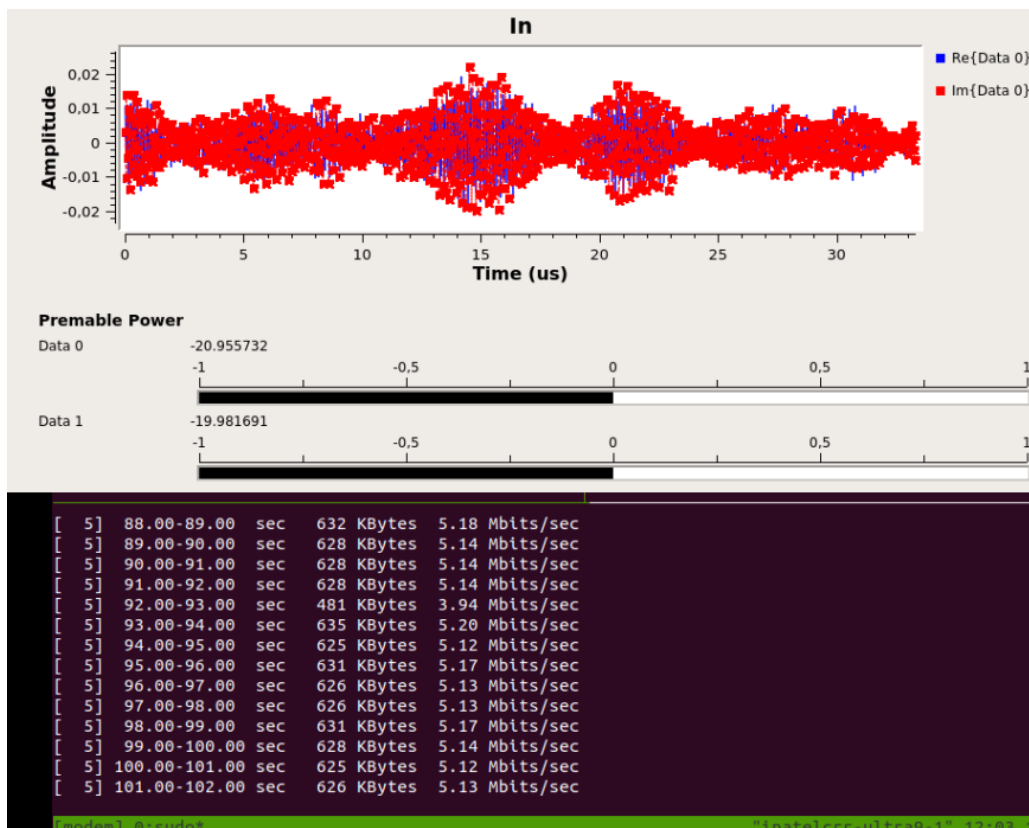
No enlace de *uplink*, foi registrada uma BER de $2,207 \times 10^{-2}$, como mostra a Tabela 11, indicando degradação mais acentuada nesse sentido de comunicação. Esse resultado é coerente com a menor SNR medida no *uplink* e com as condições menos favoráveis de propagação associadas à obstrução parcial do enlace.

A Figura 36 mostra informações presentes na interface dos terminais durante a realização de testes de comunicação envolvendo os enlaces de *uplink* e *downlink* e fazendo uso da ferramenta *iperf*. A Figura 36a mostra a interface do terminal UE durante os testes de *downlink*, onde é possível visualizar na parte inferior esquerda a taxa de comunicação instantânea; no lado superior esquerdo os parâmetros associados ao enlace em teste; na parte inferior direita é possível visualizar a constelação do sinal recebido. A Figura 36b, por sua vez, mostra detalhes da interface do terminal BS durante o teste de *uplink*. Nesta figura é possível observar na parte de baixo, a taxa de comunicação instantânea, e na parte superior uma visão gráfica do sinal recebido no domínio do tempo.

Como avaliação complementar da comunicação, foi realizado um teste da taxa de acesso à internet utilizando a ferramenta web *SpeedTest*, cujo resultado está apresentado na Figura 37. O resultado obtido, que pode ser observado na referida figura, foi a taxa de *download* de aproximadamente 42 Mbps e taxa de *upload* de aproximadamente 5 Mbps, que são valores próximos aos obtidos nos testes com *iperf*.



