

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E
SISTEMAS

DISSERTAÇÃO

**DESEMPENHO DO SISTEMA MIMO 2X2 PARA TV 3.0 EM AMBIENTES URBA-
NOS COMPLEXOS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM TESTES DE CAMPO E
ANÁLISE COMPUTACIONAL**

ANDERSON DA SILVA RIBEIRO

SÃO LUÍS - MA
2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E
SISTEMAS

ANDERSON DA SILVA RIBEIRO

DISSERTAÇÃO

DESEMPENHO DO SISTEMA MIMO 2X2 PARA TV 3.0 EM AMBIENTES URBANOS COMPLEXOS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM TESTES DE CAMPO E ANÁLISE COMPUTACIONAL

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em Engenharia da Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva

Coorientadora: Profa. Dra. Amanda Beatriz Cunha Dos Santos

SÃO LUÍS - MA

2026

Ribeiro, Anderson da Silva.

Desempenho do Sistema MIMO 2x2 para TV 3.0 em ambientes urbanos complexos: uma abordagem baseada em testes de campo e análise computacional / Anderson da Silva Ribeiro. - São Luís - MA, 2026.

173 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação e Sistemas) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva.

Coorientadora: Profa. Dra. Amanda Beatriz Cunha Dos Santos.

1. ISDB-T Avançado. 2. Número de Condição. 3. MER. 4. MIMO 2x2. 5. Relação C/N. I. Título.

CDU: 004:621.397.743

Elaborado por Luciana de Araújo - CRB 13/445

ANDERSON DA SILVA RIBEIRO

DISSERTAÇÃO

DESEMPENHO DO SISTEMA MIMO 2X2 PARA TV 3.0 EM AMBIENTES URBANOS COMPLEXOS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM TESTES DE CAMPO E ANÁLISE COMPUTACIONAL

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em Engenharia da Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação e Sistemas.

Aprovado em: 05 de março de 2026

Prof. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva
(Orientador-UEMA)

Profa. Dra. Amanda Beatriz Cunha dos Santos
(Coorientadora-PUC-RIO)

Prof. Dr. Rogério Moreira Lima Silva
(UEMA)

Prof. Me. Marcos Jose dos Passos Sá
(Externo ao Programa)

Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos
(UFF)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de toda força, sabedoria e inspiração. Sem Sua graça e misericórdia, esta caminhada teria sido impossível. Em cada desafio e conquista, senti Sua presença me guiando e fortalecendo.

Aos meus filhos, Davi Henrique e Maria Alice, minha maior motivação e razão de perseverança. À minha esposa, Stefane Karine, pelo amor, paciência e apoio incondicional ao longo dessa jornada. À minha mãe, Maria Kátia, e ao meu pai, Raimundo Edilson, que sempre acreditaram em mim e me deram base para alcançar meus objetivos. Às minhas irmãs, Andreia e Andressa, pelo carinho e incentivo constante. Aos meus sogros, Mara e Júnior, pelo apoio ao longo deste período desafiador.

Meu profundo agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Leonardo Gonsioroski, e à minha coorientadora, Amanda Beatriz, por toda orientação, paciência e ensinamentos valiosos que contribuíram imensamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Sou grato a todos os profissionais, colegas e amigos que me incentivaram, auxiliaram e compartilharam momentos importantes dessa jornada acadêmica. Em especial, agradeço aos professores Carlos Giovanni e Anchieta Araujo, da minha graduação, que me incentivaram e enviaram a carta de recomendação para o programa de mestrado, possibilitando que essa conquista se tornasse realidade.

Agradeço à Universidade Estadual do Maranhão, seu corpo docente, administração e direção geral, por proporcionar a oportunidade de realizar este mestrado. Também estendo minha gratidão à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação e Sistemas, pelo suporte eficiente e comprometimento.

Por fim, um agradecimento especial à empresa AMPLANET por todo o apoio oferecido nessa etapa tão significativa da minha vida acadêmica e profissional.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Ribeiro, Anderson. **Desempenho do Sistema MIMO 2x2 para TV 3.0 em Ambientes Urbanos Complexos: Uma Abordagem Baseada em Testes de Campo e Análise Computacional**. São Luís, 2026. Dissertação de Mestrado - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Maranhão.

Para atender à crescente demanda, as tecnologias de transmissão precisam evoluir para oferecer aos usuários uma experiência de TV superior, com alta qualidade de áudio e vídeo, maior acessibilidade, interatividade e serviços personalizados para dispositivos fixos e móveis. O ISDB-T Avançado, desenvolvido pela NHK, é uma evolução do padrão ISDB-T, já utilizado no Brasil, e incorpora a tecnologia MIMO para aumentar a flexibilidade, robustez e eficiência espectral, adaptando-se melhor a diferentes condições de transmissão e recepção. Este estudo avalia o desempenho do canal por meio de testes de campo em 30 locais estratégicos na cidade do Rio de Janeiro, com cenários de recepção MIMO usando uma configuração de transmissão 2x2. A análise tem como foco parâmetros essenciais para avaliar a robustez do sistema em diferentes condições de recepção. As principais métricas consideradas incluem o nível do sinal recebido, a relação C/N, a banda de coerência, o número de condição e a MER. Os resultados indicaram que a avaliação do número de condição do canal é fundamental para a análise de desempenho MIMO, sendo que valores mais próximos de 1 tendem a se associar a valores mais elevados de MER, evidenciando que canais bem condicionados favorecem a equalização e resultam em recepção mais robusta. A maioria dos pontos apresentou desempenho excelente, mesmo em ambientes complexos, enquanto alguns locais específicos registraram degradação devido a condições de propagação mais severas. Ressalta-se que, mesmo em proximidade ao transmissor, os pontos 29 e 30 apresentaram desempenho inferior, devido à ocorrência de sombreamento no ambiente de recepção. De modo geral, a análise integrada das métricas mostrou-se essencial para compreender o comportamento do canal, fundamentar o planejamento de cobertura e guiar a otimização do sistema em cenários reais, contribuindo para o desenvolvimento e aprimoramento da TV 3.0.

Palavras-chave: ISDB-T Avançado; Número de Condição; MER; MIMO 2x2; Relação C/N; Banda de Coerência.

ABSTRACT

Ribeiro, Anderson. **Desempenho do Sistema MIMO 2x2 para TV 3.0 em Ambientes Urbanos Complexos: Uma Abordagem Baseada em Testes de Campo e Análise Computacional.** São Luís, 2026. Dissertação de Mestrado - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Maranhão.

To meet growing demand, transmission technologies need to evolve to offer users a superior TV experience, with high-quality audio and video, greater accessibility, interactivity, and personalized services for fixed and mobile devices. Advanced ISDB-T, developed by NHK, is an evolution of the ISDB-T standard, already used in Brazil, and incorporates MIMO technology to increase flexibility, robustness, and spectral efficiency, adapting better to different transmission and reception conditions. This study evaluates the channel's performance through field tests in 30 strategic locations in the city of Rio de Janeiro, with MIMO reception scenarios using a 2x2 transmission configuration. The analysis focuses on essential parameters to assess the system's robustness under different reception conditions. The main metrics considered include the received signal level, the C/N ratio, the coherence bandwidth, the condition number, and the MER. The results indicated that evaluating the channel condition number is fundamental for MIMO performance analysis, with values closer to 1 tending to be associated with higher MER values, showing that well-conditioned channels favor equalization and result in more robust reception. Most points showed excellent performance, even in complex environments, while some specific locations registered degradation due to more severe propagation conditions. It should be noted that, even in proximity to the transmitter, points 29 and 30 showed inferior performance due to shadowing in the reception environment. Overall, the integrated analysis of metrics proved essential for understanding channel behavior, supporting coverage planning, and guiding system optimization in real-world scenarios, contributing to the development and improvement of TV 3.0.

Keywords: Advanced ISDB-T; Condition Number; MER; MIMO 2X2; C/N Ratio; Coherence Band.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arquitetura de quadros organizada em camadas hierárquicas	27
Figura 2. Diagrama de Blocos do ISDB-T Avançado	29
Figura 3. Perfil de Potência de Retardos	31
Figura 4. Exemplo de Perfil de Potência de Retardos	34
Figura 5. Sistema Mimo 2x2	37
Figura 6. Constelação Com Alto Valor de MER.....	45
Figura 7. Constelação Com Baixo Valor de MER	46
Figura 8. Distribuição Geográfica dos Pontos e do Transmissor	53
Figura 9. Infraestrutura de Transmissão	55
Figura 10. Infraestrutura de Recepção.....	56
Figura 11. Caixa RF	58
Figura 12. Fluxograma	60
Figura 13. Potência de Recepção por Polarização.....	67
Figura 14. Limiar de Recepção por Polarização.....	68
Figura 15. Potência em Relação ao Limiar - Polarização H.....	69
Figura 16. Potência em Relação ao Limiar - Polarização V.....	69
Figura 17. Quantidade de Multipercurso por Polarização	70
Figura 18. Retardo Médio por Polarização.....	70
Figura 19. Retardo RMS por Polarização.....	71
Figura 20. Classificação do Tipo de Desvanecimento	72
Figura 21. C/N por Ponto de Medição.....	72
Figura 22. Número de Condição Médio por Ponto de Medição.....	73
Figura 23. MER por Ponto de Medição.....	73
Figura 24. Imagem de satélite do Ponto 1	75
Figura 25. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 01.....	75
Figura 26. Número de Condição – Ponto 01	75
Figura 27. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 01.....	76
Figura 28. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 01	76
Figura 29. Imagem de satélite do Ponto 2	77
Figura 30. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 02.....	77
Figura 31. Número de Condição – Ponto 02	78
Figura 32. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 02.....	78

Figura 33. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 02	78
Figura 34. Imagem de satélite do Ponto 3	79
Figura 35. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 03.....	80
Figura 36. Número de Condição – Ponto 03	80
Figura 37. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 03.....	80
Figura 38. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 03	81
Figura 39. Imagem de satélite do Ponto 4	82
Figura 40. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 04.....	82
Figura 41. Número de Condição – Ponto 04	82
Figura 42. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 04.....	83
Figura 43. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 04	83
Figura 44. Imagem de satélite do Ponto 5	84
Figura 45. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 05.....	84
Figura 46. Número de Condição – Ponto 05	85
Figura 47. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 05.....	85
Figura 48. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 05	85
Figura 49. Imagem de satélite do Ponto 6	86
Figura 50. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 06.....	87
Figura 51. Número de Condição – Ponto 06	87
Figura 52. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 06.....	87
Figura 53. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 06	88
Figura 54. Imagem de satélite do Ponto 7	88
Figura 55. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 07.....	89
Figura 56. Número de Condição – Ponto 07	89
Figura 57. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 07.....	89
Figura 58. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 07	90
Figura 59. Imagem de satélite do Ponto 8	90
Figura 60. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 08.....	91
Figura 61. Número de Condição – Ponto 08	91
Figura 62. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 08.....	91
Figura 63. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 08	92
Figura 64. Imagem de satélite do Ponto 9	92
Figura 65. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 09.....	93
Figura 66. Número de Condição – Ponto 09	93

