



# Projeto Brasil 6G Fase III

## Atividade 4.4 Demonstrações das soluções desenvolvidas no projeto



29/07/2026

## Histórico de Atualizações:

| Versão | Data       | Autor(es)                                                                                                                                                                                                                                  | Notas                  |
|--------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 1      | 05/07/2026 | Anderson Reis Rufino Marins<br>Eddy Hernández Inguanzo<br>Jorge Ricardo Mejia Salazar<br>Juliano Silveira Ferreira<br>Letícia Carneiro de Souza<br>Samuel Baraldi Mafra<br>Victoria Dala Pegorara Souto<br>William Orivaldo Faria Carvalho | Elaboração de conteúdo |
| 2      | 28/07/2026 | Anderson Reis Rufino Marins<br>Juliano Silveira Ferreira<br>Luciano Leonel Mendes<br>Luiz Gustavo Barros Guedes                                                                                                                            | Revisão geral          |

## Lista de Figuras

|    |                                                                                                                                                                                         |    |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Visão geral da integração das aplicações com a rede de acesso. . . . .                                                                                                                  | 2  |
| 2  | Possibilidades de integração com a rede de acesso. . . . .                                                                                                                              | 3  |
| 3  | Protótipo UAV-LiDAR desenvolvido para aquisição e processamento embarcado de dados. . . . .                                                                                             | 4  |
| 4  | Cenário experimental utilizado para validação da integração entre a aplicação UAV-LiDAR e a rede de acesso Brasil 6G. . . . .                                                           | 5  |
| 5  | Mapa de calor gerados pelo UAV-LiDAR e acessados remotamente via <i>dashboard</i> . . . . .                                                                                             | 6  |
| 6  | Protótipo da coleira de monitoramento desenvolvida para monitoramento de fauna silvestre. À esquerda, a coleira instrumentada; à direita, a PCB do sistema. . . . .                     | 7  |
| 7  | Cenário experimental utilizado para validação da integração entre a aplicação de monitoramento de fauna e a rede de acesso. . . . .                                                     | 8  |
| 8  | <i>Dashboard</i> desenvolvido em Node-RED para visualização das variáveis coletadas pela coleira de monitoramento e transmitidas pela infraestrutura integrada. . . . .                 | 9  |
| 9  | Protótipo da armadilha multipragas. . . . .                                                                                                                                             | 11 |
| 10 | Cenário experimental utilizado para validação da integração entre a aplicação de armadilha multipragas e a rede de acesso. . . . .                                                      | 12 |
| 11 | <i>Dashboard</i> da armadilha multipragas. . . . .                                                                                                                                      | 13 |
| 12 | Controlador de cargas: visão dos módulos principais de <i>hardware</i> . . . . .                                                                                                        | 14 |
| 13 | Controlador de cargas integrado ao <i>rack</i> de dispositivos de IoT. . . . .                                                                                                          | 16 |
| 14 | <i>Dashboard</i> principal. . . . .                                                                                                                                                     | 16 |
| 15 | <i>Setup</i> de referência para o teste da antena flexível. . . . .                                                                                                                     | 20 |
| 16 | <i>Setup</i> de teste da antena flexível. . . . .                                                                                                                                       | 21 |
| 17 | Cenário experimental utilizado para avaliação das antenas comerciais e flexíveis. . . . .                                                                                               | 21 |
| 18 | PSD do sinal entregue à antena transmissora, indicando potência igual a $-10$ dBm. . . . .                                                                                              | 22 |
| 19 | Sinal recebido para diferentes antenas utilizadas na transmissão e potências entregues às antenas. . . . .                                                                              | 23 |
| 20 | Evolução temporal dos parâmetros dos testes de <i>uplink</i> para potência de $-10$ dBm entregue a cada uma das antenas transmissoras e protocolo TCP. . . . .                          | 25 |
| 21 | Evolução temporal dos parâmetros dos testes de <i>uplink</i> para potência de $-20$ dBm entregue a cada uma das antenas transmissoras e protocolo TCP. . . . .                          | 27 |
| 22 | Esquema do cenário de referência, com antenas comerciais na transmissão e na recepção, tanto na (a) BS quanto no (b) UE. . . . .                                                        | 32 |
| 23 | Esquema do cenário de teste, com antenas do protótipo na (a) transmissão em <i>downlink</i> e em (b) <i>uplink</i> , mantendo antenas comerciais na recepção. . . . .                   | 32 |
| 24 | Cenário experimental utilizado para avaliação das antenas comerciais e das antenas planares. . . . .                                                                                    | 33 |
| 25 | Potência entregue às antenas transmissoras para a configuração nominal de $-10$ dBm. . . . .                                                                                            | 34 |
| 26 | Potência recebida na BS no <i>uplink</i> , com antenas comerciais na recepção e alternância da antena transmissora no UE. . . . .                                                       | 36 |
| 27 | Potência recebida no UE no <i>downlink</i> , com antenas comerciais na recepção e alternância da antena transmissora na BS. . . . .                                                     | 38 |
| 28 | Evolução temporal dos parâmetros avaliados no teste de <i>downlink</i> com protocolo UDP, considerando potência de aproximadamente $-10$ dBm entregue às antenas transmissoras. . . . . | 41 |

|    |                                                                                                                                                               |    |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 29 | Evolução temporal dos parâmetros avaliados no teste de <i>uplink</i> com UDP, considerando potência de $-10$ dBm entregue às antenas transmissoras. . . . .   | 43 |
| 30 | Evolução temporal dos parâmetros avaliados no teste de <i>downlink</i> com UDP, considerando potência de $-20$ dBm entregue às antenas transmissoras. . . . . | 45 |
| 31 | Evolução temporal dos parâmetros avaliados no teste de <i>uplink</i> com UDP, considerando potência de $-20$ dBm entregue às antenas transmissoras. . . . .   | 47 |



## Lista de Tabelas

|    |                                                                                                                                                               |    |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Principais características da antena comercial utilizada como referência. . . . .                                                                             | 18 |
| 2  | Especificações técnicas e características de desempenho da antena flexível [1]. . .                                                                           | 19 |
| 3  | Condições de teste da antena flexível e medidas para o enlace de <i>uplink</i> . . . . .                                                                      | 23 |
| 4  | Comparação dos resultados dos testes de <i>uplink</i> considerando protocolo potência de $-10$ dBm entregue às antenas transmissoras e protocolo TCP. . . . . | 26 |
| 5  | Comparação dos resultados dos testes de <i>uplink</i> considerando potência de $-20$ dBm entregue às antenas transmissoras e protocolo TCP. . . . .           | 28 |
| 6  | Especificações técnicas e características de desempenho das antenas planares propostas para UHF [1]. . . . .                                                  | 30 |
| 7  | Condições de teste das antenas planares e medidas de potência recebida no <i>uplink</i> . . .                                                                 | 35 |
| 8  | Condições de teste das antenas planares e medidas de potência recebida no <i>downlink</i> . . . . .                                                           | 37 |
| 9  | Taxas configuradas na ferramenta <i>iperf</i> para os testes com UDP. . . . .                                                                                 | 40 |
| 10 | Comparação dos resultados do teste de <i>downlink</i> com UDP para potência de $-10$ dBm entregue às antenas transmissoras. . . . .                           | 40 |
| 11 | Comparação dos resultados do teste de <i>uplink</i> com UDP para potência de $-10$ dBm entregue às antenas transmissoras. . . . .                             | 42 |
| 12 | Comparação dos resultados do teste de <i>downlink</i> com UDP para potência de $-20$ dBm entregue às antenas transmissoras. . . . .                           | 44 |
| 13 | Comparação dos resultados do teste de <i>uplink</i> com UDP para potência de $-20$ dBm entregue às antenas transmissoras. . . . .                             | 46 |

## Acrônimos

|              |                                            |
|--------------|--------------------------------------------|
| <b>6G</b>    | Sexta Geração de Rede Móvel Celular        |
| <b>API</b>   | <i>Application Programming Interfaces</i>  |
| <b>BER</b>   | <i>Bit Error Rate</i>                      |
| <b>BS</b>    | <i>Base Station</i>                        |
| <b>CHM</b>   | <i>Canopy Height Model</i>                 |
| <b>EVM</b>   | <i>Error Vector Magnitude</i>              |
| <b>FDD</b>   | <i>Frequency Division Multiplexing</i>     |
| <b>FR-4</b>  | <i>Flame Retardant 4</i>                   |
| <b>GPS</b>   | <i>Global Positioning System</i>           |
| <b>IA</b>    | Inteligencia Artificial                    |
| <b>IoT</b>   | <i>Internet of Things</i>                  |
| <b>IP</b>    | <i>Internet Protocol</i>                   |
| <b>JWT</b>   | <i>JSON Web Tokens</i>                     |
| <b>LiDAR</b> | <i>Light Detection and Ranging</i>         |
| <b>LoRa</b>  | <i>Long Range</i>                          |
| <b>MIMO</b>  | <i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>  |
| <b>MQTT</b>  | <i>Message Queuing Telemetry Transport</i> |
| <b>PCB</b>   | <i>Printed Circuit Board</i>               |
| <b>PSD</b>   | <i>Power Spectrum Density</i>              |
| <b>QAM</b>   | <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>     |
| <b>QPSK</b>  | <i>Quaternary Phase-Shift Keying</i>       |
| <b>RF</b>    | <i>Radio Frequency</i>                     |
| <b>RSSI</b>  | <i>Received Signal Strength Indicator</i>  |
| <b>SDR</b>   | <i>Software Defined Radio</i>              |
| <b>SNR</b>   | <i>Signal-to-Noise Ratio</i>               |
| <b>TCP</b>   | <i>Transmission Control Protocol</i>       |
| <b>TVWS</b>  | <i>TV White Space</i>                      |
| <b>UAV</b>   | <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>             |
| <b>UDP</b>   | <i>User Datagram Protocol</i>              |
| <b>UE</b>    | <i>User Equipment</i>                      |
| <b>UHF</b>   | <i>Ultra High Frequency</i>                |
| <b>Wi-Fi</b> | <i>Wireless Fidelity</i>                   |
| <b>YOLO</b>  | <i>You Only Look Once</i>                  |

# Sumário

|          |                                                                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                                                                      | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Integração de aplicações inovadoras com a rede de acesso Brasil 6G</b>                              | <b>2</b>  |
| 2.1      | Integração com a aplicação com LiDAR . . . . .                                                         | 3         |
| 2.1.1    | Integração da aplicação com a rede de acesso . . . . .                                                 | 4         |
| 2.1.2    | Conclusões e trabalhos futuros . . . . .                                                               | 6         |
| 2.2      | Integração com a coleira de monitoramento de animais silvestres . . . . .                              | 6         |
| 2.2.1    | Integração da coleira de monitoramento com a rede de acesso . . . . .                                  | 8         |
| 2.2.2    | Conclusões e trabalhos futuros . . . . .                                                               | 9         |
| 2.3      | Integração com a armadilha multipragas baseada em inteligência artificial . . . .                      | 10        |
| 2.3.1    | Integração da armadilha multipragas com a rede de acesso . . . . .                                     | 11        |
| 2.3.2    | Conclusões e trabalhos futuros . . . . .                                                               | 12        |
| 2.4      | Integração com controlador de cargas . . . . .                                                         | 13        |
| 2.4.1    | Integração do controlador de cargas com a rede de acesso . . . . .                                     | 15        |
| 2.4.2    | Conclusões e trabalhos futuros . . . . .                                                               | 16        |
| <b>3</b> | <b>Integração da rede de acesso com antenas inovadoras</b>                                             | <b>18</b> |
| 3.1      | Integração com antenas flexíveis para faixa de UHF . . . . .                                           | 18        |
| 3.1.1    | Descrição do cenário de integração e teste . . . . .                                                   | 20        |
| 3.1.2    | Condições de testes, configuração de potência e medições no receptor . .                               | 22        |
| 3.1.3    | Análise de parâmetros associados ao enlace de comunicação da rede de<br>acesso . . . . .               | 24        |
| 3.1.4    | Testes de <i>uplink</i> considerando potência de transmissão de $-10$ dBm e<br>protocolo TCP . . . . . | 24        |
| 3.1.5    | Testes de <i>uplink</i> considerando potência de transmissão de $-20$ dBm e<br>protocolo TCP . . . . . | 26        |
| 3.1.6    | Discussão geral e conclusão . . . . .                                                                  | 28        |
| 3.2      | Integração com antenas planares para faixa de UHF . . . . .                                            | 29        |
| 3.2.1    | Descrição do cenário de integração e teste das antenas planares . . . . .                              | 31        |
| 3.2.2    | Condições de testes, configuração de potência e medições no receptor . .                               | 34        |
| 3.2.3    | Análise de parâmetros associados ao enlace de comunicação da rede de<br>acesso . . . . .               | 39        |
| 3.2.4    | Testes de <i>downlink</i> considerando potência de $-10$ dBm e protocolo UDP                           | 40        |
| 3.2.5    | Testes de <i>uplink</i> considerando potência de $-10$ dBm e protocolo UDP . .                         | 42        |
| 3.2.6    | Testes de <i>downlink</i> considerando potência de $-20$ dBm e protocolo UDP                           | 44        |
| 3.2.7    | Testes de <i>uplink</i> considerando potência de $-20$ dBm e protocolo UDP . .                         | 46        |
| 3.2.8    | Discussão geral e conclusão . . . . .                                                                  | 48        |
| <b>4</b> | <b>Conclusão</b>                                                                                       | <b>49</b> |

# 1 Introdução

A conectividade em áreas remotas e rurais representa um dos principais desafios para a evolução das redes de comunicação, especialmente em cenários nos quais a infraestrutura convencional de telecomunicações apresenta limitações de cobertura, custo de implantação ou disponibilidade operacional. Nesse contexto, o projeto Brasil 6G busca contribuir para o desenvolvimento, validação e demonstração de uma rede de acesso flexível, capaz de prover conectividade a diferentes tipos de aplicações, dispositivos, tecnologias e ambientes de uso.

A etapa atual do projeto contempla a integração de soluções inovadoras à rede de acesso Brasil 6G, com o objetivo de avaliar sua capacidade de suportar diferentes formas de uso e validar sua compatibilidade com dispositivos, interfaces e aplicações heterogêneas. Nesse contexto, foram consideradas aplicações voltadas à agricultura, ao monitoramento de animais, à detecção de pragas em ambientes rurais e urbanos, e ao controle remoto de cargas. Essas aplicações foram selecionadas por apresentarem demandas relevantes de conectividade e por representarem casos de uso alinhados aos desafios de digitalização de áreas de difícil atendimento por redes tradicionais.

Além da integração das aplicações citadas, esta etapa também contempla uma frente adicional e independente de validação, relacionada à integração da rede de acesso Brasil 6G com antenas inovadoras desenvolvidas no âmbito do próprio projeto. Foram consideradas uma antena flexível e uma antena do tipo *patch*, ambas com dimensões reduzidas para operação na faixa de *Ultra High Frequency* (UHF). Essa integração permite ampliar as possibilidades de testes da rede de acesso em ambientes laboratoriais e em configurações mais compactas, favorecendo avaliações com dispositivos de menor porte e maior potencial de portabilidade.

A arquitetura de integração adotada para as aplicações considera a utilização da estação rádio base, ou *Base Station* (BS), conectada à internet e responsável por estabelecer comunicação com o terminal de usuário, ou *User Equipment* (UE), por meio de enlace de *Radio Frequency* (RF). A partir do UE, a conectividade é distribuída para diferentes interfaces, roteadores, *gateways* e dispositivos associados às aplicações avaliadas. Essa abordagem permite demonstrar a rede de acesso não apenas como um enlace de comunicação, mas como uma infraestrutura habilitadora para a integração de múltiplas tecnologias e soluções aplicadas.

O processo de testes e integração constitui uma etapa fundamental para a maturação tanto da rede de acesso quanto das soluções conectadas. Ao validar o funcionamento da rede em diferentes formas de uso, torna-se possível avaliar sua compatibilidade com aplicações diversas, dispositivos de comunicação e elementos de RF desenvolvidos no projeto. Além disso, os testes permitem identificar limitações operacionais, ajustar interfaces de comunicação, avaliar alternativas de implementação e verificar a adequação da rede a cenários reais ou representativos. Dessa forma, a integração com aplicações e antenas inovadoras contribui para impulsionar pesquisas, experimentações e o desenvolvimento de novas soluções baseadas em conectividade avançada.

Este relatório, portanto, apresenta o processo de integração das soluções selecionadas à rede de acesso Brasil 6G, descrevendo a arquitetura geral adotada, as interfaces e tecnologias consideradas e os testes realizados. Com essa finalidade, o presente documento encontra-se estruturado da seguinte forma: a Seção 2 expõe a integração de aplicações inovadoras com a rede de acesso, como *Light Detection and Ranging* (LiDAR), coleira de monitoramento de animais silvestres, armadilha multipragas baseada em Inteligência Artificial (IA) e controlador de cargas; a Seção 3 avalia a integração de antenas inovadoras, flexíveis ou planares, à rede de acesso; e, finalmente, a Seção 4 aponta as principais conclusões e considerações finais.

## 2 Integração de aplicações inovadoras com a rede de acesso Brasil 6G

O desenvolvimento da etapa atual do projeto Brasil 6G contempla a demonstração de soluções inovadoras integradas à rede de acesso Brasil 6G. Essa integração e subsequente teste constituem uma etapa fundamental para a validação técnica da plataforma em condições representativas de uso. Ao conectar diferentes soluções, interfaces e dispositivos ao terminal UE, torna-se possível avaliar não apenas o funcionamento individual de cada aplicação, mas também a capacidade da rede de acesso em prover conectividade para cenários heterogêneos, com diferentes requisitos de comunicação, monitoramento e controle remoto. Essa abordagem favorece a maturação das aplicações integradas, pois permite identificar limitações operacionais, ajustar arquiteturas, validar interfaces de comunicação e aprimorar mecanismos de operação em ambiente realista. Além disso, os testes de integração evidenciam a compatibilidade da rede de acesso com aplicações diversas e reforçam sua flexibilidade para atender diferentes formas de uso, especialmente em cenários remotos ou rurais. Dessa forma, a plataforma contribui tanto para a evolução da própria rede de acesso quanto para impulsionar pesquisas, desenvolvimentos e validações de novas aplicações baseadas em conectividade avançada.

A Figura 1 apresenta o diagrama do *set-up* principal utilizado para a integração das aplicações avaliadas. Nesse cenário, a BS da rede de acesso Brasil 6G, conectada à internet, estabelece comunicação com o UE por meio de um enlace de RF, utilizando a estrutura de quadro e as tecnologias suportadas pela rede. A partir do UE, a conectividade é distribuída por um *switch* Ethernet para roteadores e *gateways* associados às diferentes tecnologias integradas.

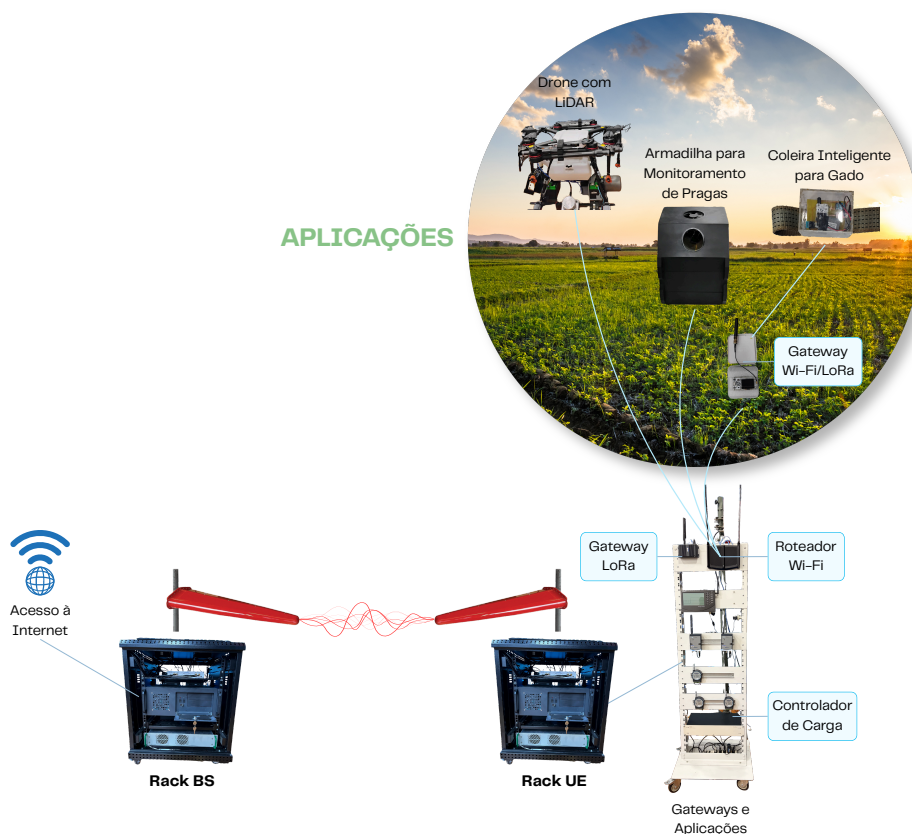


Figura 1: Visão geral da integração das aplicações com a rede de acesso.

A Figura 2 apresenta uma visão geral das interfaces e tecnologias inicialmente previstas para integração com o terminal UE da rede de acesso. As possibilidades incluem conexões Ethernet cabeadas, *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), *Long Range* (LoRa), Sigfox e rádios proprietários. Essa diversidade de interfaces evidencia a flexibilidade da rede de acesso Brasil 6G para integrar diferentes aplicações, dispositivos e soluções comerciais em múltiplos cenários de uso.

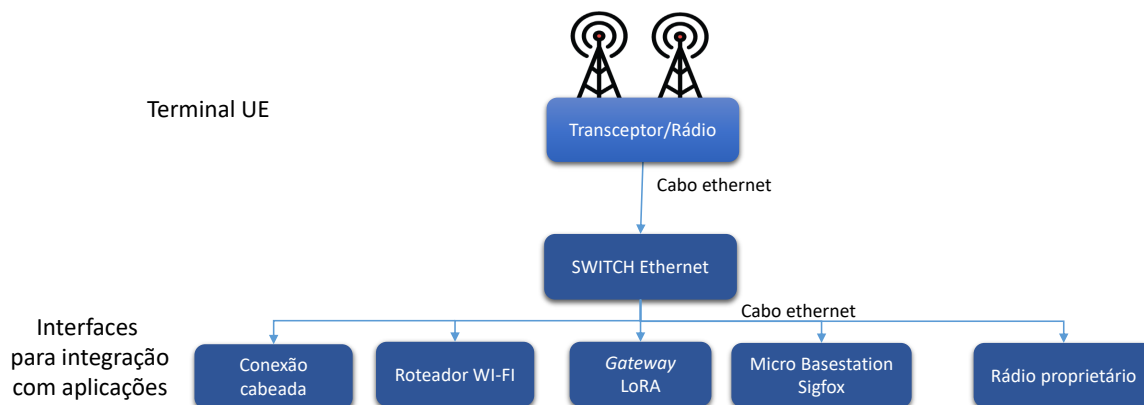


Figura 2: Possibilidades de integração com a rede de acesso.

Dentre as aplicações integradas à rede de acesso que se encontram em fase de maior maturação, destacam-se: o uso de drone com LiDAR para aplicações voltadas à agricultura; o monitoramento de animais; a detecção de pragas em ambientes rurais e urbanos; e o controle remoto de cargas. Embora possuam objetivos distintos, essas aplicações compartilham o mesmo contexto de uso em áreas remotas ou rurais, além da necessidade de conexão com a internet para viabilizar o monitoramento e/ou controle remoto. A finalidade de cada aplicação, sua integração com a rede de acesso Brasil 6G e os testes realizados para demonstrar essa integração estão detalhados nas subseções seguintes.

## 2.1 Integração com a aplicação com LiDAR

A agricultura de precisão tem incorporado cada vez mais tecnologias de sensoriamento remoto para obtenção de informações detalhadas sobre as culturas agrícolas [2]. Nesse contexto, os sensores LiDAR têm se destacado por sua capacidade de gerar representações tridimensionais de alta resolução da vegetação e do terreno, possibilitando a extração de parâmetros agrônômicos como altura de plantas, volume vegetativo, biomassa e características estruturais das lavouras [3, 4]. Essas informações podem contribuir para o monitoramento do desenvolvimento das culturas, para a otimização do uso de insumos e para o apoio à tomada de decisão no campo [5]. Entretanto, a utilização operacional desses sistemas em áreas rurais requer não apenas mecanismos eficientes de aquisição e processamento dos dados, mas também soluções de conectividade capazes de transportar as informações geradas para usuários e aplicações remotas [3, 6]. Nesse contexto, foi desenvolvida uma aplicação que integra sensoriamento remoto baseado em LiDAR, processamento computacional em borda e conectividade utilizando a rede de acesso em desenvolvimento no contexto do projeto, visando o desenvolvimento de soluções de monitoramento agrícola alinhadas aos conceitos das futuras redes Sexta Geração de Rede Móvel Celular (6G). A aplicação permite avaliar a integração entre sensoriamento avançado, processamento distribuído e comunicação sem fio em ambientes rurais, contribuindo para o



desenvolvimento de casos de uso verticais para futuras infraestruturas de conectividade.