(a) Resultado de *throughput* no enlace de *downlink*.



(b) Resultado de *throughput* no enlace de *uplink*.

Figura 36: Resultados de *throughput* para os enlaces de *downlink* e *uplink* entre a BS e o UE 2 no ponto de medição Riacho Verde.

Os resultados obtidos no ponto Riacho Verde evidenciam que, mesmo sob condições de propagação desfavoráveis, a rede de acesso Brasil 6G permaneceu operacional e manteve taxas de transmissão compatíveis com as limitações do enlace. A redução da potência recebida e da

SNR influenciou diretamente a seleção da modulação, o *code rate* e o desempenho alcançado, com impacto mais pronunciado no enlace de *uplink*. Ainda assim, a proximidade entre os valores medidos com as ferramentas *iperf* e *SpeedTest* indica consistência entre as metodologias utilizadas na avaliação do *throughput*.

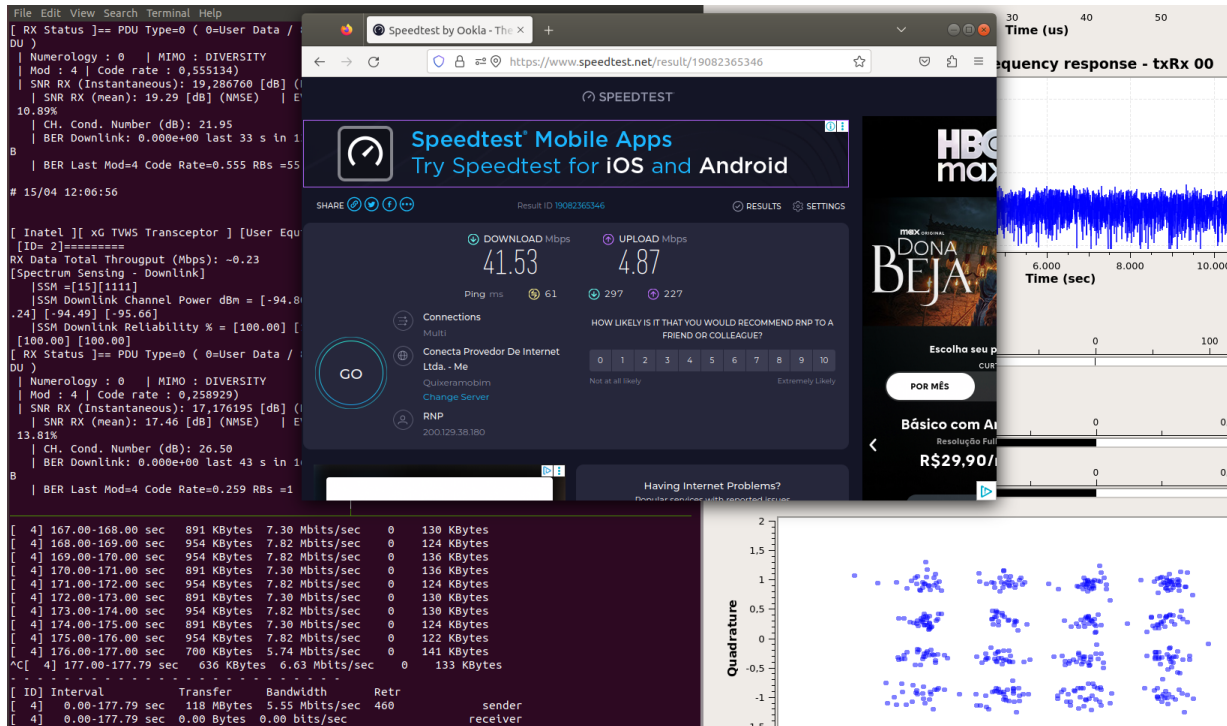


Figura 37: Resultado do teste obtido por meio do *SpeedTest* no ponto de medição Riacho Verde.