Figura 67. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 09.....	93
Figura 68. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 09	94
Figura 69. Imagem de satélite do Ponto 10	94
Figura 70. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 10.....	95
Figura 71. Número de Condição – Ponto 10	95
Figura 72. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 10.....	95
Figura 73. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 10	96
Figura 74. Imagem de satélite do Ponto 11	96
Figura 75. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 11.....	97
Figura 76. Número de Condição – Ponto 11	97
Figura 77. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 11.....	97
Figura 78. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 11	98
Figura 79. Imagem de satélite do Ponto 12	98
Figura 80. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 12.....	99
Figura 81. Número de Condição – Ponto 12	99
Figura 82. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 12.....	99
Figura 83. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 12	100
Figura 84. Imagem de satélite do Ponto 13	100
Figura 85. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 13.....	101
Figura 86. Número de Condição – Ponto 13	101
Figura 87. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 13.....	101
Figura 88. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 13	102
Figura 89. Imagem de satélite do Ponto 14	102
Figura 90. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 14.....	103
Figura 91. Número de Condição – Ponto 14	103
Figura 92. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 14.....	103
Figura 93. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 14	104
Figura 94. Imagem de satélite do Ponto 15	104
Figura 95. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 15.....	105
Figura 96. Número de Condição – Ponto 15	105
Figura 97. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 15.....	105
Figura 98. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 15	106
Figura 99. Imagem de satélite do Ponto 16	106
Figura 100. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 16.....	107

Figura 101. Número de Condição – Ponto 16	107
Figura 102. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 16.....	107
Figura 103. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 16	108
Figura 104. Imagem de satélite do Ponto 17	108
Figura 105. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 17.....	109
Figura 106. Número de Condição – Ponto 17	109
Figura 107. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 17.....	109
Figura 108. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 17	110
Figura 109. Imagem de satélite do Ponto 18	110
Figura 110. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 18.....	111
Figura 111. Número de Condição – Ponto 18	111
Figura 112. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 18.....	111
Figura 113. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 18	112
Figura 114. Imagem de satélite do Ponto 19	112
Figura 115. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 19.....	113
Figura 116. Número de Condição – Ponto 19	113
Figura 117. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 19.....	113
Figura 118. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 19	114
Figura 119. Imagem de satélite do Ponto 20	114
Figura 120. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 20.....	115
Figura 121. Número de Condição – Ponto 20	115
Figura 122. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 20.....	115
Figura 123. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 20	116
Figura 124. Imagem de satélite do Ponto 21	116
Figura 125. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 21.....	117
Figura 126. Número de Condição – Ponto 21	117
Figura 127. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 21.....	117
Figura 128. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 21	118
Figura 129. Imagem de satélite do Ponto 22	118
Figura 130. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 22.....	119
Figura 131. Número de Condição – Ponto 22	119
Figura 132. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 22.....	119
Figura 133. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 22	120
Figura 134. Imagem de satélite do Ponto 23	120

Figura 135. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 23.....	121
Figura 136. Número de Condição – Ponto 23	121
Figura 137. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 23.....	121
Figura 138. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 23	122
Figura 139. Imagem de satélite do Ponto 24	122
Figura 140. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 24.....	123
Figura 141. Número de Condição – Ponto 24	123
Figura 142. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 24.....	123
Figura 143. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 24	124
Figura 144. Imagem de satélite do Ponto 25	124
Figura 145. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 25.....	125
Figura 146. Número de Condição – Ponto 25	125
Figura 147. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 25.....	125
Figura 148. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 25	126
Figura 149. Imagem de satélite do Ponto 26	126
Figura 150. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 26.....	127
Figura 151. Número de Condição – Ponto 26	127
Figura 152. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 26.....	127
Figura 153. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 26	128
Figura 154. Imagem de satélite do Ponto 27	128
Figura 155. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 27.....	129
Figura 156. Número de Condição – Ponto 27	129
Figura 157. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 27.....	129
Figura 158. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 27	130
Figura 159. Imagem de satélite do Ponto 28	130
Figura 160. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 28.....	131
Figura 161. Número de Condição – Ponto 28	131
Figura 162. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 28.....	131
Figura 163. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 28	132
Figura 164. Imagem de satélite do Ponto 29	132
Figura 165. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 29.....	133
Figura 166. Número de Condição – Ponto 29	133
Figura 167. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 29.....	133
Figura 168. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 29	134

Figura 169. Imagem de satélite do Ponto 30	134
Figura 170. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 30.....	135
Figura 171. Número de Condição – Ponto 30	135
Figura 172. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 30.....	135
Figura 173. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 30	136
Figura 174. Análise da Correlação entre Potência de Recepção e MER.....	137
Figura 175. Análise da Correlação entre Potência de Recepção e C/N.....	137
Figura 176. Análise da Correlação entre Potência de Recepção e Número de Condição	138
Figura 177. Análise da Correlação entre Potência de Recepção e Banda de Coerência	139
Figura 178. Análise da Correlação entre Multipercurso e Retardo Médio.....	140
Figura 179. Análise da Correlação entre Multipercurso e Retardo RMS.....	140
Figura 180. Análise da Correlação entre C/N e Número de Condição.....	141
Figura 181. Análise da Correlação entre Número de Condição e Banda de Coerência	142
Figura 182. Análise da Correlação entre C/N e Banda de Coerência.....	143
Figura 183. Análise da Correlação entre Banda de Coerência e MER.....	144
Figura 184. Análise da Correlação entre C/N e MER	144
Figura 185. Análise da Correlação entre Número de Condição e MER	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de transmissão do ISDB-T Avançado.....	28
Tabela 2. Parâmetros do ISDB-T Avançado por tamanho de FFT	29
Tabela 3. Comparativo ZF, MMSE e ML	40
Tabela 4. Principais Diferenças dos Parâmetros de Qualidade	46
Tabela 5. Pontos de Medições	50
Tabela 6. Parâmetros de Transmissão do ISDB-T Avançado	54
Tabela 7. Ganhos e Perdas entre os Ramos na Caixa de RF	58
Tabela 8. Perdas e Ganhos do Transmissor	59
Tabela 9. Perdas e Ganhos do Receptor	59
Tabela 10. Potência de Recepção e Limiar de Recepção	63
Tabela 11. Multipercurso e Retardo Médio.....	64
Tabela 12. Retardo RMS e Banda de Coerência	65
Tabela 13. C/N, MER e Número de Condição	66

LISTA DE ABREVIATURAS

ATSC 3.0	<i>Advanced Television Systems Committee 3.0</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BCH	<i>Bose–Chaudhuri–Hocquenghem code</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BIT	<i>Binary Digit</i>
BICM	<i>Bit-Interleaved Coded Modulation</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CB	<i>Carrier Bonding</i>
CFAR	<i>Constant False Alarm Rate</i>
C/N	<i>Relação Portadora-Ruído</i>
DB	<i>Decibel</i>
DBM	<i>Decibel-milliwatts</i>
DTTB	<i>Digital Terrestrial Television Broadcasting</i>
DTV	<i>Digital Terrestrial</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
ERB	<i>Estação Rádio Base</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
H/V	<i>Polarização Horizontal/Vertical</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
IEEE	<i>Institute of electrical and electronics engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IQ	<i>In-phase and Quadrature</i>

ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial</i>
ISDB-Tb	<i>Versão brasileira do padrão ISDB-T</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union – Recommendation</i>
LDPC	<i>Low-Density Parity-Check</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
MATLAB	<i>Matrix laboratory</i>
Mcom	<i>Ministérios das Comunicações</i>
MER	<i>Modulation Error Ratio</i>
MIMO	<i>Multiple Input, Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple Input, Single Output</i>
ML	<i>Maximum Likelihood</i>
MMSE	<i>Minimum Mean Square Error</i>
MMT	<i>MPEG Media Transport</i>
NFFT	<i>Number of FFT points</i>
NHK	<i>Japan Broadcasting Corporation</i>
NLOS	<i>Non Line of Sight</i>
NUC	<i>Non-Uniform Constellation</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency – Division Multiplexing</i>
PDP	<i>Power Delay Profile</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PRBS	<i>Pseudo-Random Binary Sequence</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QEF	<i>Quasi Error Free</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SBTVD	<i>Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre</i>

SFN	<i>Single Frequency Network</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
STC	<i>Space-Time Coding</i>
TLV	<i>Type-Length-Value</i>
TS	<i>Transport Stream</i>
UHDTV	<i>Ultra High Definition Television</i>
ZF	<i>Zero-Forcing</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Contextualização e Motivação	20
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivos Geral.....	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
1.3	Metodologia e Abordagem.....	22
1.4	Aplicabilidade	23
1.5	Organização do Trabalho	23
2	ISDB-T AVANÇADO	24
2.1	Evolução da TV Digital e o ISDB-T	24
2.2	Sistema de Transmissão	26
2.3	Hierarquia de Camadas	26
2.4	Camada Física e Estrutura de Transmissão.....	27
3	CANAL DE PROPAGAÇÃO MIMO	29
3.1	Resposta ao Impulso.....	30
3.1.1	Perfil de Potência de Retardos.....	30
3.1.2	Banda de Coerência.....	34
3.2	Resposta em Frequência.....	35
3.2.1	MIMO.....	36
3.2.1.1	Número de Condição.....	41
4	PARÂMETROS DE QUALIDADE	42
4.1	Relação C/N	42
4.2	Limiar de Recepção.....	43
4.3	MER	44
5	TRABALHOS RELACIONADOS.....	47

6	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	49
6.1	Definição do Ambiente Experimental.....	49
6.2	Escolha e Caracterização dos Locais de Testes.....	50
6.3	Configuração do Sistema de Testes.....	53
6.4	Procedimento de Coleta de Dados.....	59
6.5	Desenvolvimento e Aplicação do Código MATLAB	61
7	RESULTADOS	62
7.1	Apresentação Geral dos Dados.....	62
7.2	Avaliação do Canal e do Desempenho da Recepção MIMO	74
7.3	Análise Correlacional entre Métricas de Desempenho do Sistema MIMO ...	136
7.4	Discussão dos Resultados.....	145
8	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	147
8.1	Resumo das Contribuições do Estudo	147
8.2	Implicações Práticas dos Resultados	147
8.3	Limitações do Estudo	148
8.4	Recomendações para Trabalhos Futuros	148
9	REFERÊNCIAS	150
	ANEXO A - Código Desenvolvido em MATLAB	156

1 INTRODUÇÃO

Estamos passando por uma revolução tecnológica impulsionada pelos avanços em ciência de dados e telecomunicações, especialmente nas comunicações móveis. Nesse cenário, as tecnologias de transmissão precisam evoluir para proporcionar aos usuários uma experiência de TV, com melhor qualidade de áudio e vídeo, além de maior flexibilidade na recepção de sinal em dispositivos fixos e móveis. Além disso, as novas aplicações de TV demandam serviços mais acessíveis, personalizados e interativos, aprimorando ainda mais a experiência do usuário [1].

A crescente demanda por serviços de TV multimídia de alta qualidade, como vídeo, áudio e dados, fez com que os pesquisadores alcançassem importantes resultados, como a realização bem-sucedida de experimentos de transmissão em 8K utilizando modulação de ordem superior e tecnologias MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) [2]. Inclui transmissões simultâneas para recepção fixa e alta definição para recepção móvel, dentro de um espectro de rádio limitado [3].

1.1 Contextualização e Motivação

Segundo [4], a evolução dos padrões de transmissão digital deve levar em consideração não apenas os avanços tecnológicos, mas também sua aplicação em condições reais de uso, garantindo a viabilidade prática antes de uma adoção em larga escala.

A crescente demanda por transmissões de alta qualidade impulsiona a necessidade de técnicas avançadas para avaliar e melhorar o desempenho do sistema. Como profissional e estudante na área de Telecomunicações, há um interesse particular em compreender os desafios da recepção MIMO e como as métricas de qualidade e desempenho podem impactar a qualidade do sinal. Além disso, a análise desses parâmetros pode fornecer detalhes importantes para futuras otimizações na transmissão digital terrestre.