A Figura 3 apresenta o protótipo desenvolvido para aquisição e processamento embarcado de dados LiDAR. A plataforma é baseada em um *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) agrícola DJI Agras MG-1P, equipado com um sensor LiDAR Ouster OS1-128 e uma unidade de processamento NVIDIA® Jetson Orin™ NX. O sistema inclui ainda uma *interface box* responsável pela distribuição de alimentação elétrica e pela comunicação de dados entre o sensor LiDAR e a plataforma computacional embarcada. Além disso, baterias dedicadas são utilizadas para alimentação do sensor LiDAR e da plataforma de processamento, sendo o acionamento dos módulos eletrônicos realizado por meio de uma chave independente. Essa configuração permite a aquisição, armazenamento e processamento local dos dados LiDAR durante as missões de voo, constituindo a base da aplicação integrada com a rede de acesso desenvolvida no contexto do Projeto Brasil 6G. O detalhamento da arquitetura UAV-LiDAR desenvolvida, dos algoritmos de processamento e dos resultados agrônômicos obtidos encontra-se descrito em [7].

### 2.1.1 Integração da aplicação com a rede de acesso

A aplicação foi integrada à rede de acesso Brasil 6G, caracterizada como um sistema de *TV White Space* (TVWS), por meio da conectividade Wi-Fi disponibilizada pelo terminal UE. O objetivo desta atividade foi validar a arquitetura de comunicação proposta e verificar a viabilidade da transmissão, por meio da rede de acesso, dos dados gerados pelo sistema UAV-LiDAR. Os experimentos foram realizados em ambiente laboratorial, utilizando transceptores da própria rede. Para isso, empregou-se uma BS, conectada diretamente à internet, e um UE, responsável por disponibilizar à aplicação a conectividade provida pela rede de acesso.

Após a validação da conectividade entre os dispositivos, foram realizados experimentos para transmissão dos dados derivados do processamento LiDAR. Nesse fluxo, os dados gerados pelo sistema UAV-LiDAR são encaminhados ao terminal UE por meio da rede local Wi-Fi e, em seguida, transmitidos pela rede de acesso até a BS, conectada à internet. A Figura 4 apresenta o ambiente experimental utilizado para validar a integração entre a aplicação UAV-LiDAR e a rede de acesso Brasil 6G. A Figura 4(a) mostra o sistema UAV-LiDAR, juntamente

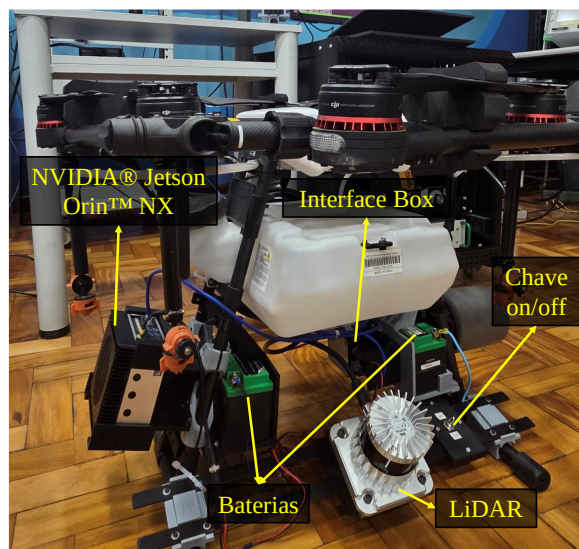


Figura 3: Protótipo UAV-LiDAR desenvolvido para aquisição e processamento embarcado de dados.



Figura 4: Cenário experimental utilizado para validação da integração entre a aplicação UAV-LiDAR e a rede de acesso Brasil 6G.

com o roteador Wi-Fi TP-Link TL-WR841HP, o adaptador Wi-Fi TP-Link TL-WN8200ND, o terminal UE e o *dashboard* utilizado para visualização dos dados. A Figura 4(b) apresenta a BS, com acesso cabeado à internet. Por fim, a Figura 4(c) mostra uma visão geral da configuração experimental, destacando o enlace estabelecido entre o conjunto UE/UAV-LiDAR e a BS.

Como primeira demonstração da integração, utilizou-se o acesso à internet provido pela rede de acesso para transmitir, a um servidor remoto, um mapa de calor derivado dos dados LiDAR. Esse mapa representa a distribuição espacial da altura da vegetação na área monitorada e é gerado a partir do *Canopy Height Model* (CHM), produto que estima a altura dos alvos em relação ao terreno. Após o envio, a imagem foi automaticamente disponibilizada no *dashboard* desenvolvido no contexto do Projeto Brasil 6G, conforme ilustrado na Figura 5.

O resultado demonstra a capacidade da infraestrutura de suportar a transmissão e a disponibilização remota de dados derivados do processamento LiDAR, permitindo o acesso a informações agrônômicas por usuários conectados à rede. Em um segundo experimento, foi realizada a transferência de um arquivo contendo o CHM. Nesse caso, o arquivo foi inicialmente transmitido via Wi-Fi para o terminal UE e, posteriormente, encaminhado por comunicação baseada em *Internet Protocol* (IP) sobre a rede de acesso até um computador conectado à rede



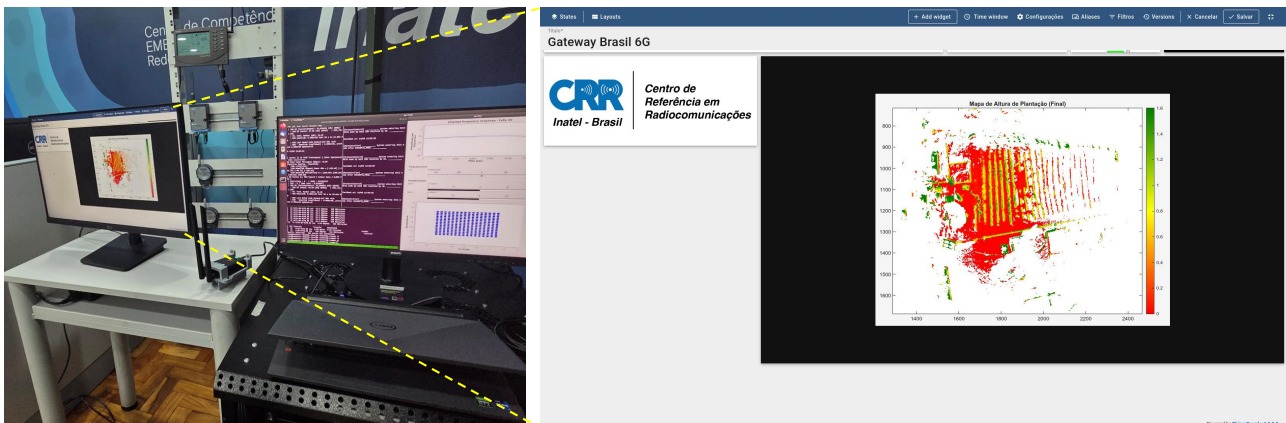


Figura 5: Mapa de calor gerados pelo UAV-LiDAR e acessados remotamente via *dashboard*.

institucional do Inatel. A recepção bem-sucedida do arquivo confirmou a capacidade da infraestrutura de transportar dados derivados do processamento LiDAR entre diferentes segmentos da rede.

### 2.1.2 Conclusões e trabalhos futuros

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da integração entre a aplicação UAV-LiDAR e a infraestrutura de comunicação da rede de acesso Brasil 6G. A partir dos experimentos realizados em ambiente laboratorial, foi possível validar o transporte de dados derivados do processamento LiDAR pela rede de acesso, incluindo a disponibilização remota de informações agrônômicas em um *dashboard* de monitoramento e a transferência de arquivos processados por meio de comunicação IP convencional.

A integração foi realizada de forma transparente para a aplicação, sem necessidade de adaptações específicas na camada de *software*, evidenciando a compatibilidade da solução com arquiteturas baseadas em protocolos amplamente utilizados. Esses resultados representam um passo inicial para o uso de sistemas LiDAR embarcados em aplicações de monitoramento agrícola conectadas a infraestruturas de comunicação sem fio de longo alcance.

Além disso, a arquitetura proposta evidencia o potencial da integração entre sensoriamento remoto, processamento em borda e conectividade sem fio para aplicações agrícolas inteligentes, alinhando-se aos conceitos de conectividade ubíqua e aplicações verticais previstos para futuras redes 6G. Como trabalhos futuros, pretende-se validar a arquitetura em condições reais de operação, utilizando a plataforma UAV-LiDAR em missões de voo em ambientes agrícolas. Também se pretende ampliar a integração entre os módulos de aquisição, processamento e comunicação, investigando estratégias para a disponibilização de informações agrônômicas em tempo quase real e para o suporte a aplicações avançadas de agricultura de precisão.

## 2.2 Integração com a coleira de monitoramento de animais silvestres

A conservação da fauna silvestre tem demandado cada vez mais soluções tecnológicas capazes de fornecer informações contínuas sobre deslocamento, comportamento e condições ambientais associadas aos animais monitorados [8, 9]. Nesse contexto, tecnologias de *Internet of Things* (IoT) têm se destacado por possibilitar a aquisição remota de dados em campo, contribuindo para estudos ecológicos, definição de corredores de conservação, estratégias de manejo e

ações de preservação de espécies ameaçadas [10, 11]. Entretanto, soluções comerciais para monitoramento animal ainda apresentam alto custo, dependência de fornecedores internacionais, baixa frequência de atualização das posições e limitações quanto ao monitoramento energético e ambiental dos dispositivos. Diante desse cenário, foi desenvolvida uma aplicação baseada em comunicação LoRa para monitoramento de fauna silvestre, visando a construção de uma solução nacional, de baixo custo e baixo consumo energético, alinhada às necessidades de monitoramento remoto em ambientes naturais.

A Figura 6 apresenta o protótipo desenvolvido para aquisição, transmissão e acompanhamento remoto de dados relacionados à fauna silvestre. A plataforma é baseada no microcontrolador Heltec ESP32 LoRa V2, responsável pela leitura dos sensores, organização dos pacotes de dados e transmissão das informações por meio da tecnologia LoRa. O protótipo integra sensores destinados à coleta de variáveis ambientais, comportamentais e energéticas, incluindo o DHT11 para medição de temperatura e umidade, o BH1750 para luminosidade, o MPU6050 para aquisição de dados de aceleração e movimento, e o MAX17043 para monitoramento do nível de carga da bateria. A alimentação do dispositivo é realizada por bateria LS20, selecionada com foco em maior autonomia operacional.

A arquitetura geral da solução contempla a coleira como nó transmissor, múltiplos *gateways* LoRa para recepção dos pacotes e um *gateway* principal responsável pela agregação dos dados e publicação em nuvem por meio do protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). Os valores de *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) medidos pelos *gateways* são utilizados como suporte para uma estimativa aproximada da posição relativa da coleira, permitindo avaliar a viabilidade de localização preliminar sem o uso contínuo de módulos *Global Positioning System* (GPS). As informações coletadas são disponibilizadas em um *dashboard* desenvolvido na plataforma Node-RED, possibilitando o acompanhamento em tempo quase real das variáveis monitoradas e do estado operacional do sistema. O detalhamento da arquitetura da solução, dos componentes utilizados, da estratégia de comunicação, dos testes de bancada e dos resultados obtidos encontra-se descrito em [12].

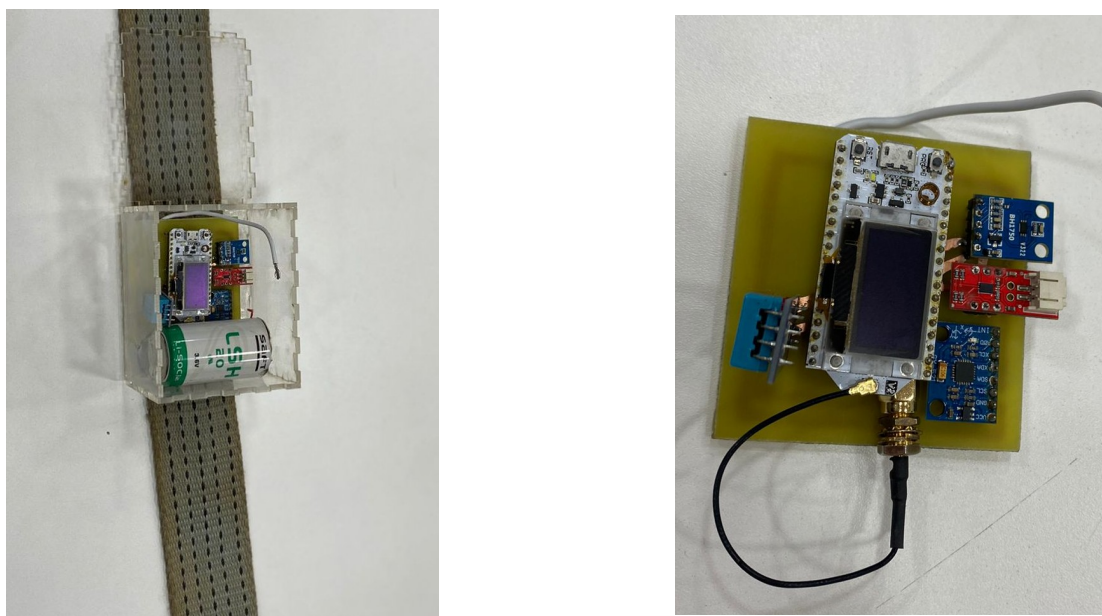


Figura 6: Protótipo da coleira de monitoramento desenvolvida para monitoramento de fauna silvestre. À esquerda, a coleira instrumentada; à direita, a PCB do sistema.

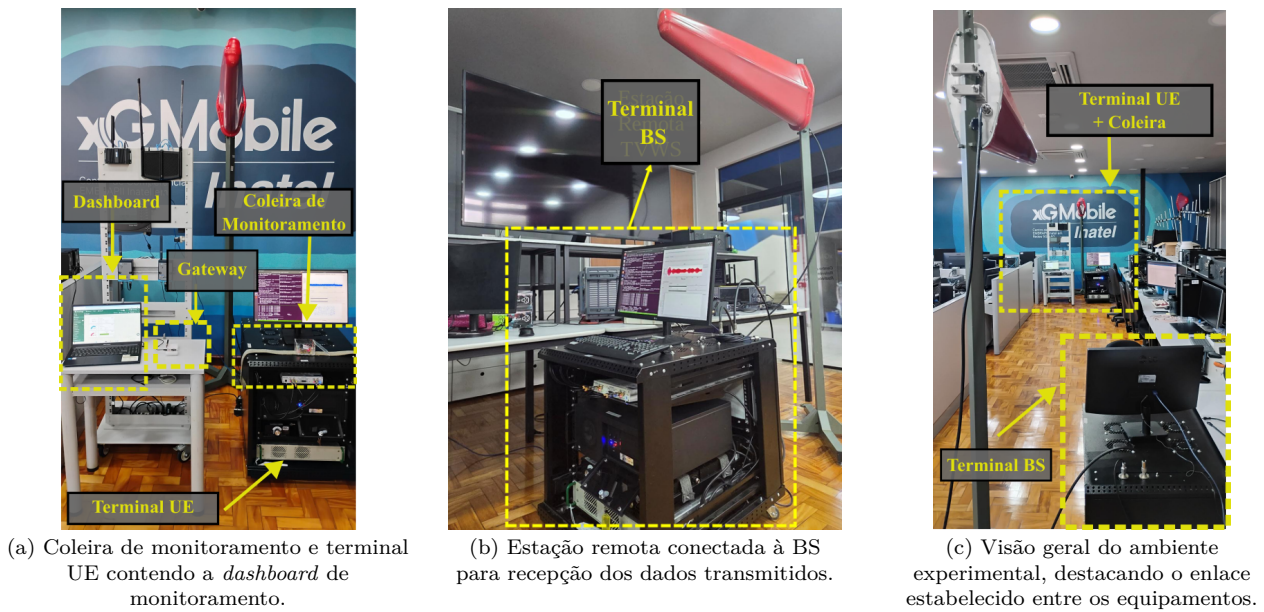


Figura 7: Cenário experimental utilizado para validação da integração entre a aplicação de monitoramento de fauna e a rede de acesso.

### 2.2.1 Integração da coleira de monitoramento com a rede de acesso

A integração da aplicação de monitoramento de fauna à rede de acesso Brasil 6G foi realizada por meio da interface Wi-Fi do terminal UE, responsável por disponibilizar conectividade à internet para a coleira. O objetivo dessa integração foi validar a arquitetura de comunicação proposta e verificar a viabilidade da transmissão remota dos dados coletados pelo protótipo através da rede de acesso Brasil 6G. Os experimentos foram conduzidos em ambiente laboratorial, utilizando a coleira de monitoramento, um terminal UE e um terminal BS da rede de acesso Brasil 6G. Desses terminais, apenas o terminal BS tinha acesso direto à internet, que foi compartilhado com o terminal do UE por meio do enlace da rede de acesso.

Após a validação da conectividade, foram realizados experimentos de transmissão das variáveis monitoradas pelo protótipo. Nesse fluxo, os dados são adquiridos pelos sensores embarcados, organizados em pacotes pelo microcontrolador e enviados pela interface Wi-Fi provida pelo transceptor da rede de acesso Brasil 6G. Em seguida, as informações são transmitidas pela rede de acesso para aplicações e servidores na internet, o que possibilita a visualização e o acompanhamento dos dados em tempo quase real e de maneira remota por meio de um *dashboard*.

A Figura 7 apresenta o ambiente experimental utilizado para validação da integração entre a aplicação de monitoramento de fauna e a rede de acesso. A Figura 7(a) mostra a coleira de monitoramento, o terminal UE que compartilha o acesso à internet para a coleira via interface Wi-Fi, e o *dashboard* de monitoramento. A Figura 7(b), por sua vez, mostra o terminal BS que provê a conectividade ao terminal UE. A Figura 7(c) mostra a visão geral do ambiente experimental.

Como demonstração da integração, a conectividade Wi-Fi provida pela rede de acesso foi utilizada a transmissão dos dados coletados pela coleira até a aplicação de visualização remota. As informações transmitidas incluíram variáveis ambientais, como temperatura, umidade e luminosidade; variáveis comportamentais, obtidas a partir dos dados de aceleração e movimento; e informações energéticas, associadas ao nível de carga da bateria. A publicação dos dados foi

realizada por meio do protocolo MQTT, com as variáveis organizadas em tópicos específicos para consumo por aplicações remotas.

A Figura 8 apresenta o *dashboard* desenvolvido em Node-RED para acompanhamento dos dados recebidos. A interface permite visualizar as variáveis monitoradas pela coleira e o estado operacional do sistema em tempo quase real. A recepção e exibição bem-sucedida dos dados confirmaram a capacidade da infraestrutura integrada de transportar informações do protótipo de monitoramento de fauna entre diferentes segmentos da rede.

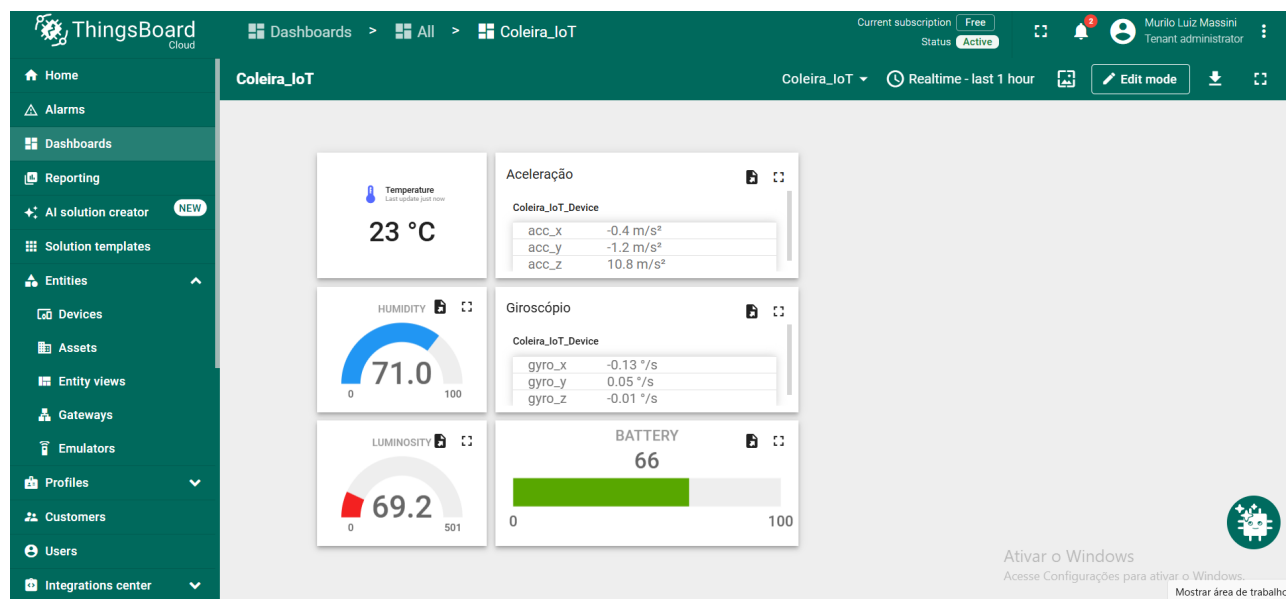


Figura 8: *Dashboard* desenvolvido em Node-RED para visualização das variáveis coletadas pela coleira de monitoramento e transmitidas pela infraestrutura integrada.

Os resultados obtidos demonstraram que a integração da coleira de monitoramento com a rede de acesso que viabiliza a transmissão das variáveis coletadas pelo protótipo, mantendo o fluxo ponta a ponta entre sensoriamento embarcado, conectividade local via Wi-Fi, rede de acesso Brasil 6G e visualização remota. Essa validação evidencia a aplicabilidade da solução como caso de uso vertical no contexto das futuras redes 6G, especialmente em cenários de conectividade rural, monitoramento ambiental e conservação da fauna silvestre.

## 2.2.2 Conclusões e trabalhos futuros

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da integração entre a aplicação de monitoramento de fauna e a rede de acesso desenvolvida no contexto do Projeto Brasil 6G. Por meio dos experimentos realizados em ambiente laboratorial, foi possível validar o transporte remoto dos dados coletados pela coleira por meio da rede de acesso, utilizando a conectividade Wi-Fi provida pelo transceptor para comunicação entre o protótipo e a infraestrutura de acesso. A integração permitiu a transmissão de variáveis ambientais, comportamentais e energéticas, bem como sua disponibilização em uma *dashboard* de monitoramento, possibilitando o acompanhamento das informações em tempo quase real.

A solução foi integrada de forma transparente à aplicação, utilizando comunicação baseada em IP e o protocolo MQTT para publicação dos dados em tópicos específicos. Essa abordagem evidenciou a compatibilidade do protótipo com arquiteturas de rede baseadas em protocolos amplamente utilizados em aplicações de IoT, sem exigir alterações significativas na camada



de *software* da aplicação. Os experimentos realizados representam uma etapa inicial para a utilização de coleiras inteligentes conectadas a infraestruturas de comunicação sem fio de longo alcance, especialmente em cenários de monitoramento ambiental, conservação da fauna e conectividade rural.

Além disso, a arquitetura proposta evidencia o potencial da integração entre sensoriamento embarcado, conectividade sem fio e visualização remota para aplicações verticais alinhadas aos conceitos das futuras redes 6G. A possibilidade de transmitir informações coletadas em campo para aplicações remotas amplia a capacidade de acompanhamento de animais silvestres e pode contribuir para estudos ecológicos, estratégias de manejo e ações de preservação.

Como trabalhos futuros, pretende-se aprimorar o protótipo da coleira, com foco na miniaturização da eletrônica embarcada, melhoria da eficiência energética, desenvolvimento de encapsulamento adequado para uso em ambientes externos e aumento da robustez mecânica do dispositivo. Adicionalmente, pretende-se evoluir os mecanismos de aquisição e transmissão dos dados, investigar estratégias de operação com menor consumo energético e realizar validações em condições reais de uso. Essas etapas permitirão avaliar o desempenho da solução em campo e avançar no desenvolvimento de uma plataforma mais robusta, escalável e adequada ao monitoramento remoto de fauna silvestre.