Embora o enlace de comunicação entre o terminal BS e o terminal UE instalado na localidade Riacho Verde apresente obstrução parcial devido ao relevo, impactando no menor nível de sinal recebido, o sistema foi capaz de ajustar os parâmetros da camada física às condições do enlace e preservar a conectividade. Esses resultados demonstram a robustez da solução em um cenário mais restritivo e confirmam sua capacidade de sustentar a comunicação mesmo diante de condições menos favoráveis.

3.2.3 Teste de comunicação multiusuário: terminais UEs localizadas nos pontos Mosteiro e Riacho Verde

Além dos testes de comunicação individual, conforme mostrado nas seções anteriores, foi realizado teste de avaliação da comunicação considerando múltiplos usuários. Neste teste, a BS permaneceu instalada na UFC com potência de transmissão de 23 dBm entregue à cada antena. Os dois terminais UEs operaram de forma simultânea e em localidades distintas: um terminal UE, denominado de UE 1, foi instalado na localidade Mosteiro, enquanto o segundo terminal, terminal UE 2, foi instalado na localidade Riacho Verde. Essa configuração permitiu verificar o comportamento do sistema diante do atendimento simultâneo à terminais instalados em diferentes distâncias em relação à BS e com condições distintas de propagação.

A Figura 38 mostra a interface do terminal BS durante a realização dos testes com a ferramenta *iperf* e com comunicação simultânea com os terminais UE 1 e UE 2. A Figura 38a mostra os resultados das medidas durante os testes de *downlink*. Na figura é possível observar

nas janelas, do lado direito da figura, as taxas de comunicação de aproximadamente 50 Mbps e 22 Mbps que se referem às taxas de *downlink* para os terminais UE 1, na parte superior direita, e terminal 2, na parte inferior direita. Do lado superior esquerdo da referida figura, é possível visualizar informações associadas ao enlace de *uplink* de cada terminal UE.

A Figura 38b, por sua vez, mostra medidas obtidas no terminal BS durante os testes do enlace *uplink*. Na figura é possível observar nas janelas, do lado direito da figura, as taxas de comunicação de aproximadamente 29 Mbps e 5 Mbps que se referem às taxas de *uplink* para os terminais UEs 1 e 2, respectivamente. Do lado superior esquerdo da referida figura, é possível visualizar informações associadas ao enlace de *uplink* de cada terminal.

Com relação às informações associadas ao enlace de *uplink* de cada terminal, registradas pela BS e mostradas na parte superior esquerda da Figura 38, pode-se visualizar as informações resumidas na Tabela 12. A comunicação com os múltiplos terminais, cada um operando com parâmetros associados ao enlace de maneira distinta e adequada às suas condições particulares, demonstra a flexibilidade e capacidade de adaptação da rede.

Tabela 12: Comunicação multiusuário em Quixadá: parâmetros do enlace de *uplink*.