A realização desse estudo contribui para uma análise mais realista dos desafios enfrentados na implementação do sistema em grandes centros urbanos e áreas críticas para a recepção do sinal. A cidade do Rio de Janeiro foi estrategicamente escolhida devido à sua topografia complexa e diversidade, fatores que impactam diretamente a propagação do sinal e a qualidade da transmissão. Regiões com edificações e vegetações elevadas, além de terrenos acidentados, representam um desafio significativo para a recepção do sinal digital, tornando essencial a análise de soluções para mitigar problemas de interferência e multipercurso.

Os resultados obtidos nesta pesquisa serão de grande relevância para futuras aplicações em todo o território nacional, promovendo a otimização das transmissões de TV digital no Brasil e, conseqüentemente, impulsionando o avanço tecnológico e trazendo benefícios à sociedade.

1.2 Objetivos

Este estudo tem como objetivo analisar o desempenho em cenários urbanos complexos, considerando a influência da tecnologia MIMO e suas implicações. A investigação será baseada na avaliação de métricas fundamentais como MER (*Modulation Error Ratio*), banda de coerência e número de condição, além de outras métricas e variáveis que influenciam a robustez e eficiência do sistema. Os resultados obtidos servirão para compreender o impacto da transmissão MIMO na qualidade do sinal em diversos cenários e fornecerão detalhes importantes para a evolução das tecnologias de TV digital.

1.2.1 Objetivos Geral

Avaliar, por meio de testes de campo e análise computacional, o desempenho do sistema em condições reais de transmissão e recepção em um ambiente urbano complexo, analisando como as métricas utilizadas e a tecnologia MIMO contribui para a robustez e eficiência espectral do sistema. Além disso, o estudo visa fornecer subsídios técnicos que possam ser aproveitados no desenvolvimento e otimização da TV 3.0 no Brasil, destacando os impactos na qualidade do sinal.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o ambiente em 30 locais estratégicos na cidade do Rio de Janeiro, considerando diversos cenários;
- Analisar o desempenho do sistema em ambientes desafiadores, verificando se o sistema mantém eficiência de demodulação em condições adversas;
- Desenvolver e aplicar um código em MATLAB para processar e interpretar os dados coletados, extraindo informações relevantes para a análise da eficiência do sistema;
- Investigar o impacto da relação portadora-ruído (C/N), MER, número de condição, banda de coerência e outras métricas na recepção, avaliando sua influência na robustez da transmissão em diversos cenários;

- Fornecer recomendações baseadas nos resultados obtidos, visando contribuir para futuras melhorias nos padrões de TV digital, especialmente na adaptação do ATSC 3.0 (*Advanced Television Systems Committee 3.0*) ao cenário brasileiro.

1.3 Metodologia e Abordagem

No cenário de transição para a próxima geração da TV digital, conhecida como TV 3.0, destaca-se o Decreto n.º 11.484, de 6 de abril de 2023, que estabelece as diretrizes para a evolução do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD) e assegura a disponibilidade do espectro de radiofrequências necessário para sua implementação. Esse decreto também propõe a criação de um Grupo de Trabalho responsável por conduzir os estudos técnicos que subsidiarão a regulamentação e adoção da nova tecnologia no país [5].

Este trabalho está fundamentado nos testes realizados durante a fase 3 da avaliação da camada física, conduzida pelo Fórum SBTVD, que tem desempenhado um papel central no desenvolvimento e validação dos padrões técnicos da TV 3.0 no Brasil [6]. O estudo é fundamentado em medições de campo realizadas em 30 pontos distintos da cidade do Rio de Janeiro, contemplando uma ampla variedade de cenários de propagação. A coleta de dados foi conduzida por uma equipe especializada, utilizando equipamentos devidamente calibrados para assegurar a máxima precisão nas medições.

Os dados foram capturados e processados, posteriormente analisados por um código desenvolvido em MATLAB, permitindo a extração e avaliação de métricas como potência de recepção, limiar de recepção, relação C/N, MER, número de condição do canal, retardo médio, retardo RMS e banda de coerência. Essa abordagem possibilitou uma investigação aprofundada dos impactos do ambiente de propagação nas características do canal MIMO 2x2, fornecendo subsídios para aprimoramentos na recepção do sistema. Esse processamento permite uma avaliação aprofundada das métricas envolvidas, fornecendo informações valiosas.

O transmissor foi instalado no topo do morro da estação Penna. O ambiente em que as medições foram realizadas, é caracterizado por terrenos irregulares e áreas de sombra eletromagnética, onde a difração desempenha um papel crucial. Foram analisados diferentes cenários para avaliar a recepção, incluindo áreas costeiras, onde grandes massas de água podem afetar a propagação, zonas urbanas entre edificações, com e sem tráfego de veículos, sujeitas a reflexões e interferências, e regiões com vegetação densa, onde árvores e plantas podem causar atenuação e dispersão do sinal. Esses testes permitem

compreender melhor o comportamento do sistema em diferentes condições de propagação e interferência.

1.4 Aplicabilidade

Os resultados deste estudo possuem ampla aplicabilidade, contribuindo para uma melhor compreensão dos desafios enfrentados em diferentes cenários de propagação. A análise das métricas obtidas possibilita ajustes precisos nos parâmetros de transmissão, auxiliando na mitigação de interferências e na otimização da qualidade do sinal.

Além disso, os achados desta pesquisa são valiosos para o planejamento e a implementação de infraestrutura de telecomunicações, permitindo a alocação estratégica de torres e transmissores para maximizar a cobertura e minimizar áreas de sombra eletromagnética. O estudo também contribui para o desenvolvimento de novas técnicas de transmissão, sendo uma referência para futuras melhorias e sua adaptação a diferentes condições topográficas e urbanas.

Por fim, os dados coletados podem ser utilizados por emissoras e órgãos reguladores para aperfeiçoar a eficiência espectral e a robustez do sistema, garantindo uma transmissão de sinal mais confiável, especialmente em regiões de alta densidade urbana ou em áreas com desafios geográficos significativos.

1.5 Organização do Trabalho

Parte dos resultados apresentados nesta dissertação foi consolidado e submetido para avaliação científica. Em especial, destaca-se o artigo “MIMO System Performance for Digital TV in Complex Urban Environments: Preliminary Results Based on Field Measurements”, aceito para publicação no congresso internacional International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2025), o qual apresenta uma análise parcial dos resultados obtidos neste trabalho. Os capítulos correspondentes foram aprimorados e ampliados para compor a presente versão da dissertação.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta os fundamentos do ISDB-T Avançado, incluindo sua evolução, a estrutura de transmissão e os principais elementos da camada física, fornecendo a base necessária para a compreensão do ambiente tecnológico em que a análise MIMO é aplicada. No Capítulo 3, discute-se o canal de propagação MIMO, abordando a resposta ao impulso, o perfil de potência de retardos, a banda de coerência e a resposta em frequência, incluindo a análise da matriz

MIMO e do número de condição, métrica essencial para avaliação da estabilidade do sistema. O Capítulo 4 descreve os parâmetros de qualidade utilizados na avaliação do desempenho do sistema, incluindo relação C/N, limiar de recepção e MER, que servem como métricas comparativas nas análises realizadas. O Capítulo 5 reúne os trabalhos relacionados, apresentando estudos relevantes da literatura que tratam de MIMO, recepção digital, caracterização de canal e métricas de desempenho, permitindo situar a presente pesquisa no estado da arte. No Capítulo 6, é detalhada a metodologia experimental, contemplando a descrição do ambiente e dos locais de teste, a configuração do sistema de medição, os procedimentos adotados para coleta de dados e o desenvolvimento do código em MATLAB utilizado na análise dos dados obtidos. O Capítulo 7 apresenta os resultados da pesquisa, incluindo a organização e apresentação geral dos dados coletados, a avaliação do canal e do desempenho da recepção MIMO, a análise correlacional das métricas de desempenho e, por fim, a discussão dos principais achados. O Capítulo 8 reúne as conclusões e discute as contribuições do estudo, suas implicações práticas, limitações e recomendações para trabalhos futuros. Por fim, os Apêndices reúnem os programas em MATLAB desenvolvidos para análise e correlação dos resultados.

2 ISDB-T AVANÇADO

2.1 Evolução da TV Digital e o ISDB-T

A Transmissão Digital de Serviços Integrados – Terrestre (ISDB-T, *Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial*) é um padrão de transmissão que oferece serviços de TV em alta definição (HDTV) e foi adotado em 20 países ao redor do mundo [7], [8]. No Japão, as transmissões de TV em ultra-alta definição (4K/8K, UHD TV) via satélite foram inauguradas em 1º de dezembro de 2018. Paralelamente, foram realizados amplos estudos sobre um sistema de transmissão de televisão digital terrestre (DTTB) de próxima geração, tanto no Japão quanto em outras partes do mundo. Desde 2007, a Japan Broadcasting Corporation (NHK) tem investido em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de alta capacidade para a transmissão terrestre de UHD TV [2], [9], [10], [11].

A versão aprimorada do ISDB-T, denominada ISDB-T Avançado, teve seu início no Japão, foi baseado no padrão ISDB-T, que é amplamente utilizado para recepção fixa e móvel. Utiliza a multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) com intercalação de tempo e frequência. Se torna resistente a ecos causados por obstáculos e à variação da intensidade do sinal em cenários de recepção móvel [3]. O ISDB-T Avançado

visa melhorar a eficiência espectral em relação ao ISDB-T. O sistema permite ajustes flexíveis nos parâmetros de transmissão e inclui múltiplos padrões [12].

A evolução da TV digital no Brasil marca um avanço significativo tanto no campo tecnológico quanto político, trazendo benefícios como qualidade aprimorada de imagem e som, maior interatividade e eficiência no uso do espectro. O SBTVD, também conhecido como ISDB-Tb, foi desenvolvido a partir do padrão japonês ISDB-T, com a inclusão de inovações para atender às particularidades do país. De acordo com [13], a escolha do ISDB-T como base para o sistema brasileiro foi fruto de anos de estudos e negociações, levando em consideração aspectos técnicos e estratégicos.

A TV digital difere da analógica pela utilização de transmissão de sinais codificados em formato binário, permitindo maior qualidade e eficiência. O padrão ISDB-T, adotado pelo Brasil, permite segmentação de banda e transmissão para dispositivos móveis, garantindo flexibilidade na recepção. Segundo [14], a modulação OFDM utilizada pelo ISDB-T possibilita maior resistência a interferências e melhor desempenho em áreas urbanas com multipercurso.

A transição da TV analógica para a digital no Brasil começou com a definição do modelo tecnológico mais adequado. Em 1998, iniciaram-se os estudos para a escolha do padrão de TV digital, culminando na definição do ISDB-T como base para o padrão brasileiro em 2006 [15]. A implementação ocorreu de forma gradual, conforme previsto pelo Fórum do SBTVD, com o desligamento do sinal analógico concluído em grande parte do país em 2023. No entanto, o Ministério das Comunicações (MCom) publicou, em dezembro de 2023, a Portaria n.º 11.476, que estendeu o prazo para junho de 2025 em 1.265 cidades que ainda não estavam totalmente digitalizadas ou possuíam pendências de consignação. Em 15 de dezembro de 2023, o MCom encerrou as transmissões analógicas em 2.933 municípios, beneficiando mais de 31,2 milhões de brasileiros com acesso à TV digital de maior qualidade [16].