## 2.3 Integração com a armadilha multipragas baseada em inteligência artificial

O controle de pragas agrícolas e vetores de doenças representa um desafio persistente para a agricultura de precisão e a saúde pública, exigindo soluções capazes de identificar espécies-alvo de forma contínua, precisa e de baixo custo operacional [13, 14]. Nesse contexto, tecnologias de visão computacional aliadas à IoT têm se mostrado promissoras para a automatização do monitoramento entomológico, reduzindo a dependência de inspeção manual e ampliando a cobertura espacial e temporal da coleta de dados [15, 16, 17, 18]. Entretanto, soluções existentes costumam ser voltadas a uma única praga ou vetor, exigindo múltiplos dispositivos para cenários com ameaças distintas, além de apresentarem custos elevados de implantação e escalabilidade limitada em regiões de conectividade restrita. Diante desse cenário, foi desenvolvida uma armadilha inteligente multipragas, capaz de identificar simultaneamente diferentes espécies de interesse agrícola e sanitário, com destaque para o mosquito *Aedes aegypti*, a broca-do-café (*Hypothenemus hampei*) e o psíldeo associado ao *greening* dos citros (*Diaphorina citri*).

A Figura 9 apresenta a arquitetura do protótipo desenvolvido para captura de imagens, inferência de espécies e transmissão remota dos resultados de detecção. O sistema utiliza um modelo de detecção de objetos baseado na arquitetura *You Only Look Once* (YOLO)v11, treinado com uma base de dados anotada com apoio de um *pipeline* de rotulagem automática baseado na *Application Programming Interfaces* (API) de visão do Claude®. Essa abordagem permitiu acelerar significativamente a curadoria do conjunto de treinamento. A base de imagens foi composta a partir de repositórios públicos, como o iNaturalist, e de coletas automatizadas em buscadores, como Bing® e Google®, sendo posteriormente organizada e versionada na plataforma Roboflow.

A arquitetura geral da solução contempla a armadilha como unidade de captura e pré-processamento de imagens, e um *backend* desenvolvido em Node.js responsável pela orquestração dos eventos de detecção. A comunicação entre os dispositivos de campo e o *backend* é realizada por meio do protocolo MQTT, garantindo baixo consumo de banda e adequação a cenários com conectividade limitada. O acesso ao painel e às rotas de gerenciamento é protegido

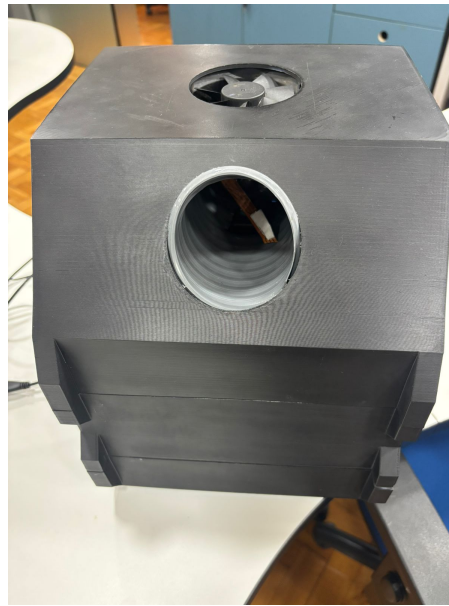


Figura 9: Protótipo da armadilha multipragas.

por autenticação baseada em *JSON Web Tokens* (JWT), assegurando a integridade e a confidencialidade dos dados coletados em campo. Os dados coletados pela armadilha multipragas são armazenados em um banco de dados de séries temporais (InfluxDB) e visualizados por meio de painéis interativos construídos na plataforma Grafana. O painel permite o acompanhamento em tempo real das detecções por espécie.

### 2.3.1 Integração da armadilha multipragas com a rede de acesso

A conectividade entre a aplicação de monitoramento da armadilha multipragas e a rede de acesso Brasil 6G foi estabelecida por meio da interface Wi-Fi do terminal UE, responsável por fornecer ao protótipo acesso à internet. Essa integração teve como propósito validar a arquitetura de comunicação proposta e avaliar a viabilidade de transmissão remota dos dados coletados em campo utilizando a infraestrutura da rede Brasil 6G.

Os testes foram realizados em ambiente laboratorial, empregando a armadilha, um terminal UE e um terminal BS pertencentes à rede de acesso Brasil 6G, sendo que apenas o terminal BS possuía conexão direta à internet, compartilhada com o terminal UE por meio do enlace estabelecido entre os dois equipamentos. Uma vez confirmada a conectividade, procedeu-se à realização dos experimentos de transmissão das variáveis monitoradas pelo dispositivo. Nesse processo, as informações capturadas pelos sensores são organizadas em pacotes pelo microcontrolador e encaminhadas à internet por meio da interface Wi-Fi disponibilizada pelo transceptor da rede Brasil 6G, sendo então repassadas a servidores e aplicações remotas, o que possibilita o acompanhamento das detecções em tempo quase real por meio de um *dashboard*.

A Figura 10 apresenta o ambiente experimental utilizado para validação da integração entre a aplicação de monitoramento multipragas e a rede de acesso. A Figura 10(a) mostra a armadilha inteligente, o terminal UE, que compartilha o acesso à internet à armadilha via interface Wi-Fi, e o *dashboard* de monitoramento. A Figura 10(b), por sua vez, mostra o terminal BS que provê a conectividade ao terminal UE.

Vale destacar que a visão geral do ambiente do teste de integração é a mesma apresentada na parte c) da Figura 7.



(a) Armadilha multipragas e terminal UE.



(b) Terminal BS que provê conectividade à UE.

Figura 10: Cenário experimental utilizado para validação da integração entre a aplicação de armadilha multipragas e a rede de acesso.

Como demonstração da integração, os dados coletados pela armadilha inteligente foram transmitidos à aplicação de visualização remota por meio da conectividade Wi-Fi disponibilizada pelo terminal UE da rede de acesso. As informações transmitidas incluíram os dados de detecção, associados à espécie identificada e ao nível de confiança da inferência. A publicação dos dados foi realizada por meio do protocolo MQTT, com as variáveis organizadas em tópicos específicos para consumo por aplicações remotas.

A Figura 11 apresenta o *dashboard* desenvolvido para acompanhamento dos dados recebidos, cuja interface permite visualizar as detecções realizadas pela armadilha e o estado operacional do sistema em tempo quase real. A recepção e a exibição bem-sucedidas dos dados confirmaram a capacidade da infraestrutura integrada de transportar informações do protótipo de monitoramento multipragas entre diferentes segmentos da rede.

Os resultados obtidos demonstraram que a integração da armadilha inteligente com a rede de acesso viabiliza a transmissão das variáveis coletadas pelo protótipo, mantendo o fluxo ponta a ponta entre sensoriamento e detecção embarcados, conectividade local via Wi-Fi, rede de acesso Brasil 6G e visualização remota. Essa validação evidencia a aplicabilidade da solução como caso de uso vertical no contexto das futuras redes 6G, especialmente em cenários de conectividade rural, agricultura de precisão e vigilância entomológica de pragas e vetores.

### 2.3.2 Conclusões e trabalhos futuros

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da integração entre a aplicação de monitoramento multipragas e a rede de acesso desenvolvida no contexto do Projeto Brasil 6G. Por meio dos experimentos realizados em ambiente laboratorial, foi possível validar o transporte remoto dos dados coletados pela armadilha por meio da rede de acesso, utilizando a conectividade Wi-Fi provida pelo transceptor para comunicação entre o protótipo e a infraestrutura de acesso. A integração permitiu a transmissão de variáveis ambientais, dados de detecção de espécies e informações operacionais do dispositivo, bem como sua disponibilização em um *dashboard* de monitoramento, possibilitando o acompanhamento das informações em tempo quase real.



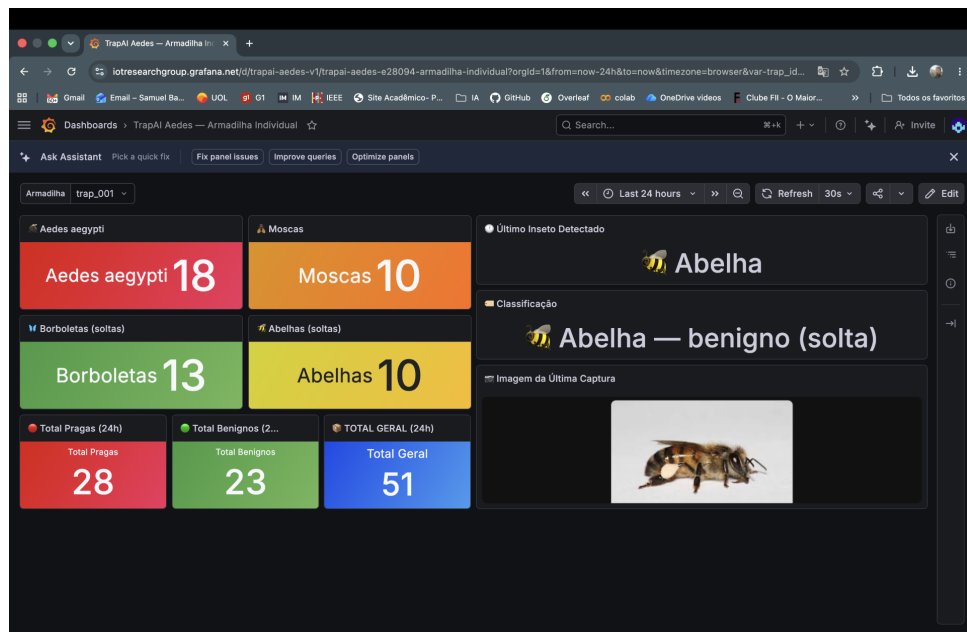


Figura 11: *Dashboard* da armadilha multipragas.

A solução foi integrada de forma transparente à aplicação, utilizando comunicação baseada em IP e o protocolo MQTT para publicação dos dados em tópicos específicos. Essa abordagem evidenciou a compatibilidade do protótipo com arquiteturas de rede baseadas em protocolos amplamente utilizados em aplicações de IoT, sem exigir alterações significativas na camada de *software* da aplicação. Os experimentos realizados representam uma etapa inicial para a utilização de armadilhas inteligentes conectadas a infraestruturas de comunicação sem fio, especialmente em cenários de agricultura de precisão, vigilância entomológica e conectividade rural. Além disso, a arquitetura proposta evidencia o potencial da integração entre visão computacional embarcada, conectividade sem fio e visualização remota para aplicações verticais alinhadas aos conceitos das futuras redes 6G. A possibilidade de transmitir informações coletadas em campo para aplicações remotas amplia a capacidade de acompanhamento de pragas e vetores, podendo contribuir para estratégias de manejo integrado, ações de controle fitossanitário e vigilância epidemiológica.

Como trabalhos futuros, pretende-se aprimorar o protótipo da armadilha, com foco na otimização do modelo de detecção para maior acurácia e menor latência de inferência, na miniaturização da eletrônica embarcada, na melhoria da eficiência energética e no desenvolvimento de um encapsulamento adequado para uso em ambientes externos. Adicionalmente, pretende-se ampliar o número de espécies suportadas pelo sistema de detecção, investigar estratégias de operação com menor consumo energético e realizar validações em condições reais de campo. Essas etapas permitirão avaliar o desempenho da solução em condições operacionais e avançar no desenvolvimento de uma plataforma mais robusta, escalável e adequada ao monitoramento remoto de pragas agrícolas e vetores de doenças.

## 2.4 Integração com controlador de cargas

A crescente digitalização de informações e adoção de sistemas embarcados tem impulsionado o uso de soluções baseadas em IoT. Vale destacar que IoT não se limita apenas ao monitoramento remoto de variáveis, mas também contempla a atuação sobre dispositivos, como o

acionamento, desligamento, ajuste ou controle de cargas elétricas, máquinas, motores, equipamentos auxiliares, dentre outros [19, 20]. A relevância da IoT evidencia-se pelo crescimento expressivo do número de dispositivos conectados, cuja quantidade é estimada em cerca de 40 bilhões até 2030 [21]. Esse número representa a ampla aplicação da tecnologia em diferentes setores, incluindo residências inteligentes, automação industrial, cidades inteligentes, saúde, agricultura, energia, transporte, monitoramento ambiental e infraestruturas críticas.

A importância desse tipo de solução torna-se ainda mais evidente em áreas remotas, rurais ou de difícil acesso. Nesses cenários, o deslocamento físico até o local de instalação pode representar elevado custo operacional, maior tempo de resposta, dificuldade de manutenção e dependência de equipes especializadas em campo. Ademais, aplicações de IoT podem contribuir diretamente para a automação de processos que anteriormente dependeriam de intervenção manual. Exemplos incluem o acionamento remoto de sistemas de irrigação, bombas d'água, iluminação, ventilação, cercas elétricas, equipamentos de monitoramento, sistemas de segurança e cargas auxiliares instaladas em propriedades rurais, estações remotas, torres de telecomunicações, laboratórios de campo ou pontos de infraestrutura distribuída. Na agricultura de precisão, por exemplo, sensores e atuadores conectados podem apoiar o uso eficiente de água, energia e insumos, permitindo decisões baseadas em dados e comandos remotos em tempo real ou quase real [22, 23].

Nesse contexto, a equipe do Inatel desenvolveu uma solução baseada em IoT para automação e controle remoto de cargas, permitindo o acionamento à distância de dispositivos elétricos. A solução foi concebida para controlar cargas em corrente alternada, tais como lâmpadas, pequenos motores, bombas e outros dispositivos compatíveis com os limites elétricos e operacionais do sistema de acionamento. Conforme mostra a Figura 12, o controlador de cargas desenvolvido é composto por uma unidade de processamento embarcada baseada em *Raspberry Pi*, um relé de acionamento, um contator para comutação da carga e uma fonte de alimentação. A unidade de processamento é responsável pelo gerenciamento lógico do sistema e pela execução da programação de controle, desenvolvida em *Python*. O relé atua como elemento intermediário de comando, acionando ou desacionando o contator. Por sua vez, o contator realiza a comutação da alimentação elétrica da carga conectada ao sistema. A fonte de alimentação fornece energia em corrente contínua para a operação da unidade de processamento.

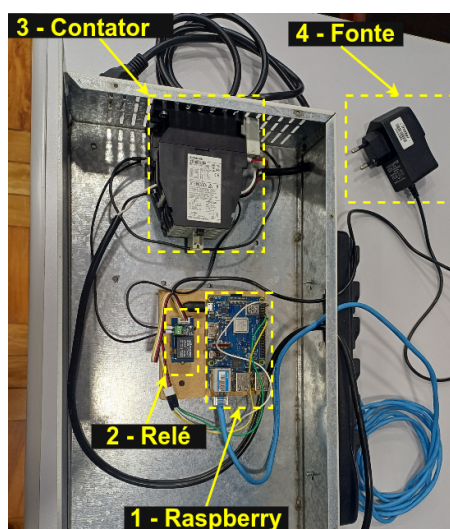


Figura 12: Controlador de cargas: visão dos módulos principais de *hardware*.

A arquitetura adotada permite separar a etapa de controle lógico da etapa de acionamento elétrico da carga. Essa separação é importante, pois possibilita que o sistema embarcado opere com baixa tensão, enquanto o acionamento da carga é realizado por meio de componentes apropriados para a comutação elétrica. Dessa forma, o controlador pode ser adaptado a diferentes tipos de aplicação, desde acionamentos simples, como iluminação, até cargas utilizadas em processos de apoio em ambientes rurais, como pequenos sistemas de bombeamento, ventilação, irrigação ou automação local.

A seguir estão apresentados detalhes da integração e testes do controlador de cargas com a rede de acesso Brasil 6G.

#### 2.4.1 Integração do controlador de cargas com a rede de acesso

O controlador de cargas desenvolvido prevê sua integração com a rede de comunicação por meio de conexão Wi-Fi ou Ethernet cabeada, o que aumenta a flexibilidade de uso do controlador, permitindo sua integração tanto em ambientes com infraestrutura de rede local quanto em cenários em que a conectividade sem fio seja mais adequada. Em aplicações rurais, por exemplo, o dispositivo pode ser utilizado como parte de uma infraestrutura de automação associada a sistemas de conectividade remota, permitindo o controle de cargas instaladas em pontos afastados da sede da propriedade, de estações de monitoramento ou de unidades de operação.

A Figura 13 apresenta o *rack* de dispositivos de IoT, uma estrutura na qual estão instalados diferentes equipamentos integrados ao terminal UE da rede de acesso, entre os quais se destaca o controlador de cargas. Esses dispositivos podem ser monitorados ou controlados remotamente via internet, graças ao enlace de comunicação estabelecido entre o terminal UE e o terminal BS. Por meio desse enlace, o terminal BS provê conectividade ao terminal UE, de forma semelhante aos testes de integração descritos anteriormente neste relatório. A conectividade disponibilizada pelo terminal UE pode, então, ser compartilhada com os dispositivos do *rack* por meio de rede cabeada ou Wi-Fi. Além do controlador de cargas mencionado, o *rack* contempla dispositivos comerciais, incluindo estação meteorológica, estação de solo, sensores e atuadores Wi-Fi, bem como sensores e atuadores LoRa. O monitoramento remoto desses diferentes dispositivos é realizado por meio de um *dashboard* principal, desenvolvido utilizando a plataforma *web ThingsBoard* [24].

A demonstração da integração do controlador de cargas com a rede de acesso foi realizada em duas etapas. A primeira envolveu a integração lógica do controlador com o *dashboard* principal da rede de acesso. O controlador possui um cliente MQTT que foi devidamente configurado para receber comandos originados do referido *dashboard*. Esta integração foi previamente validada, fazendo uso de internet disponível no laboratório. Em seguida, deu-se início à segunda etapa de integração, que envolveu conectar o controlador à rede do terminal UE e receber comandos do *dashboard* a partir da conexão com a internet provida pelo terminal BS da rede de acesso. Esta segunda etapa foi concluída com sucesso, com o envio de comandos de acionamento a partir do *dashboard*. A Figura 14 apresenta uma visão do *dashboard* principal, no qual é possível observar, em destaque, o botão de controle do estado do controlador de cargas. Foram realizados testes bem-sucedidos considerando tanto a integração do controlador com o terminal UE via rede cabeada quanto via Wi-Fi, bem como o envio de comandos para acionar e desligar cargas elétricas conectadas ao controlador. A visão geral do ambiente do teste de integração é o mesmo apresentado na parte c) da Figura 7.



Figura 13: Controlador de cargas integrado ao *rack* de dispositivos de IoT.

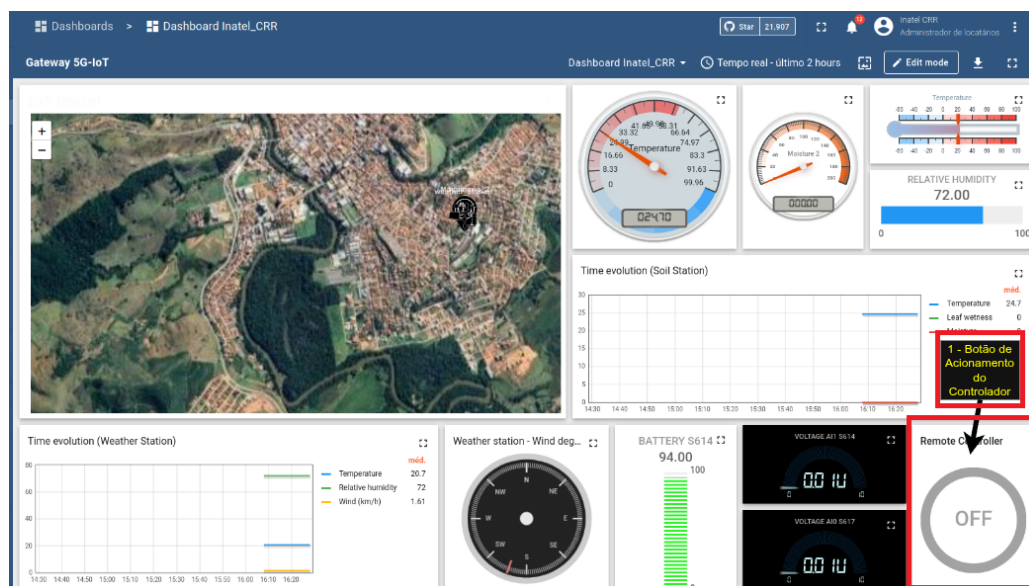


Figura 14: *Dashboard* principal.

## 2.4.2 Conclusões e trabalhos futuros

O desenvolvimento do controlador de cargas amplia o conjunto de aplicações experimentais disponíveis na plataforma, permitindo validar cenários de uso relacionados à automação remota e ao controle de dispositivos em campo. Ao combinar conectividade, processamento embarcado

e acionamento elétrico, a solução oferece uma base flexível para diferentes aplicações de pesquisa, demonstração tecnológica e apoio operacional em ambientes nos quais o controle remoto pode reduzir deslocamentos, otimizar processos e aumentar a eficiência das atividades realizadas. Os testes de integração evidenciaram a compatibilidade de operação do dispositivo com a rede de acesso, considerando sua integração tanto por rede cabeada quanto por Wi-Fi. Como trabalhos futuros, considera-se a realização de testes de acionamentos de diferentes cargas.



### 3 Integração da rede de acesso com antenas inovadoras

A integração da rede de acesso com novas aplicações e tecnologias contemplou também testes com antenas. Foram consideradas antenas com abordagens inovadoras como antenas flexíveis e planares, cuja integração e resultados de testes estão apresentados nas Seções 3.1 e 3.2, respectivamente.

#### 3.1 Integração com antenas flexíveis para faixa de UHF

O projeto Brasil 6G contemplou o desenvolvimento e avaliação de tecnologias complementares capazes de ampliar as possibilidades de uso da rede de acesso, reduzir custos de implementação e facilitar sua integração em diferentes cenários de uso. Dentre as tecnologias consideradas, destacam-se as antenas flexíveis, especialmente aquelas fabricadas sobre substratos de baixo custo, como papel ou materiais similares.

A utilização de antenas flexíveis pode trazer vantagens relevantes para sistemas de rádio, principalmente em aplicações em que custo, peso, facilidade de instalação, adaptação mecânica e integração em superfícies não convencionais sejam fatores importantes. Embora essas antenas normalmente apresentem ganho inferior ao de antenas comerciais convencionais, elas podem ser suficientes para determinados alcances, ambientes, como laboratoriais, e condições de operação. Dessa forma, sua validação experimental é importante para identificar seu desempenho e impactos na estabilidade e desempenho da comunicação da rede de acesso.

Nesta seção, o termo antena comercial será utilizado para se referir à antena padrão empregada originalmente nos protótipos dos terminais que compõem a rede de acesso Brasil 6G. Essa antena é utilizada como referência de comparação em relação à antena flexível desenvolvida a ser avaliada. A Tabela 1 apresenta suas principais características técnicas da antena comercial de referência.

Tabela 1: Principais características da antena comercial utilizada como referência.

| Parâmetro           | Valor / Característica          |
|---------------------|---------------------------------|
| Modelo              | UHF log-periódica LAP 4/5-50/16 |
| Faixa de frequência | 470 a 862 MHz                   |
| Impedância          | 50 ohms                         |
| VSWR                | Menor ou igual a 1,2            |
| Ganho               | 8,7 a 9,5 dBi                   |
| Polarização         | Horizontal ou vertical          |
| Peso                | Aproximadamente 6,5 kg          |
| Dimensões           | 450 mm x 1220 mm x 130 mm       |

A antena flexível desenvolvida apresenta diferenciais competitivos fundamentais para aplicações de monitoramento em espaços confinados, destacando-se pelos seguintes aspectos:

- Tecnologia de fabricação: o processo baseia-se em técnicas de prototipagem rápida envolvendo etapas como (corte de máscara e deposição manual de tinta de prata), permitindo a fabricação de baixo custo, sustentável e sem a necessidade de processos fotolitográficos complexos;

- Flexibilidade e conformidade: o uso do papel como substrato dielétrico confere ao dispositivo uma elevada flexibilidade mecânica, permitindo sua instalação em superfícies curvas sem comprometer significativamente a estabilidade de sua frequência de ressonância;
- Robustez ambiental: a integração de uma camada impermeabilizante confere proteção contra a umidade, tornando a antena resiliente para operação em ambientes com presença de vapor ou gotas de água, conforme validado experimentalmente;
- Fator de forma e integração: com um *design* otimizado para redução de volumetria, a antena oferece uma solução menos intrusiva do que as antenas log-periódicas comerciais, facilitando a integração em sistemas compactos de monitoramento sem sacrificar a eficácia radiante necessária para curtas distâncias;
- Desempenho eletromagnético: a estrutura opera com polarização linear e apresenta um padrão de radiação predominantemente omnidirecional, característica essencial para garantir uma cobertura uniforme e confiável em ambientes em que a orientação do dispositivo pode variar.