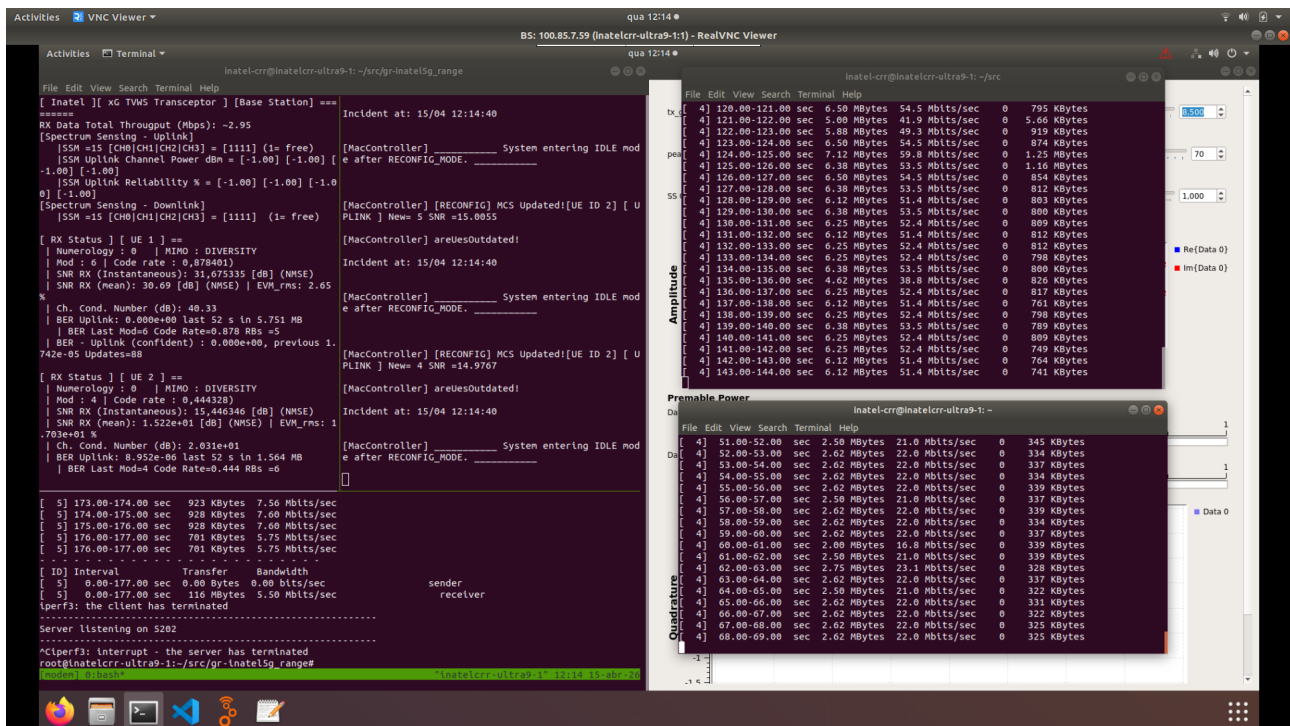
Parâmetro	Terminal	
	UE 1	UE 2
SNR (de recepção na BS)	30,7 a 31,99 dB	14,6 a 15 dB
Modulação	64-QAM e 256-QAM	QPSK e 16-QAM
Taxa de codificação	0,83 a 0,87	0,44 a 0,64

Os resultados obtidos confirmam a operação da rede de acesso Brasil 6G em um cenário multiusuário, com manutenção simultânea da comunicação entre a BS e dois terminais de usuário. Mesmo com o compartilhamento dos recursos de rádio entre os UEs 1 e 2, foram alcançadas taxas relevantes nos enlaces de *downlink* e *uplink*. Esse comportamento evidencia a capacidade do sistema de gerenciar a transmissão concorrente, distribuir os recursos disponíveis entre os enlaces ativos e preservar a conectividade sob condições de acesso simultâneo. Os testes evidenciam também a capacidade do sistema de gerenciar a comunicação com terminais instalados em diferentes distâncias e com diferentes condições de enlace, sendo cada um deles, atendidos de maneira adequada e individualizada.