O Brasil adaptou esse sistema ao desenvolver o SBTVD e incorporou o middleware ginga, que permite interatividade [17]. A introdução da TV digital trouxe melhorias na qualidade de transmissão, incluindo maior resolução, redução de interferências e melhor recepção em mobilidade [18]. Com o middleware ginga, foi possível desenvolver aplicações interativas, ampliando o acesso à educação e serviços públicos via TV [17]. Além disso, a digitalização impulsionou investimentos em infraestrutura e abriu oportunidades para novos conteúdos e serviços, como TV móvel e multiprogramação [19].

A implementação do SBTVD enfrentou uma série de desafios técnicos, econômicos e sociais. Entre eles, destaca-se o alto custo de migração, que impactou tanto as emissoras, que precisaram investir em novas tecnologias e equipamentos, quanto os usuários, que tiveram que adquirir televisores compatíveis ou conversores para manter o acesso ao sinal digital. Além disso, a transição exigiu uma infraestrutura robusta para garantir uma cobertura eficiente em todo o território nacional, incluindo áreas remotas e de difícil acesso. Outro aspecto fundamental foi a necessidade de políticas públicas para viabilizar a distribuição de conversores digitais às populações de baixa renda, assegurando a inclusão digital e evitando a exclusão de telespectadores durante o processo de migração [13].

A adoção da TV digital no Brasil, baseada no ISDB-T, representa um avanço significativo na radiodifusão. Com melhorias na qualidade do sinal, interatividade e maior eficiência espectral, o SBTVD consolidou-se como uma solução adaptada às necessidades do país. O futuro da TV digital brasileira envolve a evolução para padrões mais avançados e a integração com novas tecnologias, garantindo sua relevância e expansão nos próximos anos.

2.2 Sistema de Transmissão

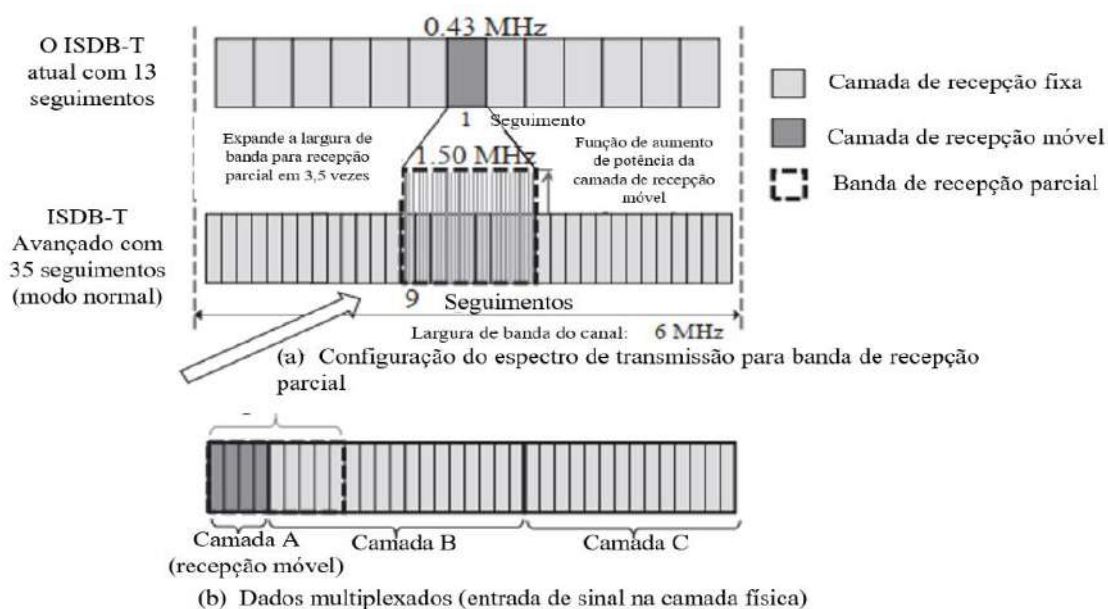
A NHK propôs o 'ISDB-T Avançado', um sistema que ajusta diversos parâmetros do padrão anterior [7], [10], como a largura de banda ocupada, o esquema de modulação e o tamanho da FFT (Fast Fourier Transform), visando aumentar a capacidade de transmissão. A largura de banda no sistema foi expandida em cerca de 5% em relação ao ISDB-T original. Além disso, modulação por Amplitude em Quadratura (QAM) de ordem superior, como 256-QAM, 1024-QAM e 4096-QAM, foram adicionadas ao novo sistema [20], [9]. Além do modo MIMO para aumentar a capacidade de transmissão e otimizar o desempenho [11], foram incorporadas tecnologias de transmissão mais modernas, aprimoramentos no código de correção de erros (FEC), código de verificação de paridade de baixa densidade (LDPC) e a constelação não uniforme (NUC) [9], [10]. Para alcançar maior eficiência espectral [21], a retransmissão em estações utilizando Rede de Frequência Única (SFN) é essencial para os sistemas DTTB [2].

2.3 Hierarquia de Camadas

O ISDB-T Avançado tem a capacidade de transmitir até três camadas distintas (A, B e C), conforme ilustrado na Figura 1, cada uma com diferentes níveis de capacidade de transmissão e robustez. No entanto, enquanto o ISDB-T possui 13 segmentos, o ISDB-T

Avançado expande esse número para 35, permitindo uma alocação de segmentos muito mais flexível para cada camada. Dessa forma, tanto a capacidade de transmissão quanto a relação sinal-ruído necessária podem ser ajustadas de maneira mais versátil [9]. Isso proporciona às emissoras maior liberdade para ajustar a capacidade de transmissão e a robustez de cada camada, de acordo com as exigências de cada serviço. O ISDB-T Avançado também permite a escolha independente de parâmetros de transmissão, como esquema de modulação, taxa de codificação, comprimento da intercalação temporal, razão piloto e número de segmentos para cada camada, garantindo uma transmissão mais eficiente e personalizada [2].

Figura 1. Arquitetura de quadros organizada em camadas hierárquicas



Fonte: [3].

2.4 Camada Física e Estrutura de Transmissão

O ISDB-T Avançado utiliza a modulação OFDM, que apresenta ótimo desempenho na transmissão e que proporciona grande resistência à propagação por multipercurso [9], mesmo em condições adversas. Ele utiliza uma estrutura segmentada, onde a banda de um sinal OFDM é dividida em blocos, chamados de "segmentos OFDM", que servem como unidades de transmissão de dados. Essa segmentação permite que os sinais OFDM sejam parcialmente recebidos, o que significa que apenas uma parte do espectro pode ser demodulada e decodificada por um receptor de banda estreita. Com a combinação de múltiplos segmentos OFDM, é possível configurar de maneira flexível a largura de banda

necessária para o serviço, permitindo a transmissão simultânea de conteúdo para recepção fixa e móvel dentro de um único canal [3].

O esquema de transporte de mídia no ISDB-T Avançado utiliza o MPEG Media Transport (MMT) e o formato Type-Length-Value (TLV), ambos adotados para a transmissão de conteúdos em 4K e 8K, classificadas como UHDTV. Como o MMT é um protocolo de transporte de mídia baseado no protocolo da internet (IP), o ISDB-T Avançado pode integrar facilmente serviços que combinam a transmissão tradicional com comunicação por pacotes IP [2].

Os parâmetros de transmissão estão apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, enquanto o diagrama de bloco é ilustrado na Figura 2. O ISDB-T Avançado opera em dois modos de largura de banda: modo normal e modo compatível. O modo normal tem uma largura de banda de canal de 5,83 MHz, e o modo compatível que é de 5,57 MHz. Os dados de entrada passam por processos como, codificação com classe cíclica, códigos de correção de erro que são construídos usando corpos finitos Bose–Chaudhuri–Hocquenghem (BCH) e codificação LDPC, intercalação de bits e mapeamento. Para transmissões MIMO, as subportadoras são divididas entre dois transmissores e, após a combinação das três camadas, ocorre a intercalação de tempo e frequência. Um quadro OFDM é então construído com subportadoras de dados, sinais piloto e de controle, seguido pelo processamento FFT e a inserção de um intervalo de guarda. A intercalação de polarização pode gerar ganhos, especialmente quando há diferenças na relação C/N entre as polarizações [11].

Tabela 1. Parâmetros de transmissão do ISDB-T Avançado

Modulação	OFDM
Largura de banda do canal	6 MHz
Largura de banda ocupada	Modo Normal: 5,83 MHz Modo Compatível: 5,57 MHz
Número de segmentos	Modo Normal: 35 Modo Compatível: 33 + bandas de ajuste
Taxa SP	1/3, 1/6, 1/12, 1/24, 1/48
Modulação das subportadoras	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, 1024QAM, 4096QAM (UC, NUC)
Código interno	Código LDPC
Código externo	Código BCH
Sistema	SISO, MIMO, MISO

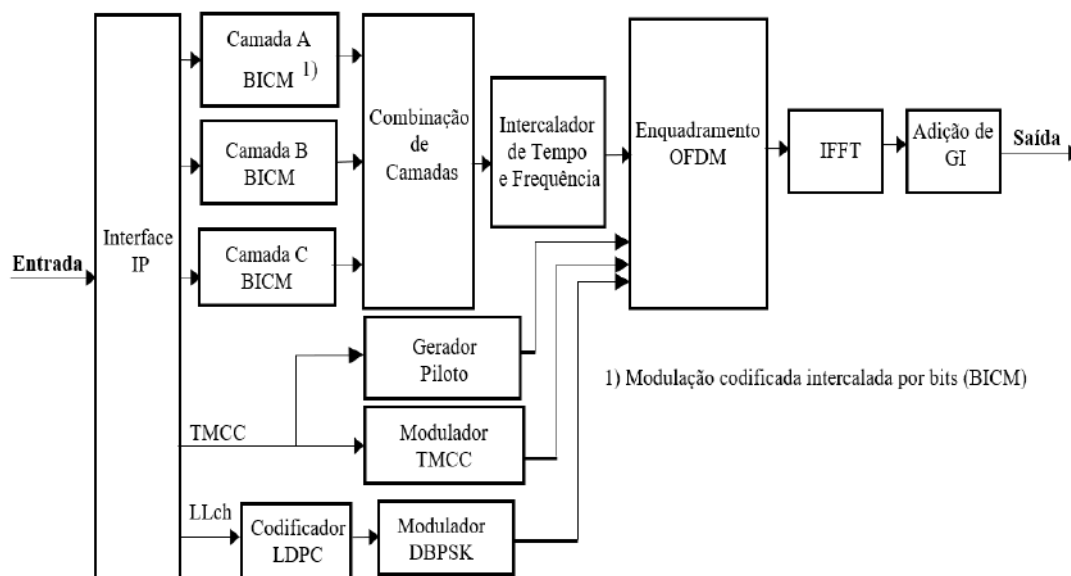
Fonte: [11]

Tabela 2. Parâmetros do ISDB-T Avançado por tamanho de FFT

Tamanho FFT (NFFT)	8,192	16,384	32,768
Número de sub-portadoras	7,561	15,121	30,241
Duração do símbolo (μ s)	1,296	2,592	5,184
Proporção do Intervalo de Guarda (GI)	1/4,1/8,800/NFFT	1/4,1/8,1/16,800/NFFT	1/8,1/16,1/32,800/NFFT

Fonte: [11] Adaptado.

Figura 2. Diagrama de Blocos do ISDB-T Avançado



Fonte: [11]

Os resultados do ISDB-T Avançado, conforme [9], indicam que os parâmetros adotados permitem atingir a menor relação C/N necessária para manter a mesma capacidade de transmissão. Além disso, demonstram que é possível aumentar a capacidade de transmissão em aproximadamente 10 Mbps sem alterar a relação C/N. Observa-se também uma melhoria de cerca de 7 dB na relação C/N requerida para preservar a mesma taxa de transmissão.