Na Tabela 2 encontram-se as principais especificações da antena flexível desenvolvida depositando tinta de prata sobre um substrato de papel *kraft*. Para definir o formato da antena foram empregadas simulações numéricas no *software* comercial CST Studio® até atingir a faixa de frequência de operação desejada, conforme melhor detalhado no relatório da atividade 4.2 [1].

Tabela 2: Especificações técnicas e características de desempenho da antena flexível [1].

| Parâmetro              | Valor / Característica                     |
|------------------------|--------------------------------------------|
| Modelo                 | Antena de Papel Flexível com Estrutura CPW |
| Faixa de frequência    | 490 a 610 MHz                              |
| Impedância             | 50 ohms                                    |
| VSWR                   | Menor que 2,0 (na banda de operação)       |
| Frequência ressonância | 494 MHz (na frequência de ressonância)     |
| Ganho                  | 2,38 dBi (na frequência de ressonância)    |
| Polarização            | Linear                                     |
| Peso                   | Inferior a 50 g (estimado)                 |
| Dimensões              | 340 mm x 210 mm x 0.1 mm                   |

Os testes de integração executados visam comprovar que as antenas flexíveis sobre substratos de papel são funcionais e estabelecer uma análise comparativa com as antenas comerciais utilizadas nos protótipos dos transceptores da rede de acesso. Foram realizadas análises em relação ao impacto em parâmetros operacionais da rede. Mais especificamente, foram avaliados parâmetros associados ao enlace de *uplink* da comunicação entre um terminal UE e a BS contemplando a taxa de comunicação, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) de recepção na BS, taxa de codificação e modulação utilizada pelo transceptor durante a comunicação, a taxa de erro de bit ou *Bit Error Rate* (BER), e a qualidade do sinal recebido baseado no *Error Vector Magnitude* (EVM). A seguir, estão apresentados maiores detalhes sobre os testes de integração da antena flexível com a rede de acesso, assim como os resultados alcançados.

### 3.1.1 Descrição do cenário de integração e teste

O experimento de integração e teste da antena flexível foi realizado em um ambiente interno amplo, utilizando dois transceptores da rede de acesso Brasil 6G, um configurado para operar como terminal BS e um para operar como terminal UE. Estes operam em modo *Frequency Division Multiplexing* (FDD) e com arquitetura *Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO)  $2 \times 2$ . O sistema foi testado com frequência central em 680 MHz para o enlace de *downlink* e de 560 MHz para o enlace de *uplink*. A isolação entre as bandas de transmissão e recepção foi realizada por meio de duplexadores, permitindo que cada estação transmitisse e recebesse simultaneamente em frequências e com certo grau de isolação entre o sinal transmitido e recebido. O duplexador utilizado proporciona isolação da ordem de 90 dB entre as bandas de *uplink* e *downlink*. Como as antenas flexíveis foram projetadas para a faixa de *uplink*, em torno de 560 MHz, os testes foram realizados com foco nesse enlace, ou seja, utilizando a antena flexível para a transmissão de sinal do terminal UE para a BS.

O diagrama do *setup* empregado para a realização dos testes com as antenas de referência e com a antena flexível estão apresentados nas Figuras 15 e 16, respectivamente. O transceptor de cada terminal, BS e UE, são formados principalmente por um computador e por um *front-end* de RF ou *Software Defined Radio* (SDR). Adicionalmente aos transceptores, foram utilizados filtros seletivos de *downlink* e *uplink*, ambos com largura de banda de 24 MHz e com frequência central, respectivamente, em 680 e 560 MHz. Esses filtros foram empregados para limitar a banda de operação e reduzir componentes indesejadas fora da faixa de interesse. Além dos filtros seletivos, foram utilizados duplexadores nos dois terminais, BS e UE. Os duplexadores permitiram a operação em modo FDD, realizando a separação e isolação entre os enlaces de transmissão e recepção de cada terminal. No testes de avaliação da antena flexível como transmissora para enlace de *uplink*, conforme mostra a 16, o duplexador e filtro foi utilizado para isolar a etapa de recepção de sinais no terminal UE.

O *setup* de teste utilizado para testes da antena comercial de referência está ilustrado na Figura 15. Nesse cenário, foram empregadas apenas antenas comerciais tanto na BS, conforme Figura 15a, quanto no UE, conforme Figura 15b, nas funções de transmissão e recepção. Assim, a BS e o UE operaram com transceptores, filtros, duplexadores e antenas comerciais, representando a configuração original dos terminais da rede de acesso. Essa configuração foi adotada como referência para a comparação de desempenho com o cenário de teste.

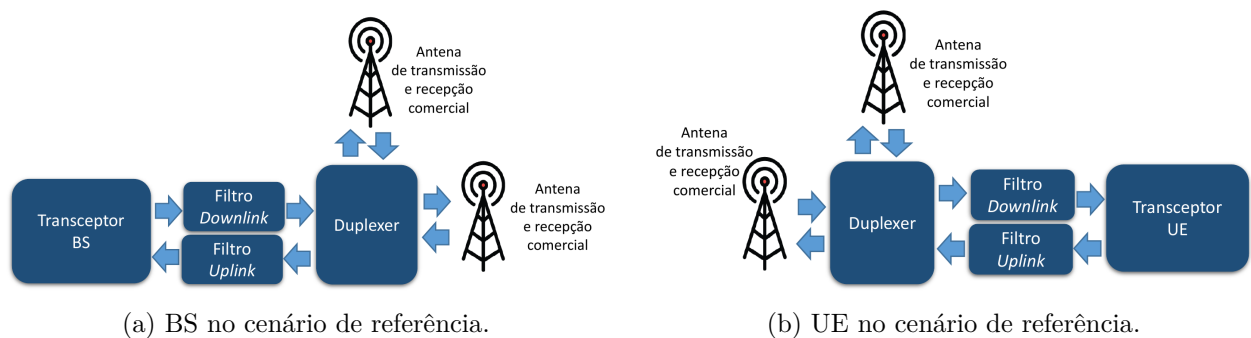


Figura 15: *Setup* de referência para o teste da antena flexível.

O *setup* de teste utilizado para avaliação das antenas flexíveis está mostrado na Figura 16. Nesse cenário, manteve-se a mesma estrutura geral do cenário de referência, incluindo os trans-

ceptores, filtros, duplexadores e antenas comerciais de recepção. A principal modificação ocorreu no UE, em que as antenas comerciais de transmissão no enlace de *uplink* foram substituídas pelas antenas flexíveis, correspondentes ao protótipo sob teste. Essas antenas foram conectadas diretamente às saídas da plataforma SDR do UE, permitindo avaliar especificamente seu desempenho na transmissão. Vale destacar também que, no cenário de teste os filtros e duplexador foram utilizados apenas na cadeia de recepção do terminal UE, já que o duplexador possui conexão para apenas 2 antenas.

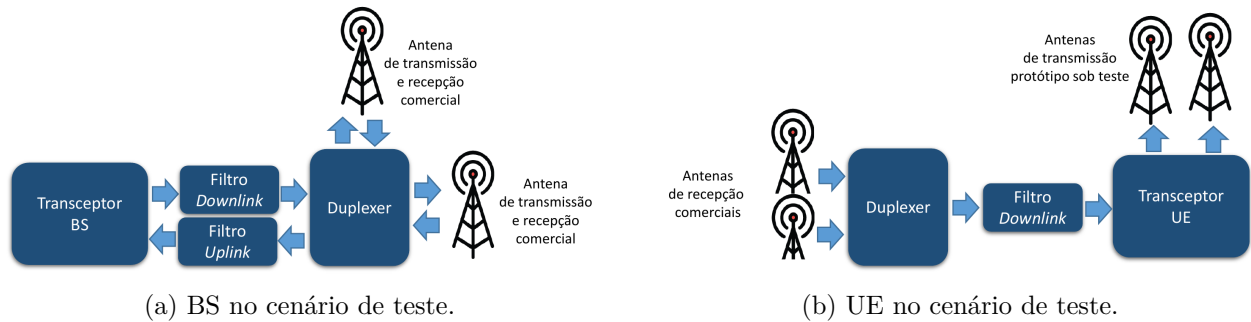
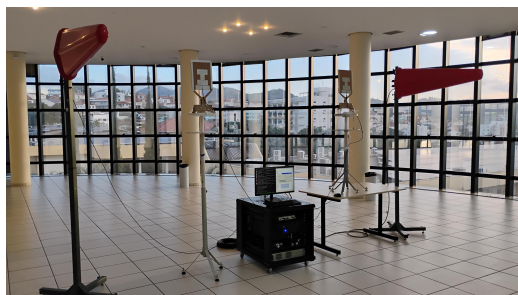


Figura 16: *Setup* de teste da antena flexível.

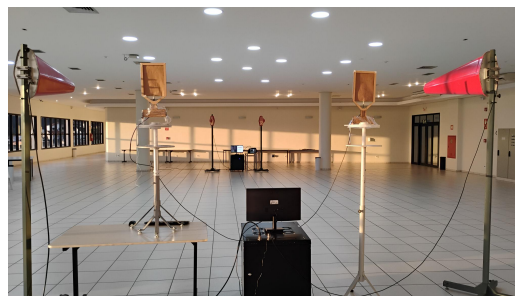
Durante os testes, as antenas de transmissão e recepção associadas aos terminais BS e UE foram posicionadas aproximadamente a 14 m de distância entre si. Essa separação foi mantida em ambos os testes para permitir a comparação entre os cenários com antenas comerciais e antenas flexíveis em uma condição controlada de propagação em ambiente *indoor*. A Figura 17 apresenta o ambiente utilizado para a realização dos testes.



(a) Posicionamento das antenas flexíveis e comerciais no terminal UE.



(b) Posicionamento das antenas comerciais no terminal BS.



(c) Visão geral do ambiente de teste.

Figura 17: Cenário experimental utilizado para avaliação das antenas comerciais e flexíveis.

Na composição é possível observar as antenas comerciais, identificadas visualmente pelas estruturas vermelhas, as antenas flexíveis em substrato de papel, sobretudo nas Figuras 17a e 17c. É possível visualizar em tais figuras os suportes de antenas utilizados, o *rack* que compõe cada terminal da rede de acesso.

A seguir, estão apresentados maiores detalhes sobre configurações complementares e condições dos testes realizados.

### 3.1.2 Condições de testes, configuração de potência e medições no receptor

Para a avaliação da transmissão das antenas flexíveis no enlace *uplink*, foram consideradas duas condições de teste em função de duas potências entregues pelo transceptor do terminal UE à cada uma de suas antenas: aproximadamente  $-10$  dBm, conforme a medição da *Power Spectrum Density* (PSD) apresentada na Figura 18, e aproximadamente  $-20$  dBm. Ressalta-se que a rede de acesso opera com MIMO e que as duas antenas de transmissão foram alimentadas com a mesma potência.

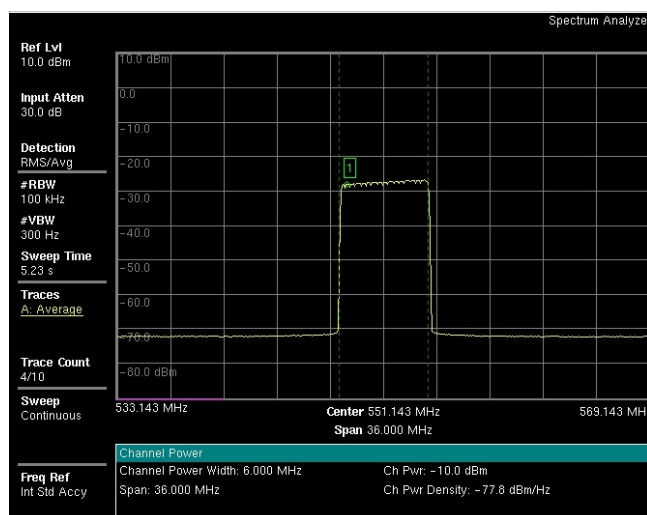


Figura 18: PSD do sinal entregue à antena transmissora, indicando potência igual a  $-10$  dBm.

Para cada uma das duas potências de transmissão de *uplink* foram consideradas duas condições de teste: a primeira condição com antena transmissora do terminal UE sendo a antena comercial e na segunda condição sendo a antena flexível. Em todos os testes, a potência de recepção foi medida no terminal BS, que utiliza a antena comercial de referência. A Tabela 3 mostra um resumo das medidas obtidas nestes cenários e condições de teste que consideram o enlace de *uplink*, as diferentes potências e antenas.

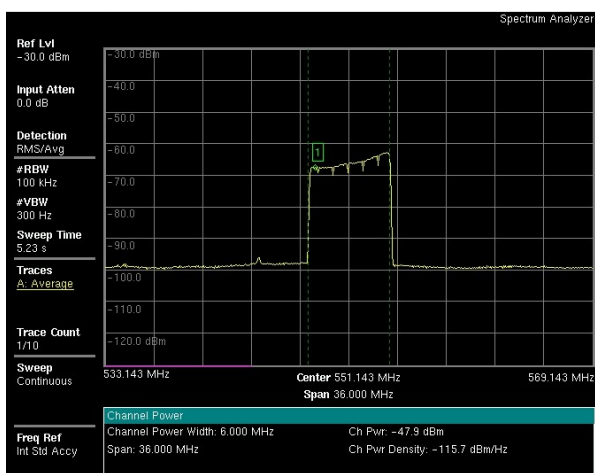
Conforme mostra a Tabela 3, para a potência de transmissão de  $-10$  dBm, a potência recebida na antena da BS foi de  $-47,9$  dBm, quando utilizada como antena de transmissão a antena comercial, e foi de  $-50,1$  dBm quando utilizada como antena de transmissão a antena flexível. O sinal de recepção para estas duas condições estão mostrados nas Figuras 19(a) e Figura 19(b) respectivamente.

Para a condição de teste com potência de transmissão de  $-20$  dBm, conforme mostra a Tabela 3, a potência recebida na antena da BS foi de  $-57,7$  dBm, quando utilizada como antena de transmissão a antena comercial, e foi de  $-60,5$  dBm quando utilizada como antena de transmissão a antena flexível. O sinal de recepção para estas duas condições estão mostrados respectivamente nas Figuras 19(c) e Figura 19(d).

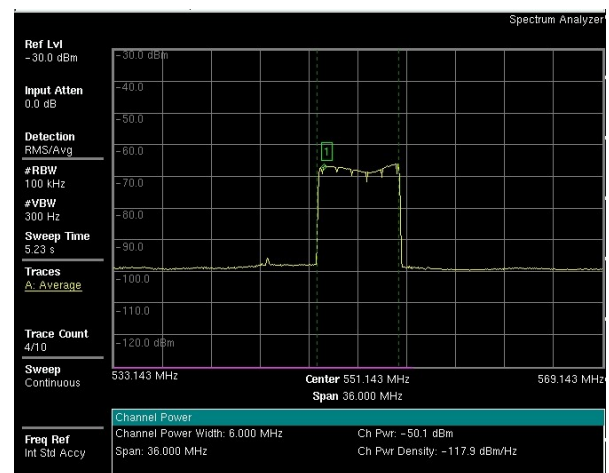


Tabela 3: Condições de teste da antena flexível e medidas para o enlace de *uplink*.

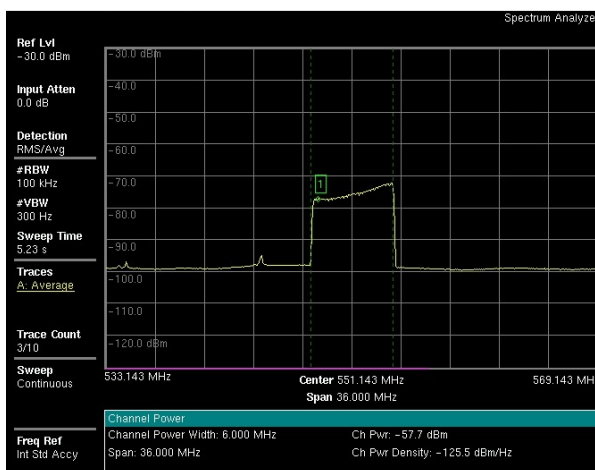
| Potência entregue à cada antena de transmissão do UE | Tipo da antena de transmissão do UE | Potência de recepção na antena da BS |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| -10 dBm                                              | Comercial (referência)              | -47,9 dBm                            |
|                                                      | Flexível (em teste)                 | -50,1 dBm                            |
| -20 dBm                                              | Comercial (referência)              | -57,7 dBm                            |
|                                                      | Flexível (em teste)                 | -60,5 dBm                            |



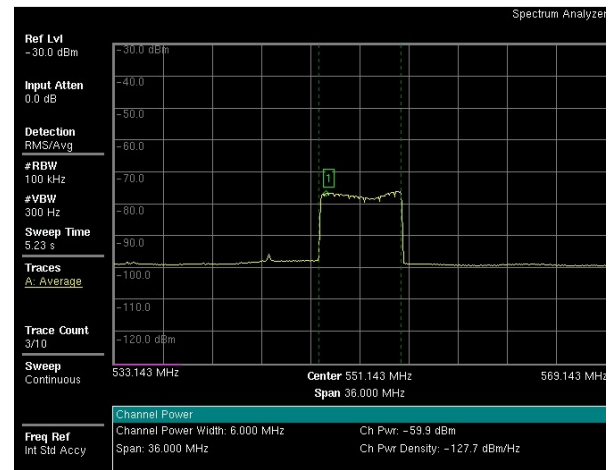
(a) Sinal recebido quando utilizada a antena comercial na transmissão com potência de -10 dBm.



(b) Sinal recebido quando utilizada a antena flexível na transmissão com potência de -10 dBm.



(c) Sinal recebido quando utilizada a antena comercial na transmissão com potência de -20 dBm.



(d) Sinal recebido quando utilizada a antena flexível na transmissão com potência de -20 dBm.

Figura 19: Sinal recebido para diferentes antenas utilizadas na transmissão e potências entregues às antenas.

Os resultados mostram que, para as duas condições avaliadas, a antena flexível apresentou

potência recebida inferior à obtida com a antena comercial. Essa diferença é esperada, uma vez que a antena comercial utilizada como referência possui maior ganho nominal. Ainda assim, os níveis de potência recebida com a antena flexível são suficientes para sustentar a comunicação, reforçando seu potencial como alternativa complementar em aplicações que demandam integração com menor espaço físico, como ambientes laboratoriais, baixo custo e adaptação mecânica.

### 3.1.3 Análise de parâmetros associados ao enlace de comunicação da rede de acesso

A fim de avaliar o desempenho e impacto do uso da antena flexível na rede de acesso, foram realizados testes e análises em relação ao enlace de comunicação. Estes testes foram realizados considerando o mesmo ambiente, cenário e condições de testes descritos nas seções anteriores, Seções 3.1.1 e 3.1.2, ou seja, testes no enlace de *uplink*, considerando duas potências distintas entregues às antenas de transmissão, ora -10 dBm, ora -20 dBm, e medidas com a utilização dos tipos de antena de transmissão em avaliação: o modelo comercial de referência e a antena flexível.

Para a geração de tráfego de dados na rede de acesso foi utilizada a ferramenta **iperf3**, amplamente empregada em testes de desempenho de redes de comunicação. Essa ferramenta permite gerar fluxos de tráfego controlados e medir parâmetros como vazão, estabilidade da comunicação e comportamento da transmissão sob diferentes protocolos. Neste trabalho, foram considerados testes com a ferramenta **iperf3** gerando tráfego de dados com protocolos *Transmission Control Protocol* (TCP). Os resultados instantâneos gerados pela ferramenta foram utilizados em análises gráficas, que serão apresentadas nas seções seguintes.

Para a comparação de desempenho da rede de acesso com as duas antenas em análise, antena comercial de referência e antena flexível em teste, foram analisados os principais parâmetros de desempenho do enlace de comunicação, incluindo taxa de transmissão, SNR, BER, EVM, modulação e taxa de codificação. Esses parâmetros permitem avaliar não apenas a vazão obtida, mas também indicadores associados à qualidade e à robustez da comunicação. Dessa forma, a análise conjunta dessas métricas possibilita verificar como cada configuração de antena influencia o comportamento do sistema e sua capacidade efetiva de transmissão.

Com base nessa metodologia, os resultados são apresentados e discutidos considerando as potências de -10 dBm e -20 dBm entregues às antenas transmissoras. Em cada caso, o desempenho obtido com a antena comercial é utilizado como referência para comparação com o desempenho das antenas flexíveis em substrato de papel.

#### 3.1.4 Testes de *uplink* considerando potência de transmissão de -10 dBm e protocolo TCP

Os resultados dos testes considerando o enlace de *uplink* e potência de -10 dBm entregue a cada uma das antenas transmissoras, comercial e flexível, estão apresentados em forma gráfica na Figura 20. Esta figura mostra a evolução temporal dos parâmetros avaliados. Os parâmetros mensurados e apresentados em tal figura são: taxa útil de comunicação ("Taxa PHY na BS"), valor de SNR ("SNR NMSE"), taxa de codificação ("*Code rate*"), modulação, BER e EVM. Para esse caso, foi analisada uma janela de aproximadamente 53 s, na qual cada ponto de medição corresponde a cerca de 1 s de comunicação. A Tabela 4 resume os valores médios e as variâncias dos parâmetros avaliados para as configurações com antena comercial e antena flexível durante a mesma janela de teste, consolidando os resultados apresentados de forma gráfica na Figura 20.

Pela Figura 20, de forma geral, observa-se que as duas antenas apresentaram comportamento estável ao longo da janela analisada. Os parâmetros avaliados mantiveram-se praticamente constantes durante a comunicação, o que evidencia estabilidade no funcionamento do sistema com ambas as antenas. As diferenças observadas entre a antena comercial e a antena flexível são esperadas, uma vez que as antenas não possuem as mesmas características de ganho e eficiência de irradiação.

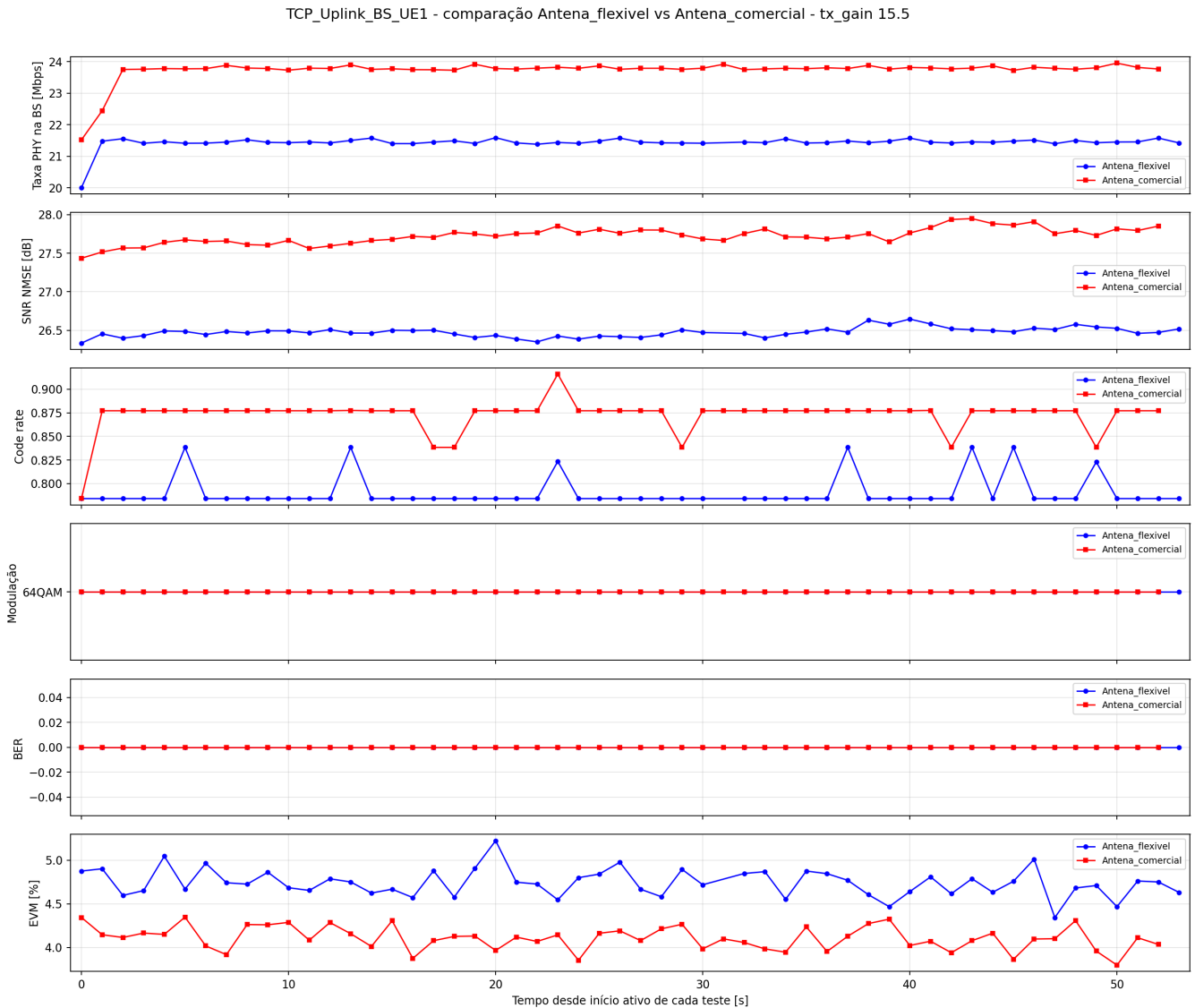


Figura 20: Evolução temporal dos parâmetros dos testes de *uplink* para potência de  $-10$  dBm entregue a cada uma das antenas transmissoras e protocolo TCP.