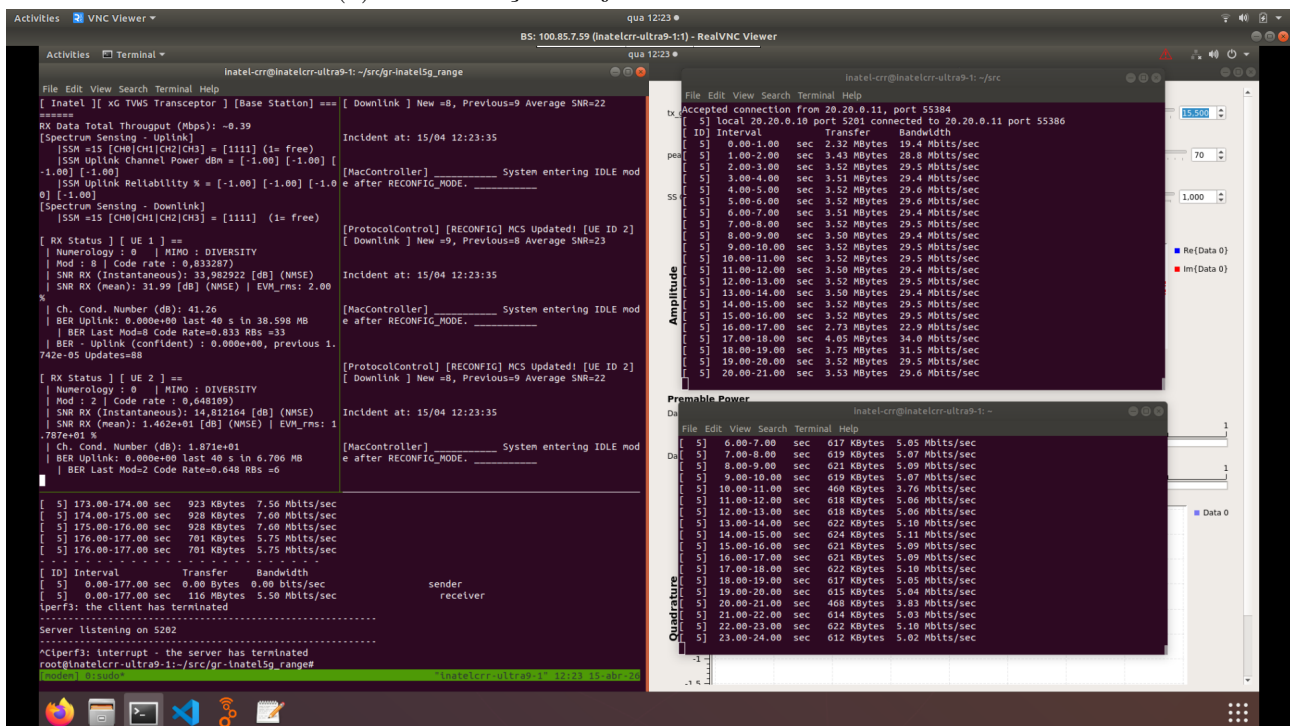
3.2.4 Análise consolidada dos resultados dos testes em Quixadá

Esta seção apresenta uma análise consolidada dos resultados obtidos no cenário de Quixadá, considerando os enlaces estabelecidos entre a BS, instalada no campus da UFC, e os UEs posicionados nos pontos Mosteiro e Riacho Verde.

A análise correlaciona a potência recebida, a SNR, os esquemas de modulação e codificação selecionados pelo sistema e as taxas efetivas alcançadas nos enlaces de *downlink* e *uplink*. Assim como verificado nos testes realizados em Santa Rita do Sapucaí, a distância entre a BS e o terminal não constitui, isoladamente, um indicador suficiente do desempenho do enlace. Aspectos como interferência local, condições de visada, perfil do relevo, desobstrução da zona de Fresnel e alinhamento das antenas também influenciam diretamente a qualidade do sinal e o *throughput* obtido. Essa relação torna-se evidente ao comparar os dois pontos avaliados em Quixadá. Embora o Mosteiro esteja mais distante da BS, o enlace apresentou condições mais favoráveis de propagação, com visada direta e baixa obstrução da zona de Fresnel. Em



(a) Comunicação conjunta no enlace de *downlink*.



(b) Comunicação conjunta no enlace de *uplink*.

Figura 38: Teste de *throughput* simultânea com terminais do tipo UE.

contrapartida, o ponto Riacho Verde, apesar da menor distância, esteve sujeito a obstruções parciais associadas ao relevo. Como consequência, foram observados menores níveis de potência recebida e de SNR, além da adoção de parâmetros de transmissão mais robustos e da redução das taxas efetivas. Esses resultados confirmam que as características do percurso de propagação

exerceram maior influência sobre o desempenho do que a distância entre os equipamentos.

Nos resultados de *downlink*, consolidados na Tabela 13, o ponto Mosteiro apresentou o melhor desempenho, com taxa média próxima de 95 Mbps. No ponto Riacho Verde, a taxa média foi de aproximadamente 48 Mbps. A diferença observada está associada à menor qualidade do canal em Riacho Verde, que levou o sistema a utilizar uma configuração de modulação e codificação mais robusta, porém com menor eficiência espectral.

Tabela 13: Resumo consolidado dos parâmetros de desempenho em *downlink* no cenário de Quixadá.