3 CANAL DE PROPAGAÇÃO MIMO

O canal de propagação desempenha um papel fundamental no desempenho dos sistemas de comunicações sem fio, influenciando diretamente a taxa de erro, a capacidade e a confiabilidade da transmissão. As variações que ocorrem no meio de propagação,

como reflexões, difrações, espalhamento e atenuações, podem causar interferências construtivas e destrutivas no sinal recebido, resultando em fenômenos como o desvanecimento. Esses efeitos tornam o ambiente de transmissão altamente dinâmico e imprevisível [22].

A crescente demanda por altas taxas de transmissão em sistemas de comunicação sem fio tem como consequência a interferência intersimbólica (ISI), a qual compromete a qualidade do sinal recebido [23]. Nesse contexto, as técnicas MIMO surgem como solução promissora, proporcionando maior eficiência espectral e robustez contra o desvanecimento. O sucesso dessas técnicas depende do uso de equalizadores no receptor, que visam recuperar os símbolos transmitidos simultaneamente por múltiplas antenas [24].

3.1 Resposta ao Impulso

A resposta ao impulso do canal descreve como um sinal transmitido sofre distorções temporais devido à presença de multipercurso. Essa resposta é fundamental para caracterizar o canal em sistemas OFDM, pois define a dispersão temporal e, consequentemente, a ISI. Em ambientes urbanos, o canal apresenta multipercurso com atrasos distintos, o que resulta em diferentes contribuições do mesmo símbolo chegando em tempos diferentes [25].

3.1.1 Perfil de Potência de Retardos

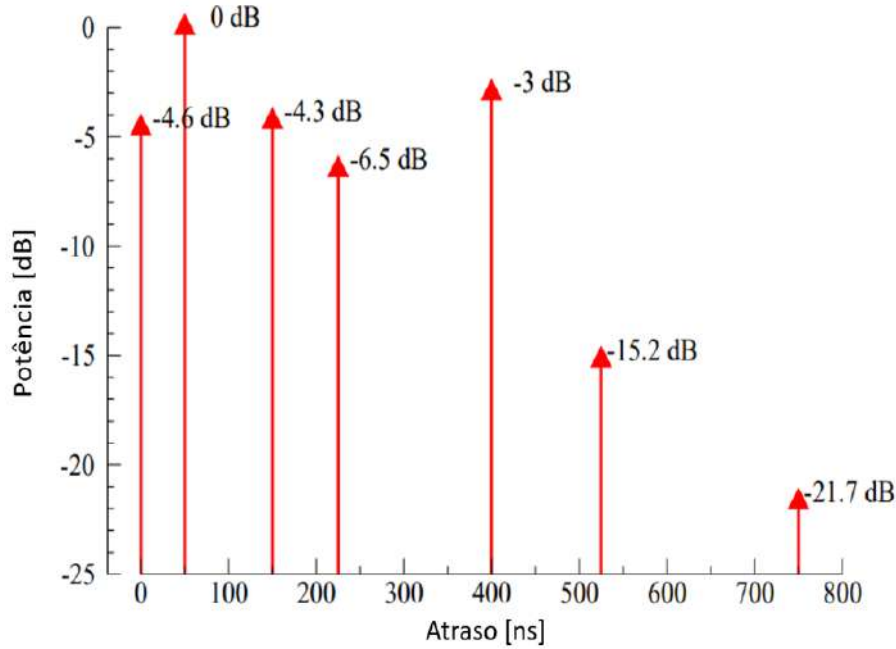
A caracterização do canal de banda larga fornece parâmetros essenciais para compreender os efeitos negativos causados pela dispersão temporal, especialmente em ambientes com multipercurso [22].

Em ambientes de comunicação sem fio, especialmente em cenários móveis, o sinal transmitido raramente percorre um único caminho direto até o receptor. Devido à presença de obstáculos como edifícios, árvores e veículos, o sinal sofre diversos mecanismos de propagação, incluindo reflexão, difração e espalhamento. Como consequência, múltiplas réplicas do sinal original chegam ao receptor por trajetos distintos, cada uma com diferentes atrasos e níveis de potência.

A presença de multipercurso provoca o espalhamento temporal do sinal, que pode degradar o desempenho do sistema de comunicação, devido à ISI. Para caracterizar esse comportamento do canal, utiliza-se o perfil de potência de retardos, que representa a distribuição estatística da potência média recebida em função do atraso relativo de cada

trajeto [22]. Na Figura 3, é ilustrado um exemplo típico do perfil de potência de retardos, evidenciando as principais componentes do sinal em diferentes atrasos.

Figura 3. Perfil de Potência de Retardos



Fonte: [26]

A partir da resposta ao impulso do canal, obtém-se o perfil de potência de retardos (PDP), que identifica os componentes de multipercurso. Com os componentes multipercurso identificados, é possível calcular o retardo médio (*mean excess delay*), espalhamento de retardo RMS (*RMS delay spread*) e o retardo máximo (*excess delay spread*) para cada PDP [20].

a) Retardo Médio

Representa o atraso médio da propagação das componentes retardadas em relação à primeira componente que chega ao receptor, caracterizando assim o primeiro momento do perfil de potência de retardos. A definição matemática desse parâmetro é apresentada na equação 3.1 [22].

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3.1)$$

onde τ_k é o retardo de propagação da k-ésima onda, ou seja, trata-se da diferença no tempo de chegada das componentes do sinal em comparação com a primeira que atinge o receptor ($\tau_0 = 0$) e $P(\tau_k)$, corresponde à potência da componente k, que chega ao receptor com um atraso de τ_k .

b) Espalhamento de Retardo RMS, ou Simplesmente Retardo RMS

Quantifica o espalhamento temporal do perfil de potência de retardos em torno do retardo médio. Corresponde à raiz quadrada do segundo momento central do perfil de potência de retardos. O cálculo do espalhamento de retardo RMS é obtido pela expressão matemática apresentada na equação 3.2 [22], [27].

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (3.2)$$

onde $\overline{\tau^2}$ é definido conforme apresentado na equação 3.3.

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3.3)$$

sendo:

$P(\tau_k)$ = potencia da componente k de multipercurso.

τ_k = atraso de propagação da k-ésima onda em relação à chegada do primeiro sinal.

τ = retardo médio.

dessa forma, o espalhamento de retardo RMS é representado matematicamente pela equação 3.4 [28].

$$\sigma_\tau = \sigma_{rms} = \frac{\sum_k (\tau_k - \bar{\tau})^2 P(\tau_k)}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3.4)$$

c) Retardo Máximo

Representa o retardo máximo observado entre a primeira componente do sinal recebida e aquela cuja energia se encontra um determinado número de decibéis abaixo do

nível de potência máximo recebido. A sua definição matemática é apresentada na equação 3.5[27], [29]

$$\tau_{max}(X) = \tau_x - \tau_0 \quad (3.5)$$

sendo:

τ_0 = tempo de recepção do primeiro sinal.

τ_x = tempo em que a última réplica do sinal cujo o nível de potencia se mantem acima do limite X dB e abaixo do sinal de maior amplitude.

O retardo máximo refere-se à duração temporal do canal de propagação acima de um determinado limiar de recepção. O valor correspondente a τ_x é, por vezes, denominado retardo máximo. Esse parâmetro estabelece um critério de referência entre o nível de ruído proveniente do multipercurso e as componentes de maior potência recebidas por esse mesmo fenómeno. Na prática, os valores associados a esse tipo de dispersão temporal variam conforme o limiar de potência adotado durante o processamento do perfil de potência de retardos $P(\tau_k)$. É importante destacar que o limiar escolhido não deve ser excessivamente baixo, a fim de evitar que o ruído seja interpretado como sinal útil de multipercurso, o que poderia resultar na superestimação dos valores de espalhamento [27], [29].

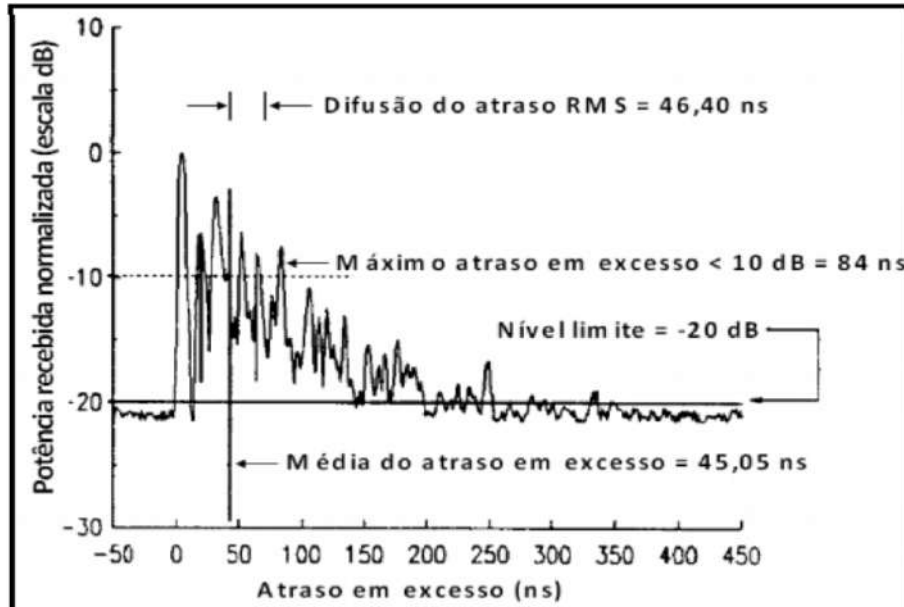
d) Técnica Constant False Alarm Rate (CFAR)

A técnica CFAR, originalmente concebida para aplicações em sistemas de radar com o objetivo de identificar ruídos interpretados incorretamente, também foi empregada na detecção de ruído no perfil de potência de retardos. Durante a aplicação do CFAR, é estabelecido um limiar que define a região com maior probabilidade de conter componentes válidas do sinal, atuando como critério para distinguir entre sinais úteis e ruído de fundo [22].

Esse limiar de ruído pode ser definido como a diferença entre o valor máximo de potência de todo o perfil de potência de retardos e a média desse mesmo perfil somada ao seu desvio padrão. O método de limpeza baseado em CFAR tem sido amplamente utilizado na literatura científica [22] [27].

A Figura 4 apresenta um exemplo de perfil de potência de retardos, no qual são destacados o espalhamento de retardo RMS, retardo médio, retardo máximo (10 dB) e nível de limiar (-20 dB).

Figura 4. Exemplo de Perfil de Potência de Retardos



Fonte: [29]

3.1.2 Banda de Coerência

A banda de coerência pode ser compreendida como o intervalo de frequências dentro do qual dois componentes espectrais apresentam elevada correlação em amplitude. Em outras palavras, trata-se da faixa onde o canal propaga os diferentes componentes do sinal com ganho quase uniforme e resposta de fase aproximadamente linear. Embora sua modelagem matemática seja geralmente associada ao espalhamento de retardo RMS, essa relação não é única, sendo apenas uma entre diversas abordagens utilizadas para representar os efeitos da dispersão temporal no canal. Quando se adota como critério a faixa de frequências cuja função de correlação se mantém acima de 90% (ou 0,9), a largura de banda de coerência pode ser estimada por meio da expressão aproximada apresentada na equação 3.6 [22], [27].

$$B_c = \frac{1}{50\sigma_\tau} \quad (3.6)$$

onde:

- σ_τ o espalhamento de retardo RMS.