Analisando a Tabela 4, verifica-se, em relação à taxa de transmissão, que a antena comercial apresentou valor médio de aproximadamente 23,73 Mbps, enquanto a antena flexível alcançou aproximadamente 21,43 Mbps. Essa diferença está associada principalmente aos valores de SNR, influenciados pelas características das antenas avaliadas como o ganho, e que impactam diretamente na modulação e taxa de codificação utilizada no enlace que é selecionada pelo sistema em função do valor de SNR. Quanto à SNR, ambos os casos apresentaram comportamento estável ao longo do teste. A antena comercial alcançou valor médio de aproximadamente

27,72 dB, enquanto a antena flexível apresentou média de 26,48 dB. Embora a antena comercial tenha obtido SNR ligeiramente superior, o valor registrado com a antena flexível permaneceu suficiente para assegurar a estabilidade da comunicação. Ambas as configurações operaram com modulação 64-*Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) e BER igual a zero durante toda a janela analisada, indicando que não foram observados erros de bit no período avaliado. A taxa de codificação média foi de aproximadamente 0,873 para a antena comercial e 0,791 para a antena flexível, o que contribui para explicar a maior taxa obtida no cenário de referência. O EVM também permaneceu estável, com valor médio de aproximadamente 4,11 para a antena comercial e 4,74 para a antena flexível. Apesar do valor ligeiramente maior observado com a antena flexível, os resultados dessa métrica permaneceram baixos e estáveis ao longo da comunicação.

Nesse cenário, a antena flexível manteve comunicação estável, com BER nula e parâmetros consistentes durante toda a janela de teste, confirmando sua viabilidade na condição operacional avaliada.

Tabela 4: Comparação dos resultados dos testes de *uplink* considerando protocolo potência de  $-10$  dBm entregue às antenas transmissoras e protocolo TCP.

| Parâmetro | Antena comercial |           | Antena flexível |           |
|-----------|------------------|-----------|-----------------|-----------|
|           | Média            | Variância | Média           | Variância |
| Taxa      | 23,729024        | 0,132625  | 21,432307       | 0,042788  |
| SNR       | 27,724962        | 0,011028  | 26,476962       | 0,003803  |
| Code rate | 0,872557         | 0,000318  | 0,790703        | 0,000298  |
| Modulação | 64QAM            | –         | 64QAM           | –         |
| BER       | 0                | 0         | 0               | 0         |
| EVM       | 4,106132         | 0,018387  | 4,740679        | 0,025404  |

### 3.1.5 Testes de *uplink* considerando potência de transmissão de $-20$ dBm e protocolo TCP

Os resultados dos testes considerando o enlace de *uplink* e potência de  $-20$  dBm entregue a cada uma das antenas transmissoras, comercial e flexível, estão apresentados em forma gráfica na Figura 21. Esta figura mostra a evolução temporal dos parâmetros avaliados. Os parâmetros analisados são os mesmos do teste anterior: taxa útil de comunicação, indicada como “Taxa PHY na BS”, valor de SNR, indicado como “SNR NMSE”, taxa de codificação, indicada como “*code rate*”, modulação, BER e EVM. Para esse caso, foi analisada uma janela de aproximadamente 39 s, na qual cada ponto de medição corresponde a cerca de 1 s de comunicação. A Tabela 5 resume os valores médios e as variâncias dos parâmetros avaliados para as configurações com antena comercial e antena flexível durante a mesma janela de teste, consolidando os resultados apresentados de forma gráfica na Figura 21.

De forma geral, observa-se, a partir da Tabela 5 e Figura 21, que, com a redução da potência entregue às antenas transmissoras, as diferenças entre as antenas tornaram-se mais evidentes. Essa condição reduz a margem disponível para a comunicação e torna o sistema mais sensível às diferenças de ganho, eficiência de irradiação e adaptação entre as antenas avaliadas. Ainda assim, os parâmetros permaneceram estáveis ao longo da janela analisada, sem variações bruscas que indicassem instabilidade na comunicação.

No caso da antena flexível, a redução da potência de transmissão resultou em uma condição menos favorável, impactada principalmente na menor SNR e na adaptação dos parâmetros de transmissão pelo sistema. Mesmo nessa condição, a comunicação foi mantida durante todo o intervalo avaliado, sem ocorrência de erros de bit. Esse comportamento indica que a antena flexível é capaz de sustentar a comunicação de forma estável em uma condição mais restritiva de operação.

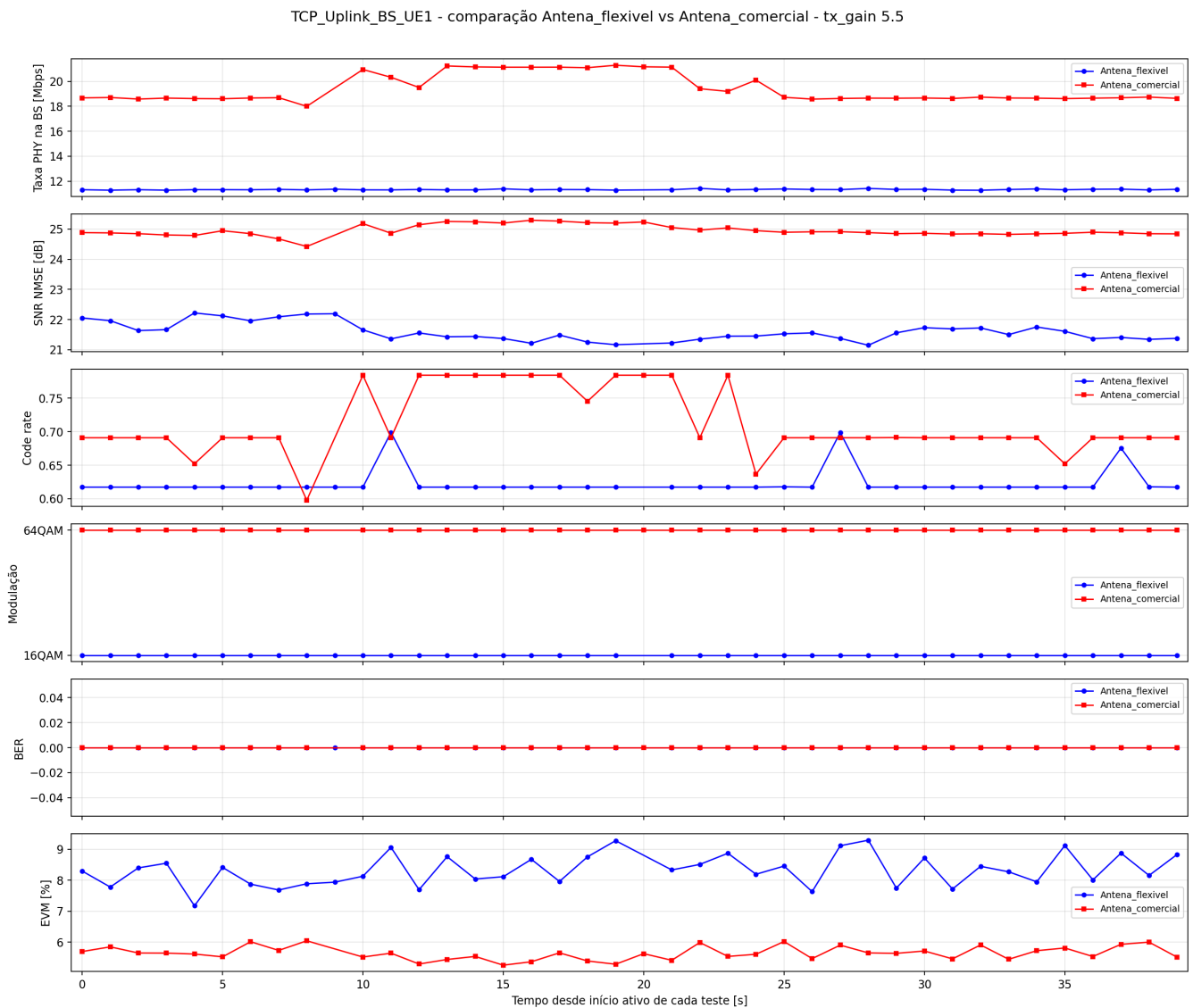


Figura 21: Evolução temporal dos parâmetros dos testes de *uplink* para potência de  $-20$  dBm entregue a cada uma das antenas transmissoras e protocolo TCP.

Analisando a Tabela 5, verifica-se que a antena comercial apresentou taxa média de aproximadamente 19,42 Mbps, enquanto a antena flexível alcançou aproximadamente 11,33 Mbps. Essa diferença está associada principalmente à menor SNR observada com a antena flexível e à consequente adaptação dos parâmetros de transmissão pelo sistema. A antena comercial operou com modulação 64-QAM, enquanto a antena flexível operou com modulação 16-QAM. Como a modulação 16-QAM transporta menos bits por símbolo do que a modulação 64-QAM, a capacidade efetiva de transmissão foi reduzida no cenário com antena flexível. Dessa forma,



a diferença de taxa está relacionada à adaptação do sistema a uma condição menos favorável de comunicação utilizando a antena flexível. A SNR média foi de aproximadamente 24,95 dB para a antena comercial e 21,60 dB para a antena flexível. Essa diferença de aproximadamente 3,35 dB indica que a configuração com antena flexível operou com menor margem nessa condição de potência de transmissão. A taxa de codificação média foi de aproximadamente 0,713 para a antena comercial e 0,623 para a antena flexível. Esse comportamento, combinado com a mudança de modulação de 64-QAM para 16-QAM, contribui diretamente para a menor taxa observada no caso da antena flexível. Apesar disso, a BER permaneceu igual a zero durante toda a janela analisada para ambas as antenas, indicando que não foram observados erros de bit no período avaliado. O EVM também apresentou comportamento estável ao longo do teste, com valor médio de aproximadamente 5,64 para a antena comercial e 8,32 para a antena flexível. O maior EVM observado com a antena flexível é coerente com a menor SNR e com a condição menos favorável de comunicação. Ainda assim, esse parâmetro permaneceu estável durante toda a janela de teste.

Nesse cenário, a antena comercial apresentou desempenho superior nos parâmetros analisados. Mesmo assim, a antena flexível manteve comunicação funcional, com BER nula e estabilidade temporal dos parâmetros avaliados. Esse comportamento confirma sua viabilidade mesmo em uma condição mais restritiva de potência de transmissão.

Tabela 5: Comparação dos resultados dos testes de *uplink* considerando potência de  $-20$  dBm entregue às antenas transmissoras e protocolo TCP.

| Parâmetro | Antena comercial |           | Antena flexível |           |
|-----------|------------------|-----------|-----------------|-----------|
|           | Média            | Variância | Média           | Variância |
| Taxa      | 19,416481        | 1,225334  | 11,332797       | 0,001305  |
| SNR       | 24,954282        | 0,035115  | 21,595462       | 0,091934  |
| Code rate | 0,712869         | 0,002481  | 0,623069        | 0,000405  |
| Modulação | 64-QAM           | –         | 16-QAM          | –         |
| BER       | 0                | 0         | 0               | 0         |
| EVM       | 5,640821         | 0,047772  | 8,322103        | 0,263872  |

### 3.1.6 Discussão geral e conclusão

A análise dos resultados mostra que as antenas flexíveis em substrato de papel foram capazes de estabelecer e sustentar comunicação no *uplink* dos transceptores da rede de acesso Brasil 6G. De forma geral, para a condição com potência de  $-10$  dBm entregue a cada uma das antenas transmissoras, os resultados foram favoráveis. Nesse caso, a antena flexível apresentou desempenho praticamente equivalente ao da antena comercial, mantendo taxa, SNR, modulação, BER e EVM em níveis muito próximos.

Ao reduzir a potência entregue às antenas transmissoras para  $-20$  dBm, as diferenças entre as antenas tornaram-se mais evidentes. Nessa condição, observou-se maior separação entre os valores de SNR, com diferença de aproximadamente 3 dB em favor da antena comercial. Além disso, nos cenários com menor margem de comunicação, a antena comercial manteve operação com modulação 64-QAM, enquanto a antena flexível passou a operar com 16-QAM. Esse comportamento resultou em menor taxa de comunicação quando utilizada a antena flexível, indicando que a redução do ganho de transmissão e consequentemente da SNR de recepção impacta de forma mais significativa sua capacidade do enlace.

Mesmo assim, os resultados permaneceram favoráveis do ponto de vista funcional. A antena flexível manteve comunicação estável durante as janelas analisadas, com BER nula e sem falhas severas de comunicação. Embora a vazão obtida tenha sido inferior à da antena comercial nas condições mais restritivas, os principais parâmetros avaliados indicaram estabilidade suficiente para sustentar a comunicação no *uplink*.

De forma geral, os resultados indicam que, embora a antena flexível tenha apresentado desempenho inferior ao da antena comercial, suas dimensões reduzidas e seu menor custo tornam sua utilização tecnicamente promissora. As antenas flexíveis demonstraram viabilidade funcional como tecnologia complementar aos transceptores da rede de acesso Brasil 6G. Assim, conclui-se que as antenas flexíveis avaliadas são capazes de operar no *uplink* mantendo comunicação estável nas condições testadas, constituindo uma alternativa promissora para aplicações em que sejam desejáveis soluções mais leves, flexíveis, integráveis ao equipamento e com potencial de menor custo de implementação.

### 3.2 Integração com antenas planares para faixa de UHF

No âmbito do desenvolvimento do transceptor da rede de acesso Brasil 6G, a antena constitui um dos principais componentes responsáveis pelo desempenho do enlace sem fio. Considerando o interesse no aproveitamento da faixa licenciada para operação de sistemas em TVWS, torna-se necessária a investigação de soluções radiantes que conciliem operação em UHF, dimensões reduzidas e facilidade de integração aos dispositivos de comunicação [25, 26]. Nesse cenário, o desenvolvimento de antenas planares (*patches*) miniaturizadas representa uma alternativa promissora para viabilizar equipamentos compactos e de baixo custo, adequados às características das futuras redes de acesso [27].

Nesse contexto, as antenas planares desenvolvidas para operação na faixa UHF apresentam elevado potencial para aplicações em TVWS, especialmente quando associadas a técnicas de miniaturização que reduzem suas dimensões físicas sem comprometer significativamente o desempenho eletromagnético [27, 28]. A utilização dessas antenas pode proporcionar vantagens importantes, como baixo custo de fabricação, perfil e volume reduzidos, facilidade de integração com circuitos impressos e dispositivos embarcados, além de simplificar processos de instalação e produção em larga escala [26]. Embora a redução das dimensões possa impor limitações em parâmetros como ganho e eficiência de irradiação, estratégias adequadas de projeto permitem obter um compromisso favorável entre compactação e desempenho, o que torna essas antenas adequadas para sistemas de comunicação de curto e médio alcance [28]. Dessa forma, sua validação experimental é importante para demonstrar a viabilidade de sua utilização em cenários reais de TVWS, sobretudo *indoor*, além da compatibilidade com os requisitos das futuras redes de comunicação sem fio [25].

Nesta seção, o termo antena comercial continuará sendo utilizado para se referir à antena padrão empregada originalmente no sistema do transceptor da rede de acesso Brasil 6G, já detalhada na Tabela 1. Essa antena é utilizada como referência de comparação em relação às antenas planares avaliadas. As antenas planares desenvolvidas apresentam diferenciais competitivos relevantes para aplicações em sistemas de comunicação operando na faixa UHF, particularmente em cenários de TVWS, destacando-se pelos seguintes aspectos:

- Compactação estrutural: a aplicação de técnicas de miniaturização baseadas na modificação geométrica do elemento radiador e na excitação de modos lineares e ortogonais entre si permitem reduzir significativamente as dimensões físicas da antena, tornando-a mais adequada para dispositivos com restrições de espaço;

- Baixo custo e facilidade de fabricação: por ser implementada em tecnologia de circuito impresso, a antena pode ser produzida utilizando processos convencionais de fabricação de placas, possibilitando baixo custo, elevada reprodutibilidade e escalabilidade para produção em larga escala;
- Facilidade de integração: o perfil plano e a redução volumétrica da estrutura favorecem sua integração com equipamentos eletrônicos, sensores e plataformas embarcadas;
- Desempenho eletromagnético: as estratégias de miniaturização adotadas foram projetadas para preservar características importantes, como o casamento de impedância e o ganho realizado com operação adequada, mesmo com dimensões reduzidas em relação às antenas comerciais;
- Aplicabilidade em TVWS: a combinação entre dimensões compactas, baixo custo de fabricação e desempenho eletromagnético adequado torna a antena uma alternativa promissora para equipamentos de comunicação em TVWS. Essas características contribuem para o desenvolvimento de soluções alinhadas aos requisitos de conectividade da rede de acesso Brasil 6G, especialmente em aplicações que demandam baixo custo, ampla cobertura e facilidade de integração.

Na Tabela 6 encontram-se as principais especificações das antenas planares desenvolvidas para UHF, utilizando laminados de cobre depositados em substratos *Flame Retardant 4* (FR-4) de espessura moderada. O projeto foi validado por simulações eletromagnéticas no *software* comercial CST Studio® e, posteriormente, validado de maneira experimental por meio de prototipagem. O projeto das duas antenas planares está detalhado no relatório 4.2 [1].

Tabela 6: Especificações técnicas e características de desempenho das antenas planares propostas para UHF [1].

| Antena para 560 MHz |                                                                                                                            | Antena para 680 MHz |                                                     |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|
| Parâmetro           | Valor / Característica                                                                                                     | Parâmetro           | Valor / Característica                              |
| Modelo              | Antena Planar UHF com Excitação de Modos Ortogonais                                                                        | Modelo              | Antena Planar UHF com Excitação de Modos Ortogonais |
| Faixa de frequência | 543 a 613 MHz                                                                                                              | Faixa de frequência | 664 a 722 MHz                                       |
| Impedância          | 50 ohms                                                                                                                    | Impedância          | 50 ohms                                             |
| VSWR                | Menor que 2,0<br>(na faixa de operação)                                                                                    | VSWR                | Menor que 2,0<br>(na faixa de operação)             |
| Ganho               | ~ 2 dBi                                                                                                                    | Ganho               | ~ 2 dBi                                             |
| Polarização         | As duas antenas são duplamente polarizadas com modos linear horizontal ( <i>x-pol</i> ) e linear vertical ( <i>y-pol</i> ) |                     |                                                     |
| Peso                | 893 g                                                                                                                      | Peso                | 734 g                                               |
| Dimensões           | 304 mm x 227 mm x 7 mm                                                                                                     | Dimensões           | 300 mm x 200 mm x 7 mm                              |

Os testes de integração das antenas planares com a rede de acesso tem por objetivo comprovar que as antenas desenvolvidas estão funcionais e estabelecer uma análise comparativa com as antenas comerciais utilizadas nos protótipos dos transceptores que compõem a rede de

acesso. Vale destacar que as características principais da antena de referência estão apresentadas na Seção 3.1, mais especificamente na Tabela 1. Durante a realização dos testes das antenas planares foram realizadas análises em relação ao impacto em parâmetros operacionais da rede. Mais especificamente, foram avaliados parâmetros associados ao enlace de *downlink* e *uplink* da comunicação entre um terminal UE e a BS contemplando a taxa de comunicação, SNR, taxa de codificação e modulação utilizada pelo transceptor durante a comunicação, a BER, e EVM. A seguir, estão apresentados maiores detalhes sobre os testes de integração das antenas planares com a rede de acesso, assim como os resultados alcançados.

### 3.2.1 Descrição do cenário de integração e teste das antenas planares

O experimento de integração e teste das antenas planares com a rede de acesso foi realizado em um ambiente interno amplo, utilizando dois transceptores ou terminais da rede de acesso Brasil 6G. De maneira semelhante aos testes apresentados na Seção 3.1, os terminais que constituem a rede de acesso operam em modo FDD e com MIMO 2×2, ou seja, com duas antenas transmissoras e duas antenas receptoras. A rede de acesso foi testada com frequência central do enlace de *downlink* em 680 MHz e de 560 MHz para o enlace de *uplink*. Conforme comentado anteriormente, os terminais possuem duplexadores que viabilizam a transmissão e recepção de sinais simultaneamente em frequências distintas, graças à isolamento proporcionada pelo dispositivo em questão.

O diagrama que representa os *setups* de testes dos cenários de referência e de teste das antenas planares estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 22 e 23. Em ambos os casos, os transceptores ou terminais da rede de acesso Brasil 6G, correspondentes à BS (vide Figuras 22a e 23a) e ao terminal UE (vide Figuras 22b e 23b), são constituídos principalmente por um computador e pelo *front-end* de RF ou SDR. O terminal BS possui filtros seletivos de *downlink* e *uplink*, utilizados para limitar a banda de operação e reduzir componentes espectrais indesejadas fora da faixa de interesse. Esses filtros possuem largura de banda de 24 MHz e frequências centrais de 680 e 560 MHz, respectivamente. Vale ressaltar que do lado do terminal UE foi utilizado apenas o duplexador, sem filtros. A ausência de filtros foi considerada a fim de verificar se o sistema continua operando satisfatoriamente mesmo utilizando um *front-end* simplificado e, conseqüentemente, com condições de enlace possivelmente mais degradadas, já que, neste caso, propicia-se a redução de SNR e aumento do EVM, especialmente no enlace de *downlink*. De qualquer forma, vale reforçar que esta condição foi considerada tanto no cenário de referência, com as antenas comerciais, quanto no cenário de teste da antena planar.

A Figura 22 apresenta o cenário de referência utilizado nos testes. Nesse cenário, foram empregadas antenas comerciais na transmissão e recepção tanto na BS, conforme Figura 22a quanto no terminal UE, de acordo com a Figura 22b. Essa configuração foi adotada como referência para fins comparativos de desempenho das antenas planares a serem avaliadas.

A Figura 23 apresenta o cenário de teste utilizado para avaliação das antenas planares. Nesse cenário, manteve-se a mesma estrutura geral do cenário de referência, incluindo os transceptores, duplexadores e antenas comerciais na recepção. A principal modificação ocorreu nas antenas de transmissão: tanto na BS, conforme a Figura 23a, quanto no UE, conforme a Figura 23b, as antenas comerciais de transmissão foram substituídas pelas antenas planares sob teste. Dessa forma, as antenas avaliadas foram empregadas na transmissão em *downlink*, a partir da BS, e na transmissão em *uplink*, a partir do UE. Destaca-se que, durante os testes, as antenas associadas à BS foram posicionadas a aproximadamente 14 m das antenas associadas ao UE. Essa separação foi mantida para permitir a comparação entre o cenário de referência, composto

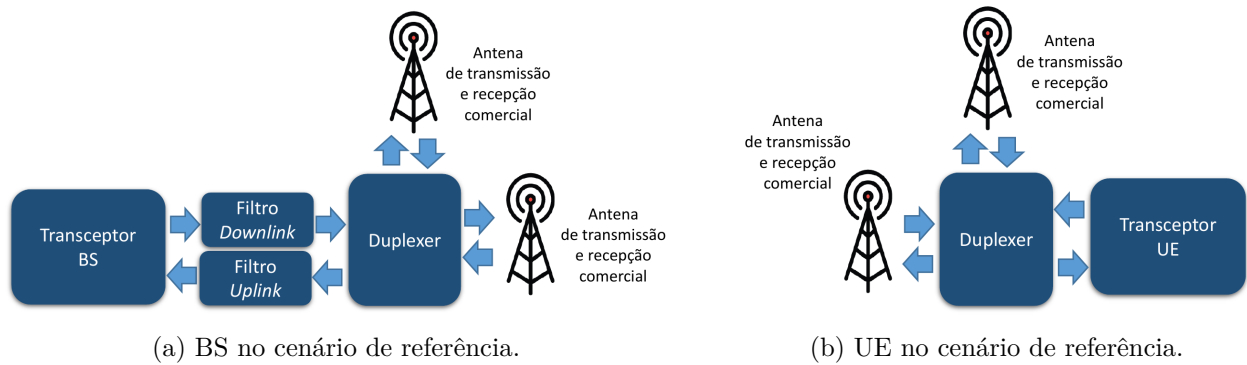


Figura 22: Esquema do cenário de referência, com antenas comerciais na transmissão e na recepção, tanto na (a) BS quanto no (b) UE.

por antenas comerciais, e o cenário de teste, composto por antenas planares. Vale destacar que neste cenário, os filtros e o duplexador foram utilizados apenas na cadeia de recepção do terminal BS e UE, já que o duplexador possui conexão para apenas duas antenas.