Cenário	Dist. (km)	Pot. DL (dBm)	SNR DL (dB)	Mod.	CR	Taxa DL
Mosteiro	11,60	-68,3	30,04	64-QAM	0,917	95 Mbps
Riacho Verde	5,49	-80	19,7	16-QAM	0,672	48 Mbps

Nos enlaces de *uplink*, cujos resultados são apresentados na Tabela 14, também foi observada diferença expressiva entre os dois cenários. A maior taxa média foi obtida no ponto Mosteiro, com aproximadamente 27 Mbps. No ponto Riacho Verde, a taxa média foi de aproximadamente 5,1 Mbps, indicando uma limitação mais severa do enlace nesse sentido de transmissão.

Tabela 14: Resumo consolidado dos parâmetros de desempenho em *uplink* no cenário de Quixadá.

Cenário	SNR UL (dB)	Mod.	CR	Taxa UL
Mosteiro	32	64-QAM	0,562	27 Mbps
Riacho Verde	15,82	16-QAM	0,405	5,1 Mbps

De forma geral, os resultados consolidados nas Tabelas 13 e 14 mostram que a rede de acesso Brasil 6G apresentou desempenho superior no ponto Mosteiro, tanto em *downlink* quanto em *uplink*. No ponto Riacho Verde, embora as condições de propagação tenham sido mais restritivas, a comunicação permaneceu ativa e funcional, ainda que com redução das taxas efetivas de transmissão. Esse comportamento evidencia a capacidade do sistema de ajustar sua operação às características do canal e de manter conectividade mesmo em enlaces sujeitos a obstruções parciais e menores níveis de potência recebida. A adaptação da rede foi realizada de forma automática, a partir da análise instantânea das condições de cada enlace.

4 Conclusão

A realização da Atividade 4.3 da Fase III do Projeto Brasil 6G permitiu avançar de forma significativa na avaliação prática da rede de acesso em desenvolvimento, especialmente no que se refere à sua operação em condições reais de campo. A partir das otimizações previamente realizadas nos algoritmos de base do transceptor e dos testes conduzidos em ambiente laboratorial, conforme apresentado em [5], foi possível evoluir para uma etapa mais representativa de validação tecnológica, baseada na execução de experimentos em diferentes localidades.

Os testes de campo realizados em Santa Rita do Sapucaí, MG, permitiram avaliar o comportamento da rede de acesso em cenários distintos, incluindo ambiente externo ao laboratório, envolvendo diferentes pontos de instalação. Ademais, foram estabelecidos não somente enlaces de usuário único, entre a BS e os respectivos UEs, como também a operação multiusuário, com a BS se comunicando simultaneamente com os UEs. Esses experimentos foram importantes para validar o funcionamento integrado dos transceptores, verificar a estabilidade da comunicação, observar o desempenho do enlace em diferentes condições de propagação e identificar aspectos operacionais relevantes para a continuidade do desenvolvimento da plataforma.

Os testes realizados na cidade de Quixadá, no estado do Ceará, por sua vez, complementaram a avaliação ao considerar um ambiente mais desafiador com a presença de monólitos e obstruções ao enlace de comunicação. A avaliação dos enlaces estabelecidos entre a BS e os UEs localizados nos pontos de teste permitiu observar o comportamento da rede em uma condição geográfica e operacional distinta daquela avaliada em Santa Rita do Sapucaí. Essa diversidade de cenários é essencial para compreender melhor o desempenho da solução e para evitar conclusões restritas a um único ambiente de teste.

A análise consolidada dos resultados obtidos nos dois locais permitiu identificar o potencial da rede de acesso como solução para prover conectividade em regiões remotas e de difícil atendimento. Os resultados também reforçam a importância dos testes práticos como etapa indispensável para a maturação de tecnologias de comunicação. É nesse tipo de validação que limitações de sincronismo, estabilidade, configuração, instalação, propagação, sensibilidade do enlace, apontamento de antenas, comportamento dos terminais e desempenho em testes de maior duração podem ser efetivamente observadas e tratadas.