A banda de coerência também pode ser estimada com base em um critério de correlação superior a 50%. Nesse caso, é comum utilizar a aproximação apresentada na equação 3.7 para representar essa condição [30].

$$B_c = \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (3.7)$$

O espalhamento de retardo RMS possui uma correlação inversa com a banda de coerência, ou seja, à medida que o espalhamento temporal aumenta, a banda de coerência tende a diminuir. Embora comumente utilizadas, as Equações 3.6 e 3.7 fornecem apenas estimativas aproximadas da relação entre a banda de coerência e o espalhamento de retardo RMS [30]. Essa relação, de fato, está condicionada às propriedades específicas da resposta ao impulso do canal e ao tipo de sinal transmitido, não sendo, portanto, uma correspondência exata em todos os casos [22].

Uma das aplicações da banda de coerência está relacionada à caracterização do canal quanto à sua seletividade em frequência. Quando a banda de coerência é inferior à largura de banda do sinal transmitido, o canal é classificado como seletivo em frequência. Nesse caso, diferentes componentes espectrais do sinal sofrem diferentes níveis de atenuação, o que resulta em distorções no sinal recebido e pode ocasionar ISI. Em contrapartida, se a banda de coerência for superior à largura de banda do sinal, o canal é considerado plano ou uniforme em frequência, indicando que todas as componentes do sinal são igualmente afetadas pelo canal. Nessa condição, o sinal mantém sua integridade espectral até o ponto de recepção, sem introdução significativa de distorções [20], [22], [27].

3.2 Resposta em Frequência

A resposta em frequência descreve como cada componente espectral do sinal transmitido é atenuado durante a propagação pelo meio. A resposta em frequência do canal, é obtida pela Transformada de Fourier da resposta ao impulso. Essa resposta descreve o comportamento do canal no domínio da frequência, sendo crucial para sistemas OFDM, onde cada subportadora sofre uma atenuação complexa distinta [31], [32]. A resposta em frequência captura os efeitos do multipercorso, que geram flutuações rápidas ao longo do espectro.

3.2.1 MIMO

O processamento MIMO tem o potencial de aumentar significativamente a capacidade dos canais de comunicação ao adicionar diversidade espacial e reduzir interferências. Por isso, as técnicas MIMO são amplamente utilizadas em tecnologias modernas de comunicação sem fio [33], sendo fundamental para redes 5G e TV digital 3.0 [34].

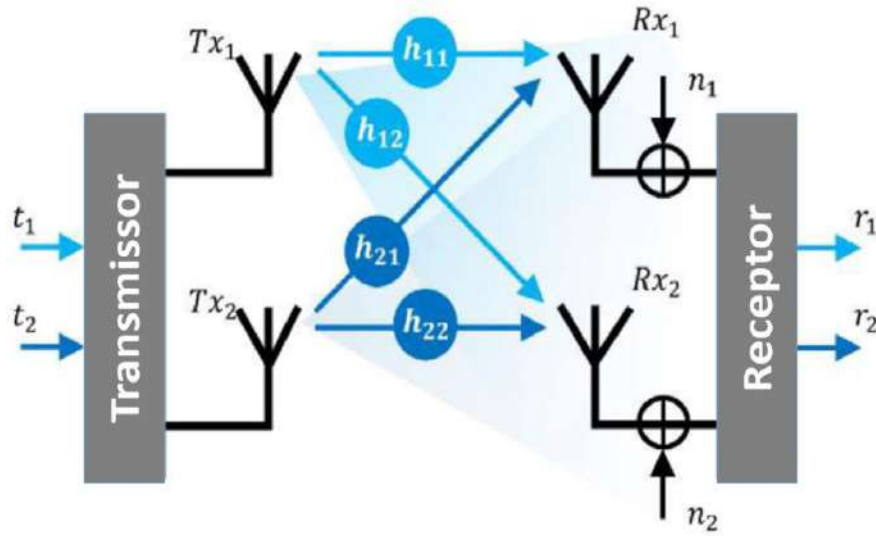
A busca por condições de propagação mais favoráveis e por taxas de transmissão mais elevadas em enlaces de comunicação sem fio, motivou a realização de estudos aprofundados sobre os benefícios do uso de MIMO em sistemas de comunicação. Esses estudos focam especialmente no desempenho dos sistemas sob o efeito do desvanecimento, evidenciando os ganhos proporcionados pela tecnologia MIMO [35].

Com o uso de sistemas MIMO em larga escala [36], é possível otimizar significativamente o uso do espectro disponível. Essa capacidade cresce de forma proporcional ao número de usuários conectados ao sistema, o que torna a tecnologia especialmente adequada para cenários com alta demanda de conexão. Esse ganho de eficiência é alcançado através de técnicas de processamento de sinais no transceptor. Dessa forma, o sistema consegue lidar com o aumento no número de usuários sem comprometer o desempenho, otimizando tanto a cobertura quanto a qualidade do serviço oferecido [34]. Essa vantagem é particularmente significativa em ambientes com grande presença de múltiplos caminhos de propagação [37].

A diversidade refere-se ao uso de múltiplas versões do mesmo sinal transmitido, que sofrem diferentes atenuações ao passar pelo canal, mas servem como um recurso valioso para recuperar o sinal no receptor. Essa técnica visa reduzir os efeitos de atenuação causadas por multipercurso e desvanecimento no canal de transmissão. Existem diferentes métodos de diversidade, como diversidade no tempo, espaço e frequência, onde as réplicas do sinal podem ser transmitidas em momentos distintos, em diferentes frequências, antenas, polarizações ou campos eletromagnéticos [35].

Neste estudo, foi investigado um sistema MIMO 2x2 utilizando o equalizador MMSE, que utiliza duas antenas para transmissão e duas antenas para recepção, permitindo o processamento simultâneo de múltiplos fluxos de dados. A configuração das antenas, responsável por explorar os benefícios da diversidade espacial e aumentar a eficiência espectral, está representada graficamente na Figura 5. Esse arranjo possibilita a melhoria no desempenho do sistema, especialmente em cenários de comunicação sem fio, ao mitigar interferências e aumentar a capacidade de transmissão.

Figura 5. Sistema Mimo 2x2



Fonte: [20].

O sistema é projetado para transmitir dois fluxos de dados simultaneamente na mesma frequência, o que resulta na formação de quatro caminhos distintos. Cada um desses caminhos é caracterizado por coeficientes complexos que refletem as diversas condições de propagação do sinal. O comportamento do sistema pode ser descrito por meio de duas equações lineares que matematicamente modelam esse cenário complexo, conforme ilustrado na Figura 5. Essas equações são fundamentais para compreender como os dados são processados e recuperados.

$$r_1 = h_{11} \cdot t_1 + h_{12} \cdot t_2 + n_1 \quad (3.8)$$

$$r_2 = h_{21} \cdot t_1 + h_{22} \cdot t_2 + n_2 \quad (3.9)$$

aqui, t_j representa o sinal transmitido pela antena transmissora de índice j , enquanto r_i corresponde ao sinal recebido pela antena receptora de índice i . Os coeficientes h_{ij} descrevem o fator de transmissão complexo que caracteriza a propagação do sinal da antena transmissora j até a antena receptora i . O termo n_i representa o ruído aditivo presente no receptor i . Quando representado de forma matricial, o sistema pode ser descrito da seguinte maneira [38]:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ou, de maneira resumida, podemos dizer que:

$$r = H \cdot t + n \quad (3.11)$$

onde:

- r = vetor de recepção ($r = H \cdot t + n$)
- H = matriz do canal
- t = vetor de transmissão (símbolos transmitidos)
- n = vetor de ruído

O vetor de recepção r é conhecido, enquanto o vetor de transmissão t precisa ser determinado. A matriz de canal H descreve a resposta em frequência do canal MIMO e sua condição determina a facilidade com que a equação pode ser resolvida, refletindo a sensibilidade a erros nos dados. A qualidade da recepção MIMO depende da condição da matriz do canal que é matematicamente expressa por [39]:

$$k(H) = \frac{\delta_{max}}{\delta_{min}} \geq 1 \quad (3.12)$$

onde:

- δ_{max} representa o maior valor singular, e δ_{min} o menor valor singular da matriz H .

Durante a propagação pelo canal, o sinal sofre distorções em amplitude e tempo, resultando na chamada ISI, que compromete a integridade dos dados e gera erros na recepção. A ISI é amplamente reconhecida como um dos principais obstáculos para a transmissão de dados em alta velocidade em canais sem fio. Para mitigar seus efeitos, utilizam-se técnicas de equalização [40].

Os equalizadores MIMO são geralmente classificados em lineares e não lineares. Dentre os lineares, destaca-se o método Zero-Forcing (ZF), que elimina a interferência entre fluxos ao aplicar a pseudoinversa da matriz do canal, embora seja sensível à amplificação de ruído. O equalizador Minimum Mean Square Error (MMSE), por sua vez, oferece um equilíbrio entre a redução da interferência e o impacto do ruído, apresentando desempenho mais robusto em condições práticas. Entre os não lineares, o equalizador de

Maximum Likelihood (ML) proporciona detecção ótima ao considerar todas as possíveis combinações de símbolos transmitidos, mas com custo computacional elevado, principalmente em modulações de alta ordem [41].

A seguir, apresentam-se três importantes técnicas de equalização utilizadas em sistemas MIMO: ZF, MMSE e ML. Cada técnica possui características distintas em termos de desempenho, complexidade computacional e robustez a ruídos e interferências:

a) ZF: A técnica de equalização ZF é baseada na inversão da matriz do canal MIMO.

Seu objetivo é cancelar completamente a interferência entre os fluxos espaciais, aplicando a pseudoinversa da matriz H ao sinal recebido r . A estimativa dos símbolos transmitidos é obtida por [42]:

$$\hat{t}_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H r \quad (3.13)$$

onde:

- $\hat{t}_{ZF}$ é vetor de símbolos estimado pelo critério ZF.
- H^H é a transposta conjugada (Hermitiana) da matriz H .

Apesar de eliminar a interferência, essa abordagem pode amplificar o ruído quando a matriz H é mal condicionada. Portanto, o desempenho do ZF é sensível ao número de condição do canal.

b) MMSE: A equalização MMSE busca minimizar o erro quadrático médio entre o vetor transmitido e sua estimativa. Diferentemente do ZF, o MMSE considera tanto a interferência quanto o ruído aditivo do canal. Sua formulação é [42]:

$$\hat{t}_{MMSE} = (H^H H + \sigma^2 I)^{-1} H^H r \quad (3.14)$$

onde:

- $\hat{t}_{MMSE}$ é vetor de símbolos estimado pelo critério MMSE.
- I é a matriz identidade de mesma dimensão que $H^H H$.
- σ^2 é a variância do ruído aditivo.

Esse método inclui uma regularização com o termo $\sigma^2 \mathbf{I}$, reduzindo a amplificação de ruído em canais mal condicionados. Assim, o MMSE apresenta melhor desempenho em ambientes ruidosos.

c) **ML:** O detector ML realiza uma busca exaustiva por todas as combinações possíveis dos símbolos transmitidos, escolhendo aquela que minimiza a distância euclidiana entre o vetor recebido e a reconstrução Ht . A estimativa é dada por [42]:

$$\hat{t}_{\text{ML}} = \arg \min_{t \in \mathcal{A}^{N_T}} |r - Ht|^2 \quad (3.15)$$

onde:

- $\hat{t}_{\text{ML}}$ é o vetor de símbolos estimado pelo critério de ML.
- $\mathcal{A}$ é o alfabeto de modulação (QPSK, 64-QAM, etc.).
- N_T é o número de antenas transmissoras.
- $|\cdot|$ denota a norma euclidiana.
- O operador $\arg \min$ retorna o vetor t que minimiza a distância.