A Figura 24 mostra o cenário utilizado para o teste das antenas planares. Particularmente, a Figura 24a mostra o posicionamento das antenas planares em relação às antenas comerciais de referência, identificadas pelas estruturas vermelhas. A Figura 24b apresenta em detalhe o protótipo de antenas planares avaliado, composto por elementos radiantes dispostos em uma mesma placa. Por fim, a Figura 24c mostra uma visão geral do arranjo experimental, permitindo observar a disposição dos equipamentos, suportes e antenas utilizados durante os testes.

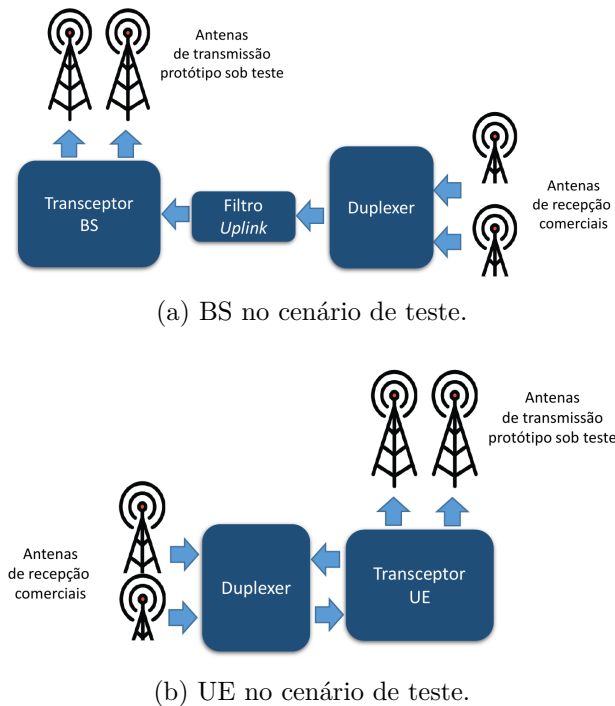
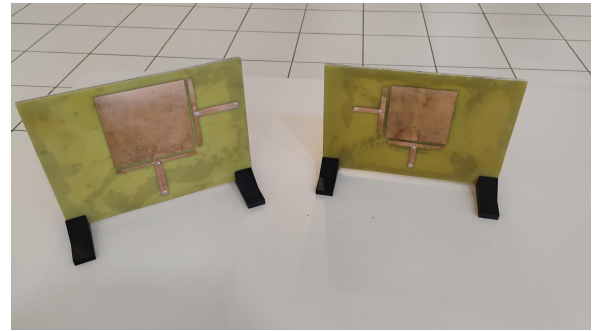


Figura 23: Esquema do cenário de teste, com antenas do protótipo na (a) transmissão em *downlink* e em (b) *uplink*, mantendo antenas comerciais na recepção.

É importante notar que o protótipo sob teste corresponde a uma única estrutura física con-



(a) Posicionamento das antenas planares e comerciais no cenário de teste.



(b) Antenas planares avaliadas no experimento.



(c) Visão geral do ambiente e do enlace.

Figura 24: Cenário experimental utilizado para avaliação das antenas comerciais e das antenas planares.

tendo dois elementos radiantes, conforme melhor detalhado em [1]. Além disso, os elementos radiantes das antenas planares apresentam polarizações distintas: um deles possui polarização vertical, enquanto o outro possui polarização horizontal. Esse aspecto deve ser considerado na interpretação dos resultados, uma vez que as antenas comerciais utilizadas como referência foram mantidas sempre na polarização vertical, que é a polarização padrão utilizada nos protótipos da rede de acesso. Dessa forma, a diferença de polarização entre o elemento horizontal do protótipo e as antenas comerciais receptoras pode impactar no desempenho do enlace de comunicação quando utilizadas as antenas planares em relação às antenas comerciais. Testes complementares considerando a inversão da polarização de pelo menos uma das antenas comerciais serão realizados futuramente, não fazendo parte do escopo do relatório atual, a fim de mensurar de maneira mais precisa o impacto das polarizações nos resultados alcançados.

Outro fator relevante é que a antena comercial utilizada como referência apresenta ganho nominal superior ao das antenas do protótipo. Portanto, tanto o menor ganho esperado das antenas planares quanto a diferença de polarização entre as antenas transmissoras do protótipo e as antenas comerciais receptoras podem contribuir para um desempenho inferior no cenário de teste, especialmente em condições de piores condições de recepção. No entanto, vale ressaltar que o objetivo principal da avaliação é verificar se o protótipo é capaz de estabelecer e manter a comunicação funcional em *uplink* e *downlink* em condições reais de operação e identificar métricas associadas a cada enlace.

A seguir, estão apresentados maiores detalhes sobre as condições de teste das antenas pla-



nares.

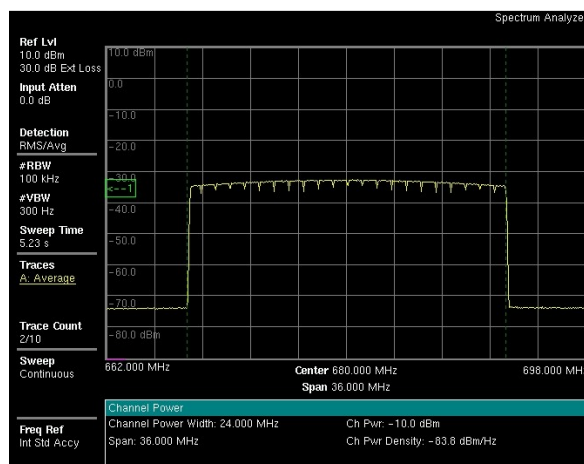
### 3.2.2 Condições de testes, configuração de potência e medições no receptor

Para a avaliação das antenas planares, foram considerados duas condições de teste que correspondem a dois níveis de potência entregues pelo transceptor às antenas transmissoras: aproximadamente  $-10$  dBm e aproximadamente  $-20$  dBm por antena. Esses níveis de potência foram aplicados tanto no cenário de referência, em que a transmissão foi realizada por antenas comerciais, quanto no cenário de teste, em que a transmissão foi realizada pelas antenas planares. Dessa forma, a comparação entre as antenas foi conduzida mantendo-se a mesma condição nominal de potência entregue às antenas transmissoras.

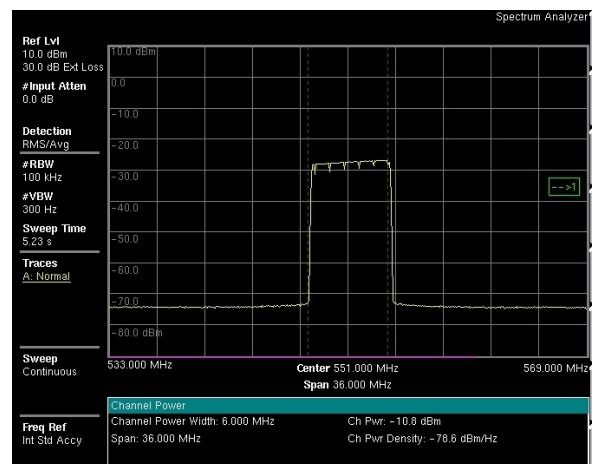
Essas duas condições de potência também foram aplicadas nos dois sentidos de comunicação do sistema: na transmissão realizada pela BS, correspondente ao *downlink*, e na transmissão realizada pelo UE, correspondente ao *uplink*. Assim, a análise permitiu avaliar, separadamente, o comportamento das antenas planares quando empregadas como antenas transmissoras em *downlink* e em *uplink*.

Em relação à ocupação espectral, os sinais de *uplink* e *downlink* apresentam larguras de banda distintas. No *uplink*, o sinal ocupa largura de banda de 6 MHz, enquanto, no *downlink*, o sinal transmitido pela BS ocupa largura de banda de 24 MHz.

A Figura 25 apresenta as PSDs dos sinais entregues pelos transceptores para cada uma das antenas transmissoras para a configuração nominal de  $-10$  dBm. Essa medição foi realizada separadamente para os dois sentidos de comunicação avaliados. Na BS foi medida a potência de aproximadamente  $-10$  dBm conforme mostrado na Figura 25a, e que correspondente à potência de transmissão do *downlink*. No terminal UE foi medida a potência de aproximadamente  $-10,8$  dBm, conforme apresentado na Figura 25b, e que correspondente à transmissão do *uplink*.



(a) BS: *downlink*,  $-10,0$  dBm.



(b) UE: *uplink*,  $-10,8$  dBm.

Figura 25: Potência entregue às antenas transmissoras para a configuração nominal de  $-10$  dBm.

Além dessas medições realizadas no lado transmissor, também foram realizadas medições da potência recebida pelas antenas de recepção, mantendo-se unicamente as antenas comerciais como antenas receptoras. Essas medições complementares permitem comparar o nível de sinal

disponível no receptor quando a transmissão é realizada pela antena comercial ou pela antena planar.

Com relação aos testes do enlace de *uplink*, as condições avaliadas e as medições de potência recebida, considerando a antena comercial como referência e a antena planar como protótipo sob teste encontram-se resumidas na Tabela 7. Os testes envolvidos e os resultados estão descritos e comentados a seguir.

Tabela 7: Condições de teste das antenas planares e medidas de potência recebida no *uplink*.

| Potência entregue a cada antena transmissora do UE | Tipo de antena transmissora do UE | Potência recebida na BS | Redução em relação à antena comercial |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| −10 dBm                                            | Comercial referência              | −42,9 dBm               | –                                     |
|                                                    | Antena planar em teste            | −56,6 dBm               | 13,7 dB                               |
| −20 dBm                                            | Comercial referência              | −52,8 dBm               | –                                     |
|                                                    | Antena planar em teste            | −66,2 dBm               | 13,4 dB                               |

A Figura 26 apresenta as PSDs dos sinais recebidos na BS durante os testes em *uplink*, corroborando os resultados da Tabela 7. Em todas as medições, destaca-se que foram mantidas antenas comerciais na recepção da BS, enquanto a antena transmissora do UE foi alternada entre a antena comercial e a antena planar. As Figuras 26a e 26b correspondem à potência de recepção na condição em que a potência entregue à cada antena de transmissão foi de aproximadamente −10 dBm. As Figuras 26c e 26d, por sua vez, correspondem à potência de recepção na condição em que a potência entregue à cada antena de transmissão foi de aproximadamente −20 dBm. Dessa forma, as medições permitem comparar diretamente o nível de potência recebido na BS quando se mantém a mesma condição de transmissão e se altera apenas a antena transmissora utilizada no UE.

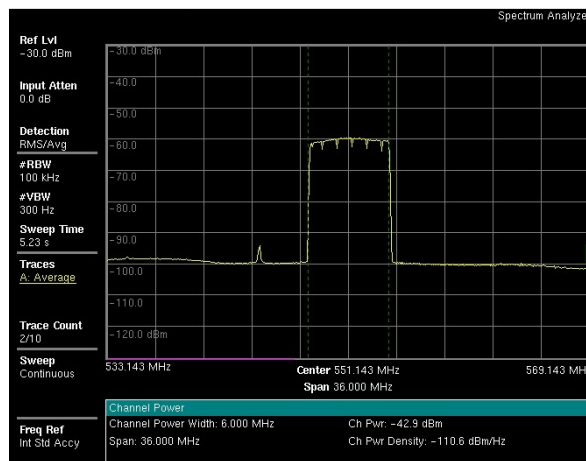
Para a condição de potência de transmissão de aproximadamente −10 dBm entregues à cada antena transmissora, foram comparados dois cenários no *uplink*, mantendo-se antenas comerciais na recepção desse sentido da comunicação. No primeiro cenário, utilizado como referência, a transmissão no UE foi realizada com a antena comercial, resultando em potência recebida na BS de aproximadamente −42,9 dBm, conforme mostrado na Figura 26a. No segundo cenário, manteve-se a mesma condição de potência entregue à antena transmissora, porém, utilizando a antena planar como antena de transmissão. Nesse caso, a potência recebida na BS foi reduzida para aproximadamente −56,6 dBm, conforme apresentado na Figura 26b. Portanto, mantendo-se a mesma potência de transmissão e as mesmas antenas comerciais na recepção da BS, o uso da antena planar como antena transmissora na UE resultou em uma redução de aproximadamente 13,7 dB na potência recebida pela BS em relação ao cenário com antena comercial.

Para a condição de aproximadamente −20 dBm entregues às antenas transmissoras, foram comparados também dois cenários no *uplink*, mantendo-se antenas comerciais na recepção desse sentido da comunicação. No primeiro cenário, utilizado como referência, a transmissão no UE foi realizada com a antena comercial, resultando em potência recebida na BS de aproximadamente −52,8 dBm, conforme mostrado na Figura 26c. No segundo cenário, manteve-se a mesma condição de potência entregue à antena transmissora, mas a antena comercial do UE

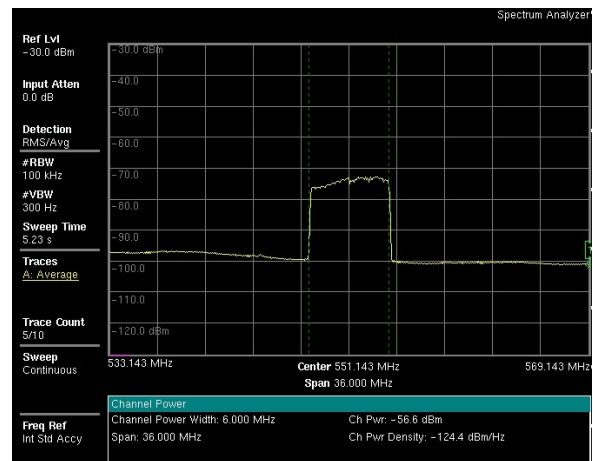
foi substituída pela antena planar. Nesse caso, a potência recebida na BS foi reduzida para aproximadamente  $-66,2$  dBm, conforme apresentado na Figura 26d. Portanto, mantendo-se a mesma potência de transmissão e as mesmas antenas comerciais na recepção da BS, o uso da antena planar como antena transmissora no UE resultou em uma redução de aproximadamente 13,4 dB na potência recebida pela BS em relação ao cenário com antena comercial. Conforme mencionado, a Tabela 7 resume os resultados alcançados nos testes do enlace de *uplink*.

Com relação aos testes do enlace de *downlink*, as condições avaliadas e as medições de potência recebida, considerando a antena comercial como referência e a antena planar como protótipo sob teste encontram-se resumidas na Tabela 8. Os testes realizados e estes resultados estão comentados e contextualizados a seguir.

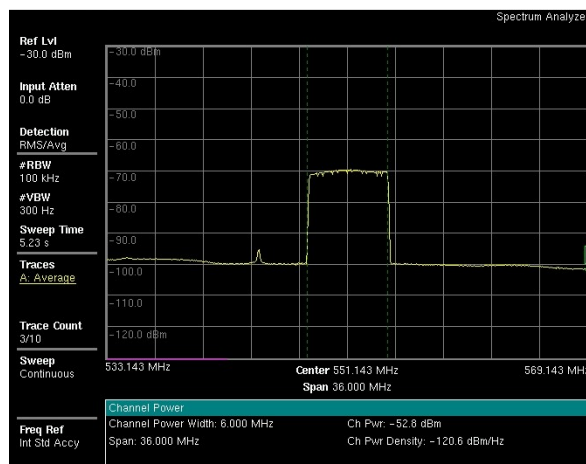
O sinal e a potência recebida no terminal UE durante os testes do enlace de *downlink* estão mostrados na Figura 27. Em todas as medições, foram mantidas antenas comerciais na recepção do terminal UE, enquanto a antena transmissora da BS foi alternada entre a antena comercial



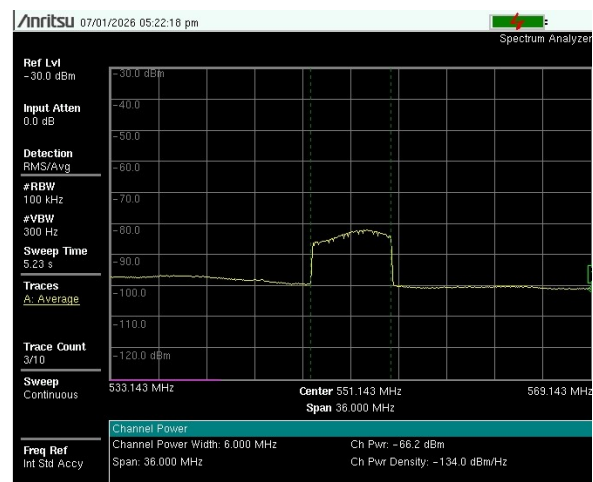
(a) UE com antena comercial; potência entregue de  $-10$  dBm; recebida de  $-42,9$  dBm.



(b) UE com antena planar; potência entregue de  $-10$  dBm; recebida de  $-56,6$  dBm.



(c) UE com antena comercial; potência entregue de  $-20$  dBm; recebida de  $-52,8$  dBm.



(d) UE com antena planar; potência entregue de  $-20$  dBm; recebida de  $-66,2$  dBm.

Figura 26: Potência recebida na BS no *uplink*, com antenas comerciais na recepção e alternância da antena transmissora no UE.

Tabela 8: Condições de teste das antenas planares e medidas de potência recebida no *downlink*.

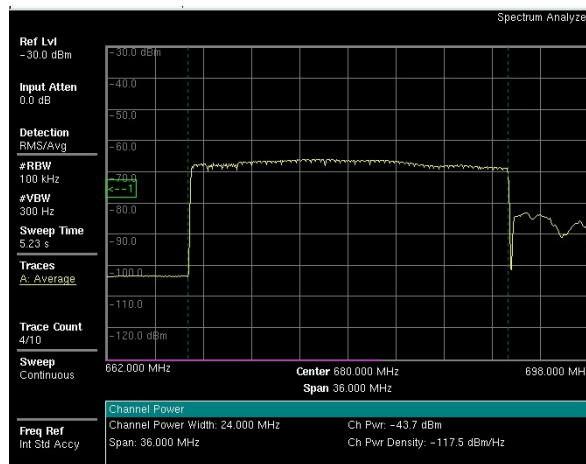
| Potência entregue a cada antena transmissora da BS | Tipo de antena transmissora da BS | Potência recebida no UE | Redução em relação à antena comercial |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| −10 dBm                                            | Comercial referência              | −43,7 dBm               | –                                     |
|                                                    | Antena planar em teste            | −61,1 dBm               | 17,4 dB                               |
| −20 dBm                                            | Comercial referência              | −52,5 dBm               | –                                     |
|                                                    | Antena planar em teste            | −69,8 dBm               | 17,3 dB                               |

e a antena planar. As Figuras 27a e 27b correspondem à potência de recepção na condição em que a potência entregue à cada antena transmissora foi de aproximadamente −10 dBm. As Figuras 27c e 27d, por sua vez, correspondem à potência de recepção na condição em que a potência entregue à cada antena transmissora foi de aproximadamente −20 dBm. Dessa forma, as medições permitem comparar diretamente o nível de potência recebido no UE quando se mantém a mesma condição de transmissão e se altera apenas a antena utilizada na BS.

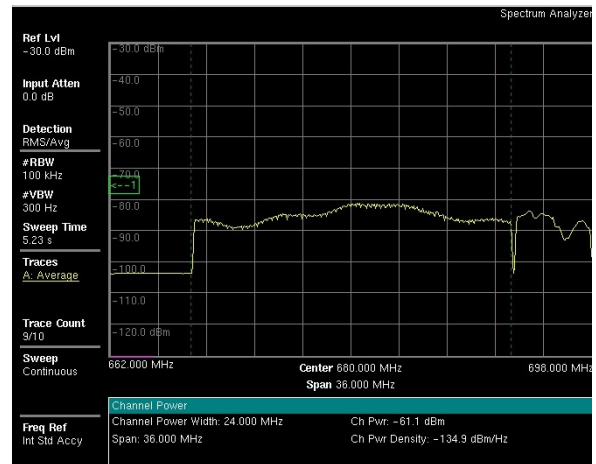
Para os testes do enlace de *downlink* e considerando a condição de potência de aproximadamente −10 dBm entregues às antenas transmissoras, foram testados dois cenários. No primeiro cenário a transmissão na BS foi realizada com antena comercial, resultando em potência recebida no UE de aproximadamente −43,7 dBm, conforme mostrado na Figura 27a. No segundo cenário, manteve-se a mesma condição de potência entregue à antena transmissora, mas a antena de transmissão utilizada na BS foi a antena planar. Nesse caso, a potência recebida no UE foi reduzida para aproximadamente −61,1 dBm, conforme apresentado na Figura 27b. Portanto, mantendo-se a mesma potência de transmissão e as mesmas antenas comerciais na recepção do UE, o uso da antena planar como antena transmissora na BS resultou em uma redução de aproximadamente 17,4 dB na potência recebida pelo UE em relação ao cenário com antena comercial.

Para a condição potência de aproximadamente −20 dBm entregues às antenas transmissoras, também foram comparados dois cenários nos testes do enlace de *downlink*. No primeiro cenário a transmissão na BS foi realizada com antena comercial, resultando em potência recebida no UE de aproximadamente −52,5 dBm, conforme mostrado na Figura 27c. No segundo cenário, manteve-se a mesma condição de potência entregue à antena transmissora, mas a antena transmissora utilizada na BS foi a antena planar. Nesse caso, a potência recebida no UE foi reduzida para aproximadamente −69,8 dBm, conforme apresentado na Figura 27d. Portanto, mantendo-se a mesma potência de transmissão e as mesmas antenas comerciais na recepção no terminal UE, o uso da antena planar como antena transmissora na BS resultou em uma redução de aproximadamente 17,3 dB na potência recebida pelo UE em relação ao cenário com antena comercial.

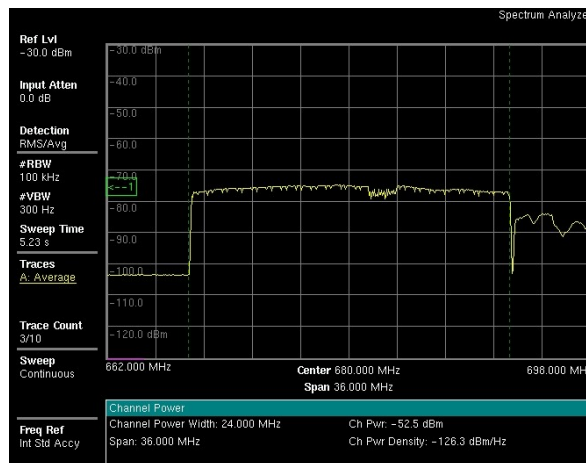
Vale ressaltar que os resultados das medidas de potência no testes do enlace de *downlink* encontram-se resumidos na Tabela 8. Um outro ponto a se destacar é que nas medições do *downlink*, a faixa de interesse do sistema corresponde à região delimitada pelas linhas tracejadas verdes nas figuras que apresentam as PSDs. Essa faixa representa a largura de banda de 24 MHz do sinal transmitido pela BS. A componente espectral observada à direita dessa região encontra-se fora da banda analisada e está associada a um canal de televisão adjacente. Portanto, essa



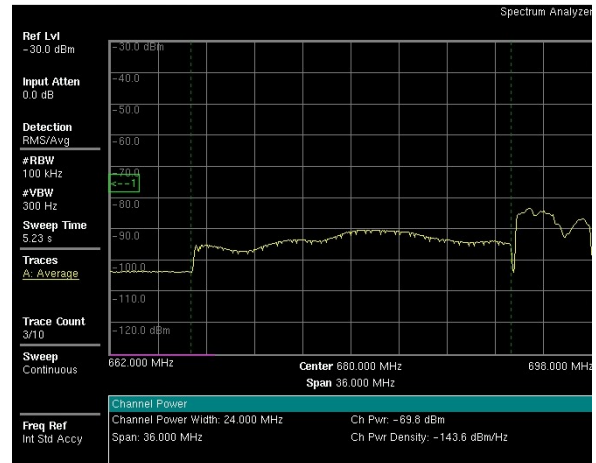
(a) BS com antena comercial; potência entregue de  $-10$  dBm; recebida de  $-43,7$  dBm.