De modo geral, os resultados apresentados neste relatório demonstram que o Projeto Brasil 6G tem possibilitado uma evolução concreta da rede de acesso, desde a concepção e implementação em laboratório até a avaliação em campo. As atividades conduzidas nesta etapa representam um avanço importante para a consolidação da rede de acesso desenvolvida no âmbito do Projeto Brasil 6G. Os testes realizados forneceram subsídios técnicos relevantes para o aprimoramento da solução, permitindo identificar pontos de melhoria, validar funcionalidades já implementadas e orientar as próximas etapas de desenvolvimento. A continuidade dessas avaliações será fundamental para aumentar o nível de maturidade tecnológica da plataforma, ampliar sua robustez operacional e aproximá-la de cenários reais de aplicação em prover conectividade à áreas remotas e rurais.

Referências

- [1] M. Shahid, T. Ul Islam, K. Das, S. Babu, D. Qiao, A. Ahmad, J. Song, Z. Zhu, Y. Guan, T. Chakraborty, S. Jog, R. Chandra, and H. Zhang, “Revisiting TVWS for Rural Broadband: Policy Insights from Nationwide Availability Analysis and ARA Field Validation,” in *2026 IEEE International Symposium on Spectrum Innovation (DySPAN)*, 2026, pp. 1–9.
- [2] Cunha, Matheus Sêda Borsato and Matos, Juliana de Cássia and Ferreira, Juliano Silveira and Marins, Anderson Reis Rufino and Zorello, Gilberto and Mendes, Luciano Leonel, “Coexistence analysis of dtv signals with 4g, 5g and 5g-range signals in tvws,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 75, no. 4, pp. 6705–6716, 2026.
- [3] M. Rahman and A. Saifullah, “A Comprehensive Survey on Networking over TV White Spaces,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 59, p. 101072, 2019.
- [4] Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) Inatel, “Atividade 4.3 - Avaliação de desempenho da rede em condições reais - Parte 1,” *Projeto Brasil 6G*, Jul. 2026.
- [5] —, “Atividade 4.2 - Implementação de tecnologias para testes em campo - Parte 2,” *Projeto Brasil 6G*, Jul. 2026.
- [6] Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR), Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), “Atividade 3.3 - Testes de Campo e Análise dos Resultados,” 2023.
- [7] Agência Nacional de Telecomunicações, Anatel, “Anexo à Resolução nº 747, de 05 de novembro de 2021,” 2021, [Online]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anatel-n-747-de-5-de-outubro-de-2021-350609897>. Acessado em: 20 de dezembro de 2022.
- [8] F. Conceição, M. Gomes, V. Silva, R. Dinis, A. Silva, and D. Castanheira, “A survey of candidate waveforms for beyond 5G systems,” *Electronics*, vol. 10, no. 1, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/1/21>
- [9] N. Michailow, M. Matthé, I. S. Gaspar, A. N. Caldevilla, L. L. Mendes, A. Festag, and G. Fettweis, “Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3045–3061, 2014.
- [10] Radio Mobile, “Radio Mobile,” 2025, [Online]. Disponível em: <http://www.ve2dbe.com/english1.html>. Acessado em: 19 de março de 2025.
- [11] S. Kasampalis, P. I. Lazaridis, Z. D. Zaharis, A. Bizopoulos, S. Zettas, and J. Cosmas, “Comparison of longley-rice, itm and itwom propagation models for dtv and fm broadcasting,” in *2013 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2013, pp. 1–6.
- [12] Radio Mobile, “Radio Mobile,” 2023, [Online]. Disponível em: <http://radiomobile.pe1mew.nl/?Calculations>. Acessado em: 11 de abril de 2023.
- [13] Ookla, “Speedtest by Ookla,” <https://www.speedtest.net/>, 2026, accessed: 2026-07-15.
- [14] Minha Conexão, “Minha Conexão: Teste a Velocidade Real da sua Internet,” <https://www.minhaconexao.com.br/>, 2026, acesso em: 16 jul. 2026.

- [15] Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem Fio (GTEL), “Grupo de pesquisa em telecomunicações sem fio – universidade federal do ceará,” 2026, acesso em: 22 jul. 2026. [Online]. Available: <https://gtel.ufc.br/>
- [16] Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR (NIC.br), “Nic.br – quem somos,” 2026, acesso em: 22 jul. 2026. [Online]. Available: <https://www.nic.br/quem-somos/>