Embora forneça o melhor desempenho em termos de BER (Bit Error Rate), o ML é computacionalmente intensivo, tornando-se inviável para sistemas com grande número de antenas ou modulações de alta ordem.

Tabela 3. Comparativo ZF, MMSE e ML

Técnica	Complexidade	Considera Ruído	Robustez a canais mal condicionados	Desempenho BE
ZF	Baixa	Não	Baixa	Moderado
MMSE	Moderada	Sim	Alta	Bom
ML	Muito Alta	Sim	Muito Alta	Ótimo

Fonte: Autor.

3.2.1.1 Número de Condição

O número de condição $k(H)$ da matriz de canal MIMO indica o nível de correlação e desbalanceamento entre os caminhos espaciais. Valores baixos (próximos de 1 ou 0 dB na escala logarítmica) representam canais bem condicionados, com caminhos de transmissão equilibrados e baixa correlação entre eles, o que favorece a multiplexação espacial. Já valores elevados de $k(H)$ revelam canais mal condicionados, com forte correlação ou perda de diversidade, tornando a inversão da matriz instável e suscetível à amplificação de ruído [43]. Isso afeta negativamente o desempenho de equalizadores, degradando métricas como BER e MER. Assim, o número de condição é uma métrica importante para avaliar a robustez do canal frente ao ruído durante a equalização [43].

O número de condição é calculado diretamente pelo analisador de canais MIMO. Em sua forma logarítmica, o número de condição, é representado da seguinte forma [20]:

$$CN(dB) = 20 \cdot \log[k(H)] \geq 0 \quad (3.16)$$

Para avaliar se o canal oferece uma propagação eficiente, é fundamental analisar as condições do canal, considerando o número de condição associado ao comportamento da propagação [44]. O número de condição é definido como a razão entre o maior e o menor valor singular da matriz de canal MIMO. Um aumento significativo na capacidade de multiplexação espacial em sistemas MIMO sem fio pode ser alcançado quando a distribuição do número de condição é majoritariamente composta por valores baixos. Em cenários LOS, é comum ocorrerem condições desfavoráveis para a matriz MIMO, resultando em número de condição elevado. No entanto, isso pode ser mitigado com o uso de antenas de polarização dupla. Para estações rádio base com antenas de baixa altura, a maioria dos cenários de propagação é do tipo NLOS (*Non-Line-of-Sight*), com elevada dispersão de sinais, o que favorece ganhos expressivos de multiplexação em sistemas MIMO [45].

Neste estudo apresentado em [46], foram realizados testes de campo utilizando MIMO 2x2, medições realizadas em ambientes externos indicaram que a maioria dos canais apresentava números de condição baixos. Isso revela que o multipercurso de propagação forneceu ganhos equilibrados nos dois fluxos MIMO, favorecendo a eficácia da transmissão e demonstrando a robustez do sistema em cenários reais.

O número de condição é um parâmetro fundamental na avaliação do desempenho de sistemas MIMO, pois influencia diretamente a eficiência dos algoritmos de equalização e, conseqüentemente, afeta métricas essenciais como a BER e a MER. Quando $k(H)$ apresenta valores baixos, geralmente as constelações demoduladas se tornam mais definidas, o que se traduz em um MER mais alto, e a relação C/N necessária para atingir uma taxa de erro nula é menor. No entanto, quando $k(H)$ é elevado, as constelações se tornam mais dispersas, o que reduz a MER e compromete a performance geral do sistema, limitando os benefícios que a tecnologia MIMO poderia oferecer [47].

4 PARÂMETROS DE QUALIDADE

Os parâmetros de qualidade em sistemas de transmissão digital são essenciais para garantir a eficiência e confiabilidade do sinal recebido. Entre eles, destacam-se a relação C/N, o limiar de recepção e a MER.

4.1 Relação C/N

A relação C/N é um parâmetro fundamental na transmissão de sinais de televisão digital, expressando a razão entre a potência do sinal útil (portadora) e a potência do ruído dentro da largura de banda do canal. Um valor elevado de C/N indica que o sinal se sobressai sobre o ruído, garantindo uma recepção de melhor qualidade e reduzindo erros de transmissão [48]. Valores elevados de C/N indicam um sinal mais forte em relação ao ruído, resultando em melhor desempenho do sistema [49].

A taxa de erro de bits (BER), por sua vez, representa a proporção de bits recebidos com erro em relação ao total de bits transmitidos. Uma BER baixa é indicativa de uma transmissão mais confiável e com menor incidência de erros. Existe uma relação inversa entre C/N e BER: à medida que a C/N aumenta, a BER tende a diminuir, refletindo uma melhoria na qualidade da comunicação [50].

O Teorema de Shannon-Hartley estabelece um limite teórico para a capacidade máxima de transmissão de dados em um canal de comunicação analógico sujeito a ruído branco gaussiano aditivo (AWGN). De acordo com o teorema, a capacidade do canal é determinada pela fórmula:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.17)$$

onde:

- C é a capacidade do canal em bits por segundo;
- B é a largura de banda do canal em hertz;
- S é a potência média do sinal recebido sobre a largura de banda;
- N é a potência média do ruído e das interferências sobre a largura de banda;
- $\frac{S}{N}$ é a relação sinal-ruído (SNR) ou a relação portadora-ruído (C/N) do sinal de comunicação em relação ao ruído.

Este teorema demonstra que a capacidade de um canal é influenciada tanto pela largura de banda disponível quanto pela relação sinal-ruído. Aumentar a largura de banda ou melhorar a SNR (e, conseqüentemente, a C/N) pode elevar a capacidade de transmissão de dados, permitindo taxas de transmissão mais altas com menores taxas de erro. No entanto, é importante notar que, na prática, existem limitações físicas e técnicas que restringem a aplicação direta desse teorema [51].

No caso do padrão ISDB-T, adotado no Brasil e no Japão, a C/N mínima necessária também depende da modulação utilizada. Para 16-QAM, por exemplo, valores em torno de 19 dB são considerados adequados para uma recepção estável [48].

A importância da C/N em testes práticos de recepção portátil é evidenciada no estudo [52], que apresenta uma campanha de medição de campo realizada em áreas de cobertura na Espanha. As medições fornecem dados concretos sobre os limites de C/N em ambientes urbanos. Ao considerar simultaneamente os efeitos da recepção por multipercurso e múltiplos transmissores, o estudo oferece valores de referência relevantes para o planejamento de redes de televisão digital (DTV).

4.2 Limiar de Recepção

O limiar de recepção é um parâmetro fundamental na análise de desempenho de sistemas de comunicação sem fio. Ele define o valor mínimo da potência do sinal recebido necessário para que um receptor consiga detectar e processar corretamente a informação transmitida. O conhecimento desse limiar é essencial para o planejamento e otimização de redes de comunicação, garantindo a cobertura adequada e a qualidade do serviço [53].

O ruído e as interferências afetam diretamente o limiar de recepção, podendo elevá-lo e, conseqüentemente, comprometer a qualidade do sinal recebido [54]. A sensibilidade do receptor é um dos principais fatores que influenciam o limiar de recepção,

pois define a menor potência de sinal que pode ser detectada e processada corretamente. Essa sensibilidade depende da tecnologia utilizada, da largura de banda do sinal e do tipo de modulação adotado [53].

Modulações mais robustas, como Modulação por Deslocamento de Fase Binária (BPSK) e Modulação por Deslocamento de Fase em Quadratura (QPSK), permitem a recepção do sinal mesmo em condições adversas, enquanto modulações de alta ordem, como 64-QAM ou 256-QAM, exigem relações sinal/ruído mais elevadas para uma recepção confiável [55]. Além disso, o desvanecimento do canal, causado por multipercurso e obstáculos, pode afetar a potência do sinal recebido. Técnicas como diversidade espacial, equalização e códigos corretores de erros são utilizadas para mitigar esses efeitos e melhorar a recepção do sinal.

O estudo apresentado em [56], destaca que o limiar de recepção é um fator crucial para avaliar a qualidade de um sistema de comunicação, uma vez que impacta diretamente a cobertura e a robustez da transmissão. Esse parâmetro é influenciado por diversos aspectos, como a sensibilidade do receptor, o ruído do canal, o tipo de modulação adotado e as condições de desvanecimento. Assim, compreender o comportamento desse limiar é fundamental para otimizar redes sem fio e aprimorar a eficiência das comunicações.

4.3 MER

As informações transmitidas pela TV digital são codificadas em sequências binárias, que modulam as portadoras no canal de transmissão. O sinal de radiofrequência (RF) gerado é amplificado para alimentar a antena transmissora. Durante o processamento desse sinal, ele pode ser afetado por ruídos e distorções, resultando em possíveis discrepâncias entre o conteúdo transmitido pelo ar e a informação originalmente desejada. A MER é outra ferramenta matemática usada para indicar a diferença entre o símbolo real e o ideal, expressando numericamente o mesmo conceito do Vetor de Erro de Magnitude (EVM). Quando um único valor representa todos os símbolos da constelação, a medição é chamada de MER [19].

A MER é uma medida em dB que expressa a porcentagem de erros na modulação. A métrica é determinada a partir dos erros de constelação e indica a distância entre os pontos de decisão e suas posições ideais no diagrama de IQ (In-phase and Quadrature). Um valor típico é aproximadamente 16 dB, e quanto maior esse valor, melhor a qualidade da modulação [57]. O erro de modulação pode ser calculado com base nos desvios dos

pontos da constelação em relação à sua localização ideal [57]. Esse parâmetro é uma medida que engloba todos os efeitos de interferência presentes no link de transmissão [58].

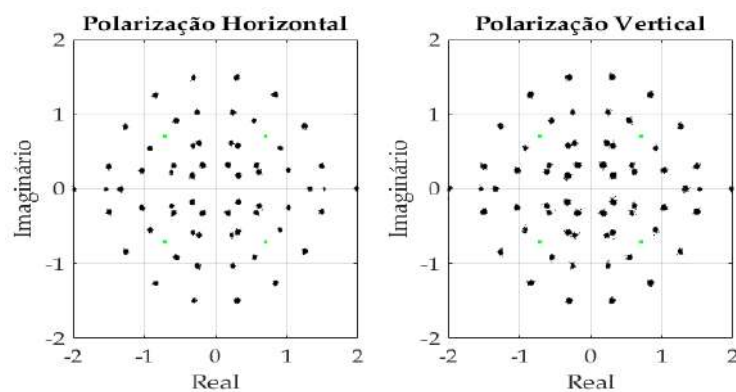
De acordo com [57], a MER pode ser calculada pela equação (3.18) em escala logarítmica. O numerador representa os vetores ideais, enquanto o denominador corresponde aos vetores de erro. Dessa forma, o menor valor possível é 0, indicando erros que tendem ao infinito, sendo essa a pior condição. Um valor elevado de MER indica poucos erros, o que é uma condição ideal e desejada. O erro de modulação pode ser calculado com base nos desvios dos pontos de constelação em relação à sua localização ideal.

$$MER = 10 \log_{10} \frac{\sum (I_{ideal}^2 + Q_{ideal}^2)}{\sum (I_{error}^2 + Q_{error}^2)} \quad (3.18)$$

Um fluxo elevado de bits gera uma constelação de símbolos que se repetem continuamente, posicionados de acordo com o esquema de modulação adotado. Idealmente, esses símbolos deveriam coincidir exatamente com seus pontos teóricos no plano da constelação. No entanto, efeitos como ruído, interferência e distorções no canal provocam uma dispersão desses pontos ao redor das posições ideais. Quanto maior a dispersão, menor a MER, indicando uma modulação de menor qualidade. Valores altos de MER indicam símbolos mais concentrados e, portanto, melhor desempenho do sistema.