(b) BS com antena planar; potência entregue de  $-10$  dBm; recebida de  $-61,1$  dBm.



(c) BS com antena comercial; potência entregue de  $-20$  dBm; recebida de  $-52,5$  dBm.



(d) BS com antena planar; potência entregue de  $-20$  dBm; recebida de  $-69,8$  dBm.

Figura 27: Potência recebida no UE no *downlink*, com antenas comerciais na recepção e alternância da antena transmissora na BS.

componente externa não deve ser interpretada como parte do sinal útil avaliado no experimento.

Os resultados de potência recebida mostram que, tanto nos testes do enlace de *uplink* quanto no enlace de *downlink*, a antena planar apresentou nível de potência recebida inferior ao obtido com a antena comercial. No *uplink*, as reduções observadas foram de aproximadamente 13,7 dB para a condição de  $-10$  dBm e de aproximadamente 13,4 dB para a condição de  $-20$  dBm. No *downlink*, as reduções foram mais acentuadas, correspondendo a aproximadamente 17,4 dB para  $-10$  dBm e 17,3 dB para  $-20$  dBm.

Esse comportamento é coerente com as diferenças entre as antenas avaliadas. A antena comercial utilizada como referência apresenta ganho nominal superior ao do protótipo, o que contribui para maiores níveis de potência recebida. Além disso, a antena planar possui dois elementos radiantes com polarizações distintas, sendo um com polarização vertical e outro com polarização horizontal. Como as antenas comerciais mantidas na recepção apresentam polarização vertical, o descasamento de polarização associado ao elemento horizontal do protótipo

pode contribuir para a redução do nível de potência recebida no cenário de teste.

### 3.2.3 Análise de parâmetros associados ao enlace de comunicação da rede de acesso

A fim de avaliar o desempenho e impacto do uso da antena planar na rede de acesso, foram realizados testes e análises em relação ao enlace de comunicação. Estes testes foram realizados considerando o mesmo ambiente, cenário e condições de testes descritos nas seções anteriores, Seções 3.2.1 e 3.2.2, ou seja, testes no enlace de *uplink* e *downlink*, considerando duas potências distintas entregues às antenas de transmissão, ora -10 dBm, ora -20 dBm, e medidas com a utilização dos tipos de antena de transmissão em avaliação: o modelo comercial de referência e a antena planar.

Para a geração de tráfego de dados na rede de acesso foi utilizada a ferramenta de redes **iperf**. Os testes realizados consideram a geração de tráfego de dados com o protocolo *User Datagram Protocol* (UDP), tanto no *uplink* quanto no *downlink*. A escolha do protocolo UDP está relacionada à possibilidade de definir previamente a taxa de transmissão gerada pela ferramenta **iperf**. Assim, os testes puderam ser conduzidos sob uma condição controlada de tráfego, reduzindo a influência de mecanismos de adaptação do protocolo de transporte, como controle de congestionamento, ajuste de janela e retransmissões, característicos do protocolo TCP. Com isso, buscou-se observar de forma mais direta o impacto da antena transmissora sobre os parâmetros de comunicação avaliados.

Para a comparação de desempenho da rede de acesso com as duas antenas em análise, antena comercial de referência e antena planar, foram analisados os principais parâmetros de desempenho do enlace de comunicação, incluindo taxa de transmissão, SNR, BER, EVM, modulação e taxa de codificação. Esses parâmetros permitem avaliar não apenas a vazão obtida, mas também indicadores associados à qualidade e à robustez da comunicação. Dessa forma, a análise conjunta dessas métricas possibilita verificar como cada configuração de antena influencia o comportamento do enlace e sua capacidade efetiva de transmissão.

A partir dessa metodologia, os resultados foram organizados separadamente para *downlink* e *uplink*, considerando as duas condições de potência avaliadas. Em cada caso, são comparados os resultados obtidos com a antena comercial, utilizada como referência, e com a antena planar, utilizada como protótipo sob teste.

Antes da realização dos testes com o protocolo UDP, foram executados ensaios preliminares para definir a taxa de transmissão UDP a ser configurada na ferramenta **iperf**. Como a geração de tráfego com protocolo UDP na ferramenta **iperf** exigem a definição prévia da taxa desejada, esse valor foi escolhido de acordo com a capacidade observada em cada enlace de transmissão (*downlink* ou *uplink*), e considerando as duas potências de transmissão (-10 ou -20 dBm) e as duas antenas transmissoras (planar ou comercial). O critério adotado foi selecionar uma taxa próxima ao maior valor que o sistema conseguia sustentar de forma estável a comunicação, evitando variações excessivas de vazão e perdas elevadas de pacotes. De modo geral, adotou-se como referência manter a perda de pacotes abaixo de 5%, de forma a permitir uma comparação mais estável entre os cenários e evitar que perdas excessivas mascarassem o impacto da antena transmissora no desempenho do sistema. A Tabela 9 resume as taxas configuradas para os testes realizados.

Observa-se que as taxas configuradas para a antena comercial foram superiores às adotadas nos cenários com antena planar. Essa diferença reflete as condições de comunicação observadas nos ensaios preliminares. Como a antena comercial proporcionou maior nível de potência



Tabela 9: Taxas configuradas na ferramenta **iperf** para os testes com UDP.

| Sentido de transmissão | Potência entregue a cada antena transmissora | Antena comercial referência | Antena planar em teste |
|------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <i>Downlink</i>        | −10 dBm                                      | 80 Mbps                     | 50 Mbps                |
| <i>Uplink</i>          | −10 dBm                                      | 15 Mbps                     | 9 Mbps                 |
| <i>Downlink</i>        | −20 dBm                                      | 80 Mbps                     | 21 Mbps                |
| <i>Uplink</i>          | −20 dBm                                      | 13 Mbps                     | 7 Mbps                 |

recebida e melhores condições de operação, foi possível configurar taxas UDP mais elevadas. Já nos cenários com antena planar, foram utilizadas taxas menores, compatíveis com a capacidade efetiva observada em cada caso. Essa escolha permitiu avaliar o sistema em uma condição controlada, reduzindo a ocorrência de perdas excessivas de pacotes e permitindo uma análise mais consistente dos parâmetros de desempenho.

Nas subseções seguintes, cada teste é apresentado e discutido individualmente, considerando o sentido de transmissão, a potência entregue às antenas transmissoras e o tipo de antena utilizado na transmissão.

### 3.2.4 Testes de *downlink* considerando potência de −10 dBm e protocolo UDP

Os resultados dos testes considerando o enlace de *downlink* com potência entregue a cada antena transmissora de aproximadamente −10 dBm estão apresentados de forma gráfica na Figura 28. Esta figura apresenta a evolução temporal dos parâmetros avaliados nesse teste de *downlink* com táfego de dados com o protocolo UDP. Os parâmetros mensurados e apresentados em tal figura são: taxa de transmissão ("Taxa [Mbps]"), SNR ("SNR RMS [dB]"), taxa de codificação ("Code rate"), modulação, BER e EVM. Para essa condição, foi analisada uma janela de aproximadamente 53 s, na qual cada ponto do gráfico corresponde a cerca de 1 s de comunicação. A Tabela 10 resume os valores médios e as variâncias dos parâmetros obtidos para os dois cenários.

Tabela 10: Comparação dos resultados do teste de *downlink* com UDP para potência de −10 dBm entregue às antenas transmissoras.

| Parâmetro   | Antena comercial |           | Antena planar          |                         |
|-------------|------------------|-----------|------------------------|-------------------------|
|             | Média            | Variância | Média                  | Variância               |
| Taxa [Mbps] | 79,992397        | 0,221798  | 49,418602              | 6,138827                |
| SNR [dB]    | 37,158245        | 0,045121  | 24,592358              | 0,000907                |
| Code rate   | 0,881992         | 0,013550  | 0,697635               | 0,000003                |
| Modulação   | 256QAM           | –         | 64QAM                  | –                       |
| BER         | 0                | 0         | $3,465 \times 10^{-6}$ | $8,085 \times 10^{-13}$ |
| EVM [%]     | 1,415245         | 0,073997  | 5,875547               | 0,039609                |

Para o teste de *downlink* com protocolo UDP e potência de aproximadamente −10 dBm entregue a cada antena transmissora, a SNR média de recepção foi de 37,16 dB quando a antena de transmissão foi a comercial e de aproximadamente 24,59 dB quando a antena de transmissão foi a antena planar. Portanto, o cenário com antena planar apresentou uma redução superior a 12 dB em relação a antena comercial. Essa diferença indica que o sinal recebido no UE apresentou melhor qualidade quando a transmissão foi realizada com a antena comercial. Esse

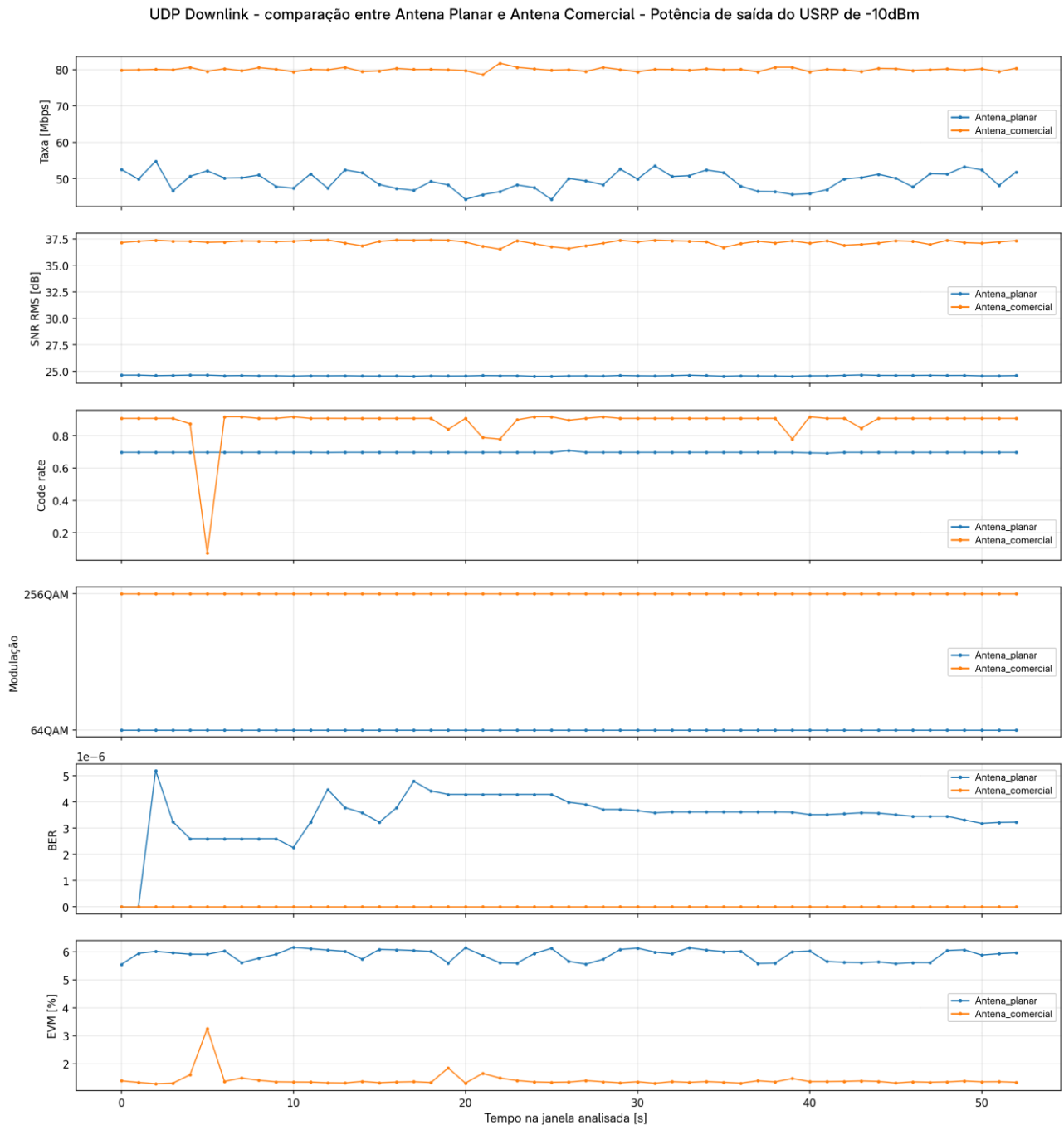


Figura 28: Evolução temporal dos parâmetros avaliados no teste de *downlink* com protocolo UDP, considerando potência de aproximadamente  $-10$  dBm entregue às antenas transmissoras.

comportamento está associado principalmente ao maior ganho da antena comercial transmissora e à melhor correspondência de polarização com as antenas comerciais utilizadas na recepção que estavam na polarização vertical. No cenário com antena planar, o menor ganho efetivo e o descasamento de polarização de uma das antenas contribuíram para a redução da SNR. Como consequência, a rede de acesso conseguiu operar com modulação 256 QAM no cenário de referência, enquanto, no cenário com antena planar, a modulação utilizada foi reduzida para 64 QAM. Como consequência, a taxa média obtida no cenário com antena comercial foi de

aproximadamente 79,99 Mbps, enquanto, no cenário com antena planar, a taxa média foi de aproximadamente 49,42 Mbps.

Com relação a taxa de codificação média também foi maior no cenário com antena comercial, atingindo aproximadamente 0,882, enquanto, no cenário com antena planar, esse valor foi de aproximadamente 0,698. Esse resultado indica que, com a antena comercial, o sistema pôde utilizar uma taxa de codificação mais elevada, ou seja, uma menor proporção de bits de redundância em relação aos bits de informação. Já com a antena planar, a menor SNR levou o sistema a operar de forma mais conservadora, utilizando uma taxa de codificação menor para aumentar a robustez da transmissão.

Em relação à BER, o cenário com antena comercial apresentou valor nulo durante a janela analisada. No cenário com antena planar, a BER média foi da ordem de  $3,465 \times 10^{-6}$ . Embora esse valor ainda seja baixo, sua ocorrência indica uma condição de comunicação menos robusta quando a antena planar foi utilizada na transmissão.

Com relação ao EVM, o valor médio obtido foi de aproximadamente 1,42% para a antena comercial e 5,88% para a antena planar. Esse aumento indica que, no cenário com antena planar, os símbolos recebidos apresentaram maior desvio em relação às posições ideais da constelação. Esse comportamento está associado principalmente à menor SNR observada nesse cenário, que torna o sinal recebido mais suscetível aos efeitos de ruído, interferências e imperfeições do enlace.

Embora a antena planar tenha apresentado resultados inferiores aos da antena comercial, vale ressaltar que trata-se de uma antena de tamanho e custo bastante reduzido. Uma das antenas planares possui polarização diferente da antena de recepção e, apesar disso, permitiu que a rede estabelecesse comunicação funcional, com BER relativamente reduzida e estabilidade temporal dos parâmetros avaliados. Esse comportamento confirma sua viabilidade de uso mesmo em uma condição mais restritiva de potência de transmissão e com as antenas de recepção em polarização vertical.

### 3.2.5 Testes de *uplink* considerando potência de $-10$ dBm e protocolo UDP

Os resultados dos testes considerando o enlace de *uplink* considerando a potência entregue à cada antena transmissora de  $-10$  dBm estão apresentados de forma gráfica na Figura 29. Esta figura apresenta a evolução temporal dos parâmetros avaliados nesse teste de *uplink* com protocolo UDP. Os parâmetros mensurados e apresentados em tal figura são: taxa de transmissão ("Taxa [Mbps]"), SNR ("SNR RMS [dB]"), taxa de codificação ("Code rate"), modulação, BER e EVM. A Tabela 11 resume os valores médios e as variâncias dos parâmetros obtidos no teste em questão.

Tabela 11: Comparação dos resultados do teste de *uplink* com UDP para potência de  $-10$  dBm entregue às antenas transmissoras.

| Parâmetro   | Antena comercial |           | Antena planar |           |
|-------------|------------------|-----------|---------------|-----------|
|             | Média            | Variância | Média         | Variância |
| Taxa [Mbps] | 15,000878        | 0,003942  | 8,999727      | 0,002602  |
| SNR [dB]    | 24,194660        | 0,001212  | 22,374057     | 0,001747  |
| Code rate   | 0,636040         | 0,002281  | 0,680264      | 0,001557  |
| Modulação   | 64QAM            | –         | 16QAM         | –         |
| BER         | 0                | 0         | 0             | 0         |
| EVM [%]     | 6,169000         | 0,024544  | 7,698132      | 0,069971  |

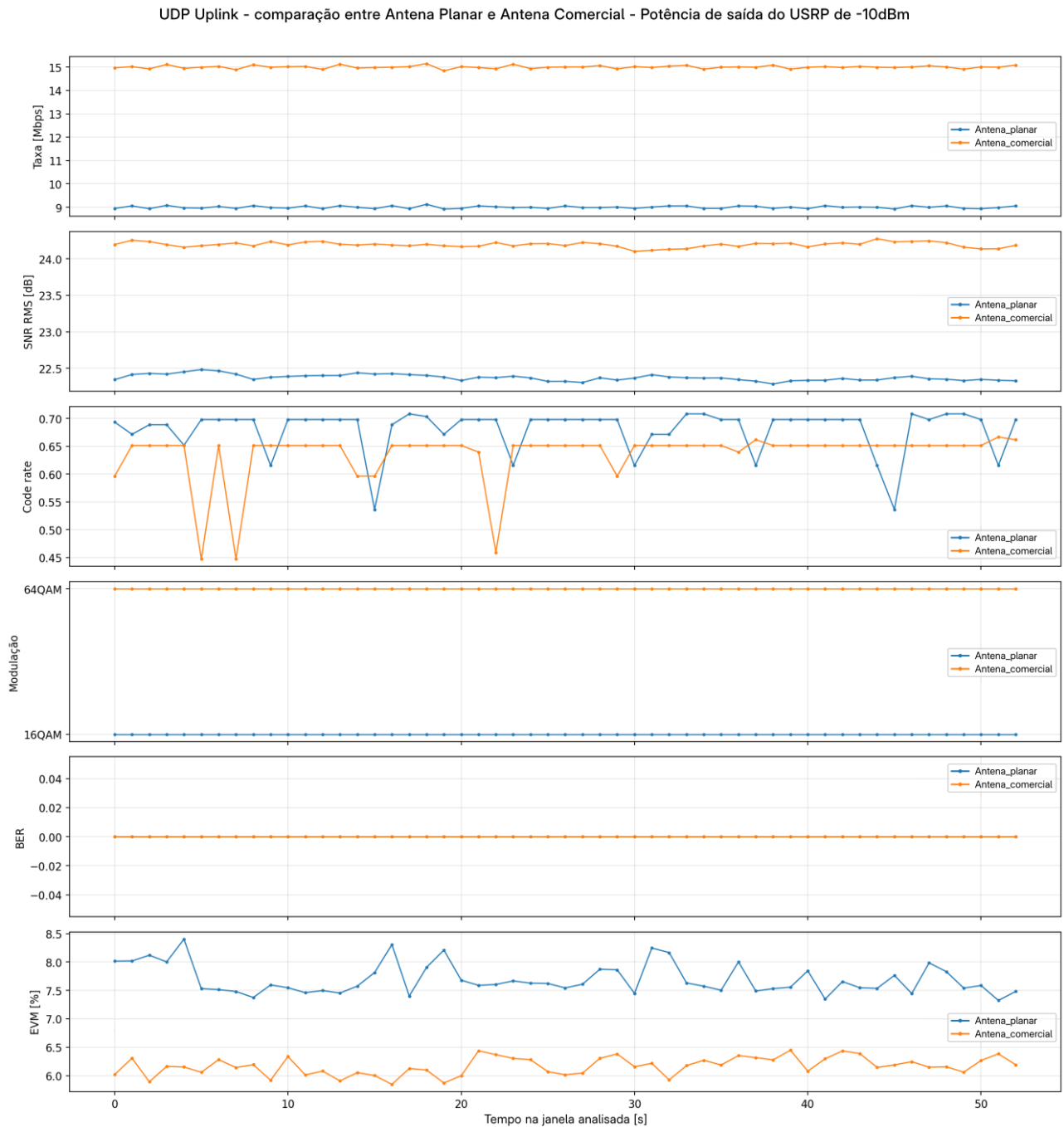


Figura 29: Evolução temporal dos parâmetros avaliados no teste de *uplink* com UDP, considerando potência de  $-10$  dBm entregue às antenas transmissoras.

No teste de *uplink* com protocolo UDP e potência de aproximadamente  $-10$  dBm entregue a cada antena transmissora, a SNR média de recepção foi de aproximadamente 24,19 dB no cenário de uso da antena comercial na transmissão, e de aproximadamente 22,37 dB no cenário com antena planar na transmissão, indicando uma redução de cerca de 1,8 dB quando a antena planar foi utilizada na transmissão. Com relação a taxa de comunicação, a antena comercial proporcionou taxa média de aproximadamente 15,00 Mbps, enquanto a antena planar apresentou taxa média de aproximadamente 9,00 Mbps. Essa diferença está relacionada à diferença de

SNR de recepção na BS. Embora a diferença de SNR não seja tão elevada quanto a observada em outros cenários, ela foi suficiente para alterar a configuração de transmissão adotada pelo sistema de forma automática. No cenário com transmissão utilizando a antena comercial, o sistema operou com modulação 64-QAM. Já no cenário com antena planar na transmissão, a modulação foi reduzida para 16-QAM. Como a modulação 16-QAM transmite menos bits por símbolo do que a 64-QAM, a eficiência espectral foi reduzida, limitando a taxa final obtida com a antena planar. Com relação a taxa de codificação, no cenário com uso da antena planar na transmissão, o valor médio utilizado foi de aproximadamente 0,680, enquanto, no cenário com antena comercial, o valor médio foi de aproximadamente 0,636.

A BER permaneceu igual a zero para ambas as antenas durante toda a janela analisada, indicando que a comunicação se manteve confiável nos dois cenários. O EVM médio foi de aproximadamente 6,17% para a transmissão com antena comercial e 7,70% para transmissão com a antena planar. Esse aumento indica que os símbolos recebidos no cenário com antena planar apresentaram maior desvio em relação às posições ideais da constelação, o que é coerente com a menor SNR observada nesse caso. Ainda assim, o aumento do EVM não comprometeu severamente a comunicação, uma vez que a BER permaneceu nula.

### 3.2.6 Testes de *downlink* considerando potência de $-20$ dBm e protocolo UDP

Foram realizados testes considerando o enlace de *downlink* com a potência de aproximadamente  $-20$  dBm entregue a cada antena transmissora. Nesse teste, a transmissão foi realizada pela BS e a recepção pelo UE, mantendo-se antenas comerciais na recepção, assim como nos demais testes. Os parâmetros avaliados com relação ao enlace de comunicação são os mesmos dos testes anteriores. A Tabela 12 resume os valores médios e as variâncias dos parâmetros avaliados para a condição de transmissão com a antena comercial e a antena planar. A Figura 30 apresenta a evolução temporal dos parâmetros avaliados nesse teste de *downlink* com protocolo UDP, sendo que os resultados médios consolidados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Comparação dos resultados do teste de *downlink* com UDP para potência de  $-20$  dBm entregue às antenas transmissoras.

| Parâmetro   | Antena comercial       |                         | Antena planar          |                         |
|-------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
|             | Média                  | Variância               | Média                  | Variância               |
| Taxa [Mbps] | 79,809561              | 0,316580                | 20,978093              | 0,009960                |
| SNR [dB]    | 32,698019              | 0,001134                | 14,497264              | 0,003622                |
| Code rate   | 0,803461               | 0,003083                | 0,626256               | 0,000092                |
| Modulação   | 256QAM                 | –                       | QPSK                   | –                       |
| BER         | $3,322 \times 10^{-8}$ | $5,759 \times 10^{-17}$ | $7,332 \times 10^{-7}$ | $4,330 \times 10^{-13}$ |
| EVM [%]     | 2,317604               | 0,014305                | 18,766321              | 0,409357                |

A SNR média de recepção foi de aproximadamente 32,70 dB quando utilizada como transmissora a antena comercial e de aproximadamente 14,50 dB quando utilizada a antena planar. A taxa média de comunicação, por sua vez, foi de aproximadamente 79,81 Mbps quando utilizada como transmissora a antena comercial, e de aproximadamente 20,98 Mbps quando utilizada como transmissora a antena planar. A diferença do nível de SNR impactou diretamente na definição da modulação empregada no enlace de comunicação, que é realizada de maneira automática pela rede de acesso. O sistema selecionou a modulação 256-QAM no cenário de transmissão com antena comercial, e reduziu a modulação para *Quaternary Phase-Shift*

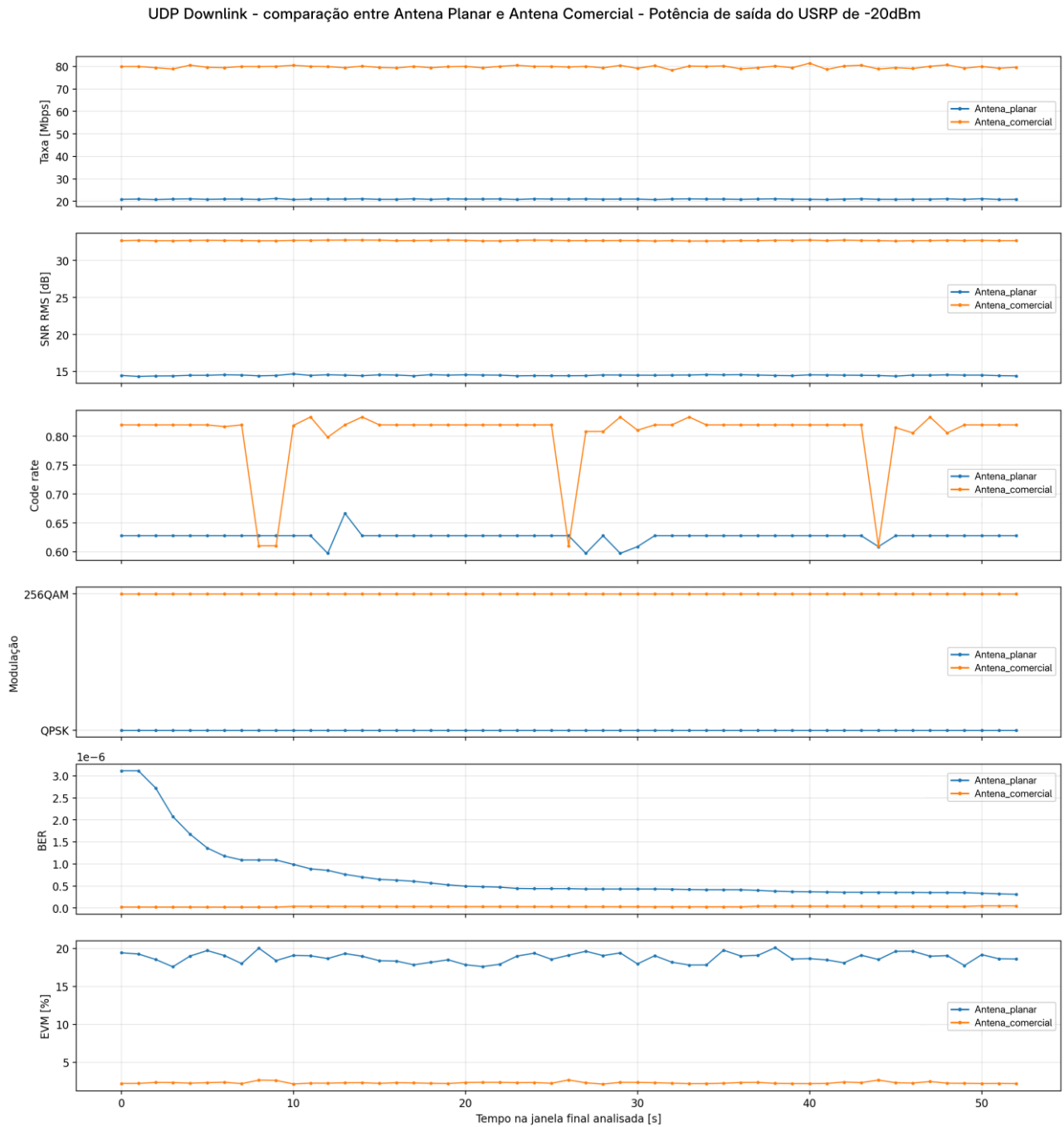


Figura 30: Evolução temporal dos parâmetros avaliados no teste de *downlink* com UDP, considerando potência de -20 dBm entregue às antenas transmissoras.

*Keying* (QPSK) no cenário com transmissão utilizando a antena planar. Essas definições, por sua vez, impactaram diretamente na taxa de comunicação alcançada nos testes de cada antena.

Com relação a taxa de codificação média também foi menor no cenário com antena planar, com valor de aproximadamente 0,626, enquanto, no cenário com antena comercial, o valor médio foi de aproximadamente 0,803. Isso mostra que, além de reduzir a ordem de modulação, o sistema também utilizou uma codificação mais robusta no caso da antena planar, aumentando a redundância para preservar a comunicação. A BER média foi da ordem de  $7,332 \times 10^{-7}$  para



a antena planar e de  $3,322 \times 10^{-8}$  para a antena comercial.

O EVM médio foi de aproximadamente 2,32% quando utilizada a antena comercial na transmissão e 18,77% quando utilizada a antena planar. Esse aumento indica que, no cenário com antena planar, os símbolos recebidos apresentaram maior desvio em relação às posições ideais da constelação. Esse comportamento é coerente com a menor SNR observada e reforça que a qualidade do sinal recebido foi significativamente degradada nessa condição.

### 3.2.7 Testes de *uplink* considerando potência de $-20$ dBm e protocolo UDP

Por fim, avaliou-se a condição do enlace *uplink* com potência de aproximadamente  $-20$  dBm entregue a cada antena transmissora. A Figura 31 apresenta a evolução temporal dos parâmetros avaliados nesse teste de *uplink* com protocolo UDP. Os parâmetros mensurados e apresentados em tal figura são aqueles analisados nos demais testes, ou seja: taxa de transmissão ("Taxa [Mbps]"), SNR ("SNR RMS [dB]"), taxa de codificação ("Code rate"), modulação, BER e EVM. A Tabela 13 resume os valores médios e as variâncias dos parâmetros obtidos para os dois cenários: transmissão com antena comercial e transmissão com antena planar.

Tabela 13: Comparação dos resultados do teste de *uplink* com UDP para potência de  $-20$  dBm entregue às antenas transmissoras.

| Parâmetro   | Antena comercial |           | Antena planar |           |
|-------------|------------------|-----------|---------------|-----------|
|             | Média            | Variância | Média         | Variância |
| Taxa [Mbps] | 13,001457        | 0,004401  | 6,999864      | 0,001777  |
| SNR [dB]    | 24,024566        | 0,000433  | 17,606660     | 0,001260  |
| Code rate   | 0,627045         | 0,002195  | 0,549092      | 0,001058  |
| Modulação   | 64QAM            | –         | 16QAM         | –         |
| BER         | 0                | 0         | 0             | 0         |
| EVM [%]     | 6,347226         | 0,026876  | 13,250830     | 0,499335  |

No teste do enlace de *uplink* com protocolo UDP e potência de aproximadamente  $-20$  dBm entregue a cada antena transmissora, a SNR média na recepção foi de aproximadamente 24,02 dB no cenário com transmissão realizada com antena comercial e de aproximadamente 17,61 dB no cenário com transmissão feita pela antena planar, indicando uma diferença de cerca de 6,4 dB. Como consequência principal da SNR, já que a rede de acesso define a modulação e codificação a ser empregada no enlace com base na SNR, a antena comercial proporcionou a taxa média de aproximadamente 13,00 Mbps, enquanto a antena planar proporcionou a taxa média de aproximadamente 7,00 Mbps.

Em função da SNR a rede de acesso utilizou a modulação 64-QAM no cenário com antena comercial e reduziu a modulação para 16-QAM no cenário com antena planar, o que impacta diretamente na taxa de comunicação alcançada em cada caso. A taxa de codificação média também foi menor no cenário com emprego da antena planar para a transmissão, com valor de aproximadamente 0,549, enquanto, no cenário com antena comercial, o valor médio foi de aproximadamente 0,627. Isso indica que, além da redução da ordem de modulação, o sistema também utilizou uma codificação mais robusta no caso da antena planar, aumentando a redundância para preservar a comunicação. A combinação entre menor ordem de modulação e menor taxa de codificação explica a menor vazão observada nesse cenário.

Apesar da redução de SNR, da menor ordem de modulação e do menor *code rate*, a BER permaneceu igual a zero para ambas as antenas durante toda a janela analisada. Esse resultado

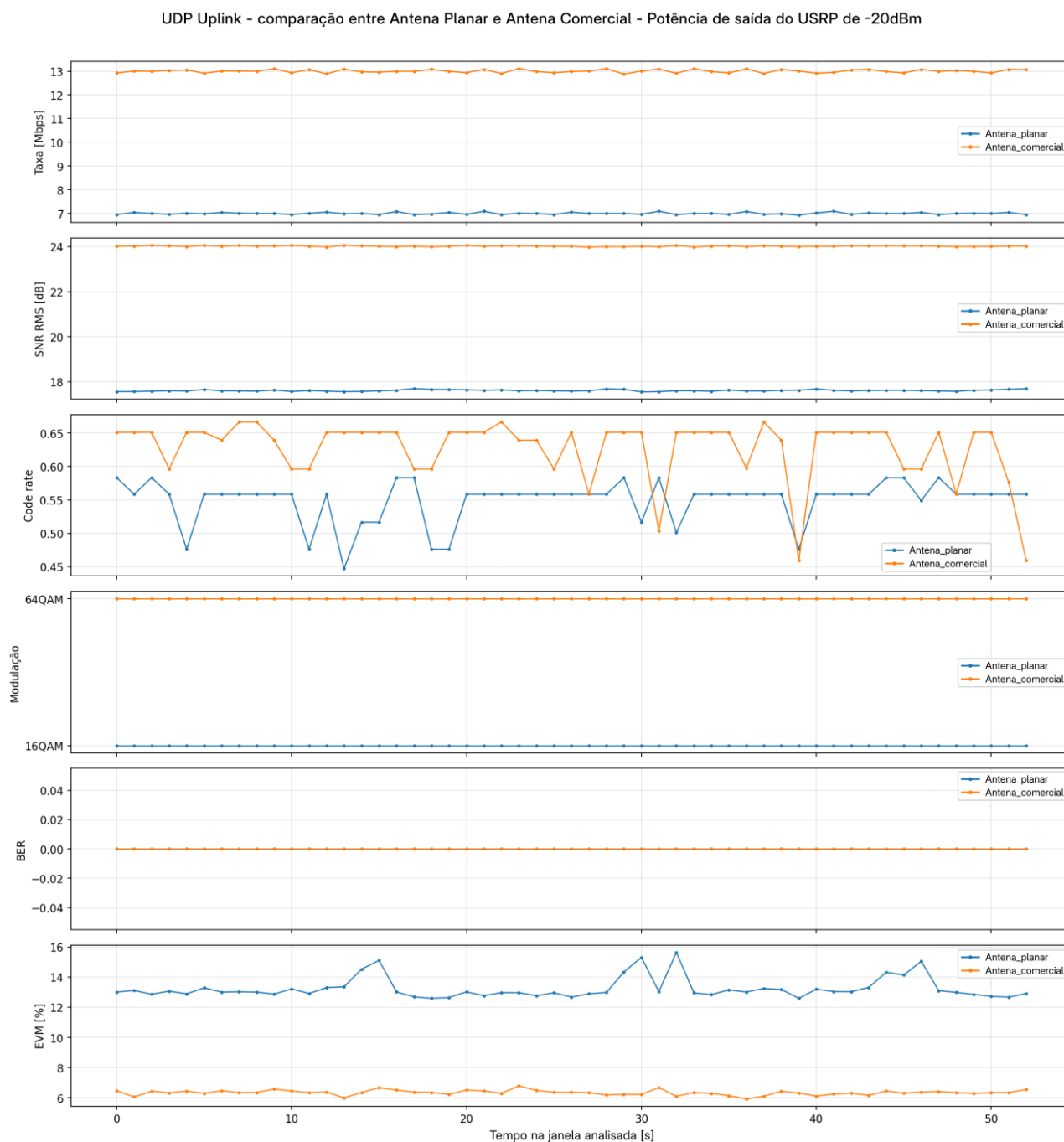


Figura 31: Evolução temporal dos parâmetros avaliados no teste de *uplink* com UDP, considerando potência de  $-20$  dBm entregue às antenas transmissoras.

indica que a comunicação se manteve confiável nos dois cenários, mesmo na condição de menor potência entregue às antenas transmissoras.

O EVM médio foi de aproximadamente 6,35% quando utilizada a antena comercial na transmissão e 13,25% quando utilizada a antena planar. Esse comportamento é coerente com a menor SNR observada e confirma a pior qualidade do sinal recebido na BS quando a antena planar foi utilizada na transmissão.

### 3.2.8 Discussão geral e conclusão

A análise dos resultados mostra que as antenas planares foram capazes de estabelecer e sustentar comunicação tanto no enlace de *uplink* quanto no de *downlink* da rede de acesso Brasil 6G. Na condição de maior potência avaliada, as diferenças entre a antena comercial e a antena planar já foram perceptíveis, principalmente no *downlink*. A antena comercial apresentou maior SNR, maior ordem de modulação, menor EVM e maior taxa efetiva de transmissão. A antena planar, por sua vez, operou sob uma condição de recepção menos favorável por conta de suas características de construção, o que levou à redução da ordem de modulação e da taxa obtida. Mesmo assim, a comunicação permaneceu ativa durante as janelas analisadas, indicando que o protótipo foi capaz de sustentar a transmissão em uma condição mais favorável de potência.

Ao reduzir a potência entregue às antenas transmissoras para aproximadamente  $-20$  dBm, as diferenças entre as antenas tornaram-se mais evidentes. Nessa condição, a antena comercial manteve desempenho superior nos parâmetros analisados, enquanto a antena planar apresentou maior degradação de SNR, EVM, modulação e taxa efetiva. Esse comportamento foi mais acentuado no *downlink*, no qual a redução da qualidade do sinal recebido levou o sistema a operar com uma modulação mais robusta e de menor eficiência espectral no cenário com antena planar.

Mesmo nas condições mais restritivas, os resultados continuaram sendo relevantes do ponto de vista funcional. A antena planar manteve a comunicação ativa tanto no *uplink* quanto no *downlink*, com BER nula nos testes de *uplink* e valores baixos de BER nos testes de *downlink*. Embora a vazão obtida tenha sido inferior à observada com a antena comercial, os principais parâmetros avaliados indicaram que o protótipo foi capaz de sustentar a comunicação nos cenários testados.

A diferença de desempenho observada está associada a características próprias da estrutura avaliada. Além do menor ganho efetivo da antena planar em relação à antena comercial, deve-se considerar o possível descasamento de polarização associado a um dos elementos radiantes do protótipo. Conforme descrito anteriormente, a antena planar é formada por uma única estrutura física contendo dois elementos radiantes, sendo um com polarização vertical e outro com polarização horizontal. Como as antenas comerciais utilizadas na recepção foram mantidas na polarização vertical, o elemento horizontal da antena planar pode contribuir para a redução da potência recebida e, conseqüentemente, para a degradação dos parâmetros de desempenho.

De forma geral, os resultados indicam que, embora a antena planar tenha apresentado desempenho inferior ao da antena comercial, suas dimensões reduzidas e seu menor custo tornam sua utilização tecnicamente promissora. Mesmo com uma das antenas planares operando com polarização diferente daquela empregada na recepção, foi possível estabelecer uma comunicação funcional, mantendo valores relativamente baixos de BER e estabilidade temporal dos parâmetros avaliados. Esses resultados demonstram que a solução pode ser considerada para uso em aplicações com restrições de potência de transmissão, dimensões físicas e custo, desde que as limitações associadas ao desacoplamento de polarização sejam consideradas no projeto do enlace.

## 4 Conclusão

As atividades apresentadas neste relatório demonstraram a integração bem-sucedida de diferentes soluções à rede de acesso Brasil 6G, evidenciando a flexibilidade da plataforma para prover conectividade a aplicações, dispositivos e tecnologias com distintas características técnicas e operacionais. A integração de aplicações relacionadas ao uso de drone com LiDAR, monitoramento de animais, detecção de pragas e controle remoto de cargas permitiu validar a rede de acesso em cenários representativos de uso, especialmente associados a ambientes remotos, rurais ou de difícil atendimento por infraestruturas convencionais.

Os testes realizados confirmaram a capacidade da rede de acesso Brasil 6G de atuar como elemento habilitador para a conexão de diferentes dispositivos, interfaces e tecnologias. A disponibilização de conectividade a partir do terminal UE, por meio de interfaces como Ethernet, Wi-Fi, LoRa, Sigfox e rádios proprietários, demonstra a compatibilidade da rede com aplicações heterogêneas e reforçou seu potencial de utilização em múltiplos cenários de pesquisa, desenvolvimento e validação tecnológica.

Além das aplicações integradas, a validação da rede de acesso com antenas inovadoras desenvolvidas no projeto Brasil 6G representou uma frente complementar relevante para a maturação da plataforma. A integração com uma antena flexível e uma antena do tipo planar, ambas com dimensões reduzidas para operação na faixa de UHF, amplia as possibilidades de avaliação da rede em ambientes laboratoriais e em configurações voltadas a dispositivos mais compactos e portáteis. Essa atividade reforça a importância da integração entre os subsistemas de comunicação, os elementos radiantes e os cenários de aplicação, permitindo avaliar a rede de acesso de forma mais abrangente.

O processo de integração contribuiu para a maturação da própria rede de acesso, ao permitir a avaliação de seu comportamento em condições práticas de operação e sua interação com diferentes arquiteturas de aplicação, interfaces de comunicação e soluções de radiofrequência. Da mesma forma, as aplicações e os componentes integrados também se beneficiaram do ambiente de testes, uma vez que puderam ser avaliados em conjunto com uma infraestrutura de comunicação experimental, permitindo identificar oportunidades de aprimoramento, ajustes operacionais e novas possibilidades de uso.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a relevância da rede de acesso Brasil 6G como plataforma experimental para validação de aplicações inovadoras, dispositivos conectados e tecnologias de comunicação desenvolvidas no âmbito do projeto. A integração bem-sucedida das soluções avaliadas evidencia a viabilidade da plataforma para apoiar pesquisas e desenvolvimentos voltados à conectividade em áreas remotas e rurais, bem como para fomentar a criação, adaptação e maturação de novas aplicações e componentes associados aos futuros cenários de uso das redes de comunicação.

## Referências

- [1] Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) Inatel, “Atividade 4.2 - Implementação de tecnologias para testes em campo - Parte 2,” *Projeto Brasil 6G*, Jul. 2026.
- [2] A. Soussi, E. Zero, R. Sacile, D. Trincherro, and M. Fossa, “Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review,” *Sensors*, vol. 24, no. 8, p. 2647, 2024.
- [3] S. M. Farhan, J. Yin, Z. Chen, and M. S. Memon, “A comprehensive review of lidar applications in crop management for precision agriculture,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 24, no. 16, p. 5409, 2024.
- [4] M. R. Karim, M. N. Reza, H. Jin, M. A. Haque, K.-H. Lee, J. Sung, and S.-O. Chung, “Application of lidar sensors for crop and working environment recognition in agriculture: A review,” *Remote Sensing*, vol. 16, no. 24, p. 4623, 2024.
- [5] E. Omia, H. Bae, E. Park, M. S. Kim, I. Baek, I. Kabenge, and B.-K. Cho, “Remote sensing in field crop monitoring: A comprehensive review of sensor systems, data analyses and recent advances,” *Remote Sensing*, vol. 15, no. 2, p. 354, 2023.
- [6] Z. Li, M. E. Hodgson, and W. Li, “A general-purpose framework for parallel processing of large-scale lidar data,” *International Journal of Digital Earth*, vol. 11, no. 1, pp. 26–47, 2018.
- [7] Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) Inatel, “Atividade 3.2 - Aplicações de posicionamento e mapeamento com LiDAR,” *Projeto Brasil 6G*, Jul. 2026.
- [8] R. Kays and M. Wikelski, “The Internet of Animals: what it is, what it could be,” *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 38, no. 9, pp. 859–869, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.04.007>.
- [9] A. M. Davison, K. de Koning, F. Taubert, and J.-K. Schakel, “Automated near real-time monitoring in ecology: Status quo and ways forward,” *Ecological Informatics*, vol. 89, p. 103157, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103157>.
- [10] D. Zeuss, L. Bald, J. Gottwald, M. Becker, H. Bellafkir, J. Bendix, P. Bengel, L. T. Beumer, R. Brandl, M. Brändle, S. Dahlke, N. Farwig, B. Freisleben, N. Friess, L. Heide, S. Heuer, J. Höchst, H. Holzmann, P. Lampe, M. Leberecht, K. Lindner, J. F. Masello, J. Mielke Möglich, M. Mühling, T. Müller, A. Noskov, L. Opgenoorth, C. Peter, P. Quillfeldt, S. Rösner, R. Royauté, C. Mestre-Runge, D. Schabo, D. Schneider, B. Seeger, E. Shayle, R. Steinmetz, P. Tafo, M. Vogelbacher, S. Wöllauer, S. Younis, J. Zobel, and T. Nauss, “Nature 4.0: A networked sensor system for integrated biodiversity monitoring,” *Global Change Biology*, vol. 30, no. 1, p. e17056, 2024.
- [11] J. Kamminga, E. Ayele, N. Meratnia, and P. Havinga, “Poaching Detection Technologies—A Survey,” *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1474, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/s18051474>.
- [12] Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) Inatel, “Atividade 3.3 - Aplicações de IoT para Redes 6G,” *Projeto Brasil 6G*, Jul. 2026.

- [13] M. S. Mekala and P. Viswanathan, "A survey: Smart agriculture iot with cloud computing," in *2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS)*, 2017, pp. 1–7.
- [14] R. Kumar Kasera, S. Gour, and T. Acharjee, "A comprehensive survey on iot and ai based applications in different pre-harvest, during-harvest and post-harvest activities of smart agriculture," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 216, p. 108522, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169923009109>
- [15] V. Figueiredo, S. Mafra, and J. Rodrigues, "A proposed iot smart trap using computer vision for sustainable pest control in coffee culture," in *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2020, pp. 201–210. [Online]. Available: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbcup/article/view/11226>
- [16] D. Oliveira and S. Mafra, "Implementation of an intelligent trap for effective monitoring and control of the aedes aegypti mosquito," *Sensors*, vol. 24, no. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/21/6932>
- [17] A. Mdhaftar, B. Zalila, R. Moalla, A. Kharrat, O. Rebai, M. M. Hsairi, A. Sallemi, H. Kobbi, A. Kolsi, D. Chatti, M. Jmaiel, and B. Freisleben, "A smart trap for counting olive moths based on the internet of things and deep learning," in *2022 IEEE/ACS 19th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, 2022, pp. 1–8.
- [18] J. Hinojosa-Dávalos, M. A. Robles-García, M. Gutiérrez-Lomelí, A. B. Flores Jiménez, and C. Acosta Lúa, "Neural network-guided smart trap for selective monitoring of nocturnal pest insects in agriculture," *Agriculture*, vol. 15, no. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/14/1562>
- [19] D. Witczak and S. Szymoniak, "Review of monitoring and control systems based on internet of things," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 19, p. 8943, 2024.
- [20] T. Domínguez-Bolaño, O. Campos, V. Barral, C. J. Escudero, and J. A. García-Naya, "An overview of iot architectures, technologies, and existing open-source projects," *Internet of Things*, vol. 20, p. 100626, 2022.
- [21] I. Analytics, "State of iot 2024: Number of connected iot devices growing 13% to 18.8 billion globally," 2024, accessed: 2026-07-07. [Online]. Available: <https://iot-analytics.com/number-of-connected-iot-devices-2024/>
- [22] H. Shahab, M. Iqbal, A. Sohaib, F. U. Khan, and M. Waqas, "Iot-based agriculture management techniques for sustainable farming: A comprehensive review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 220, p. 108851, 2024.
- [23] A. Soussi, E. Zero, R. Sacile, D. Trincherro, and M. Fossa, "Smart sensors and smart data for precision agriculture: A review," *Sensors*, vol. 24, no. 8, p. 2647, 2024.
- [24] ThingsBoard, "ThingsBoard: Open-source IoT Platform," <https://thingsboard.io/>, 2026, accessed: 2026-07-07.



- [25] T. A. Dhande, P. D. Peshwe, I. S. Darwhekar, and A. G. Kothari, “Wideband patch antenna for cognitive radio applications in TV white space,” in *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. Kanpur, India: IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [26] S. Kumar and N. Rayavarapu, “A unique frequency reconfigurable monopole antenna for TV white space applications,” *Frequenz*, vol. 76, no. 7–8, pp. 361–366, 2022.
- [27] R. Sharma, N. S. Raghava, and A. De, “Design and analysis of circular microstrip patch antenna for white space TV band application,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 126, pp. 3333–3344, 2022.
- [28] B. A. P. Nel, A. K. Skrivervik, and M. Gustafsson, “Radiation efficiency and gain bounds for microstrip patch antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 73, no. 2, pp. 873–883, feb 2025.