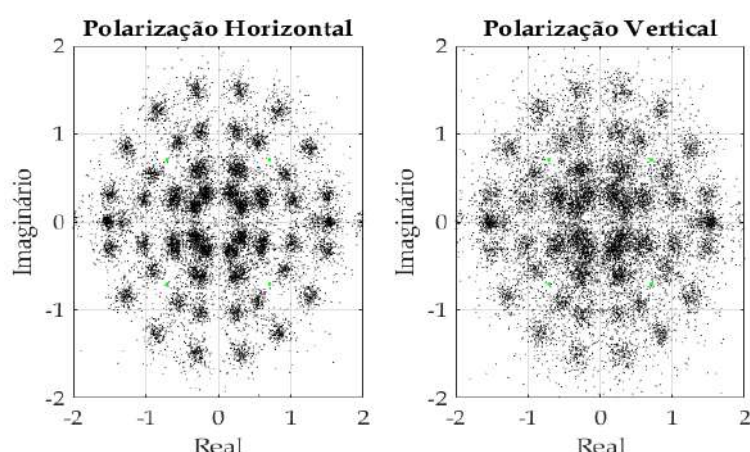
A Figura 6 e a Figura 7 apresentam uma ilustração comparativa, permitindo uma análise mais clara e visual das diferenças e semelhanças entre os conceitos abordados. Através dessas representações gráficas, é possível compreender de maneira mais intuitiva as variações nos parâmetros e as implicações que elas têm sobre o desempenho e a eficiência do sistema.

Figura 6. Constelação Com Alto Valor de MER



Fonte: Autor.

Figura 7. Constelação Com Baixo Valor de MER



Fonte: Autor.

Quando o ruído está dentro da faixa de frequência do sinal, sua separação se torna extremamente complexa, resultando na redução da MER. A métrica C/N mede a relação entre as amplitudes do sinal e do ruído presentes no sistema. Quanto menor esse valor, pior será a MER. Ao contrário do ruído, as distorções não são adicionadas como um componente espectral, mas surgem da incapacidade dos sistemas de manter suas características ao longo de todas as faixas de frequência e amplitude. As distorções resultam em diferentes processamentos do sinal, dependendo de suas características instantâneas. As distorções não lineares são particularmente comuns devido à saturação dos amplificadores [59].

A MER é uma medida importante na análise de sistemas de comunicação, especialmente em transmissões digitais. É crucial para otimizar sistemas de comunicação, pois permite ajustes nos parâmetros de modulação e codificação, visando melhorar a eficiência e a robustez do sistema frente a diferentes condições do canal. Em sistemas de TV digital e transmissão de dados, a monitorização da MER é uma prática comum para garantir a qualidade do serviço e a satisfação do usuário.

Tabela 4. Principais Diferenças dos Parâmetros de Qualidade

Característica	Relação C/N	Limiar de Recepção	MER
Definição	Relação entre a potência do sinal e o ruído no canal	Nível mínimo de sinal necessário para que a recepção ocorra sem falhas	Mede a qualidade do sinal modulador, comparando o sinal recebido com o ideal

Unidade de Medida	dB	dBm	dB
Função	Indica a relação sinal/ruído necessária para garantir uma boa transmissão	Define o ponto em que o receptor consegue decodificar o sinal corretamente	Avalia a qualidade da modulação do sinal transmitido
Impacto na Transmissão	Um C/N muito baixo pode resultar em maior taxa de erro na recepção	Se o sinal estiver abaixo do limiar de recepção, a comunicação será interrompida	Um MER baixo indica maior distorção na modulação, prejudicando a recepção do sinal
Aplicação	Avaliação do desempenho do enlace de rádio ou TV digital	Determinação da sensibilidade mínima do receptor	Análise da integridade do sinal em sistemas digitais

Fonte: Autor.

5 TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos grupos de pesquisa têm realizado uma ampla gama de estudos e experimentos tanto em campo quanto em laboratório, com o objetivo de avaliar e aprimorar o desempenho do ISDB-T Avançado. Particularmente no Japão, onde essa tecnologia é amplamente utilizada e teve a maioria dos testes de desempenho, os esforços têm sido focados na melhoria da eficiência espectral, da robustez do sistema e da qualidade de transmissão em cenários desafiadores. Esses testes são fundamentais para validar o sistema em ambientes reais, garantindo que ele atenda aos requisitos técnicos e de desempenho necessários para suportar novas demandas, como a transmissão de conteúdos em altíssima definição e a recepção móvel.

Nakamura e outros, analisaram o desempenho de um sistema de transmissão baseado no ISDB-T Avançado, capaz de oferecer tanto serviço de recepção fixa quanto serviço de recepção móvel [2]. O objetivo principal foi criar uma solução que permita a transmissão de conteúdo em 4K/8K UHD TV para recepção fixa e HDTV para recepção móvel, utilizando um único canal com largura de banda de 6 MHz.

IJIGUCHI e outros, desenvolveram pesquisas de desempenho do sistema ISDB-T Avançado [21]. Um sistema de transmissão, capaz de fornecer televisão de alta definição UHD TV para recepção fixa e HDTV para recepção móvel em um único canal. Como uma das funcionalidades opcionais para a otimização do uso do espectro em uma rede de frequência única (SFN), o sistema incorpora uma tecnologia MISO (Multiple-Input Sin-

gle-Output) distribuída, na qual múltiplas antenas transmissoras operam de forma coordenada para um único receptor. Essa técnica utiliza codificação espaço-temporal (STC) para melhorar a robustez do sinal, sendo sua eficácia comprovada por meio de simulações, testes de laboratório e experimentos de campo.

Asakura e outros, analisaram a aplicação do esquema de combinação com múltiplas portadoras (CB) para aumentar a largura de banda no ISDB-T Avançado, que oferece dois modos de divisão: na camada de transporte e na camada física [10]. Foi avaliado o desempenho de transmissão por meio de simulações em computador e testes de laboratório. Além disso, a viabilidade das transmissões com CB foi confirmada em testes de laboratório utilizando um equipamento protótipo.

Shitome e outros, desenvolveram um sistema avançado de transmissão para DTTB que aprimora o atual sistema ISDB-T, permitindo maior flexibilidade na alocação de largura de banda para diferentes cenários de recepção, como fixa e móvel [3]. O sistema utilizou tecnologias modernas de correção de erros e modulação, aumentando a eficiência espectral e a robustez da transmissão. Isso resultou em maior capacidade de transmissão (até 10 Mbps a mais) ou redução da relação C/N necessária. O estudo também se propõe a avaliar o desempenho da modulação bit-interleaved (BICM), oferecendo diretrizes para sua aplicação prática.

Shirai e outros, avaliaram as características de transmissão do sistema ISDB-T Avançado, desenvolvendo um modulador e demodulador experimental, cujas propriedades foram analisadas em experimentos de laboratório [9]. Além disso, foi realizado experimentos laboratoriais e testes de campo em larga escala, simulando condições de propagação semelhantes às encontradas em ambientes reais de transmissão.

Omi e outros, realizaram uma análise abrangente do desempenho do ISDB-T Avançado em cenários de DTTB, com foco especial na reutilização de frequência-1, característica fundamental das redes SFN [60]. O estudo avaliou diferentes esquemas de modulação de baixa ordem, aliados a códigos robustos, como forma de aumentar a confiabilidade da recepção em ambientes adversos. Foram utilizados cenários com sistemas com uma única antena para transmitir e receber sinais (SISO) e MIMO, explorando o comportamento da relação C/N sob diferentes condições de propagação. Os testes foram conduzidos por meio de experimentos em ambiente laboratorial com equipamentos protótipos, permitindo aferir métricas como a robustez da transmissão e a eficiência espectral. Os resultados obtidos contribuem para validar a viabilidade do ISDB-T Avançado como base para a evolução da DTTB.

Embora alguns estudos abordem testes de campo e simulações do ISDB-T Avançado, ainda tem poucas investigações aprofundadas que analisem o desempenho dessa tecnologia em uma gama de cenários no Brasil. Os testes foram realizados na cidade do Rio de Janeiro que possui uma topografia extremamente variada, incluindo áreas urbanas densamente edificadas, regiões costeiras, morros, florestas e bairros periféricos, o que cria um ambiente ideal para avaliar como o sistema se comporta em condições de propagação de sinal desafiadoras. Essa diversidade de paisagens torna o Rio de Janeiro um local estratégico para testar a robustez da tecnologia em situações que incluem bloqueios de sinal, multipercurso e variações na qualidade de recepção. A execução dessas avaliações, são cruciais para assegurar que o sistema atenda às exigências exigidas. Além disso, contribuem para a consolidação do ISDB-T Avançado como um padrão de excelência e referência internacional no contexto DTTB, evidenciando sua capacidade de atender às crescentes demandas por qualidade, eficiência espectral e adaptabilidade tecnológica.

6 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

6.1 Definição do Ambiente Experimental

Os testes de campo foram conduzidos nos bairros da Barra da Tijuca e do Recreio dos Bandeirantes, ambos localizados na zona oeste do Rio de Janeiro. Essas regiões foram escolhidas por estarem dentro da área de cobertura do transmissor e por apresentarem uma variedade de condições ambientais e urbanas que influenciam diretamente a recepção do sinal digital.

Para garantir uma análise abrangente, foram selecionados 30 locais de medição estrategicamente distribuídos, levando em consideração fatores que impactam a propagação do sinal. Entre esses fatores, destacam-se:

- Diferentes densidades populacionais, variando entre áreas altamente povoadas e regiões menos habitadas.
- Níveis variados de tráfego de veículos, que podem introduzir interferências e obstruções temporárias.
- Topografia diversificada, incluindo terrenos planos e acidentados.
- Presença de vegetação, considerando locais com diferentes níveis de cobertura arbórea, o que pode afetar a atenuação do sinal.

- Densidade e altura das edificações, incluindo regiões com grande concentração de prédios altos, áreas com edifícios baixos e espaçados, e locais com pouca ou nenhuma presença de construções verticalizadas.
- Proximidade a corpos d'água, como lagoas, canais e áreas litorâneas, que podem influenciar a propagação do sinal devido a efeitos de reflexão e difração.

Essa diversidade de cenários possibilita uma avaliação detalhada da robustez do sistema em condições reais de recepção, permitindo identificar os desafios enfrentados e fornecendo subsídios para futuras otimizações na transmissão do sinal digital.

6.2 Escolha e Caracterização dos Locais de Testes

A Tabela 5 apresenta um resumo detalhado dos pontos de medição analisados neste estudo, contemplando informações como a localização geográfica precisa (latitude e longitude), a elevação do terreno, a distância em relação ao transmissor, além das principais características ambientais de cada local. Esses dados são fundamentais para contextualizar as condições de propagação do sinal em diferentes cenários.

Tabela 5. Pontos de Medições

Pontos	Elevação (m)	Latitude	Longitude	Distância do Transmissor (km)	Características do Ambiente de Medição
1 – Centro Inteligente ION, Globo	1	-22,997507	-43,328922	6,6	Área com prédios de altura média e pouca vegetação, próximo à Lagoa da Tijuca
2 - Condomínio Santa Lúcia	1	-23,006203	-43,333335	7,5	Rua com pouco trânsito e pouca vegetação, próxima ao Canal de Marapendi
3 - Condomínio Mediterrâneo Flat	1	-23,00289	-43,342009	7,0	Rua com pouco trânsito, pouca vegetação e próxima a prédios altos
4 - Free-way Supermercado	1	-22,997372	-43,33625	6,5	Rua com pouco trânsito e pouca vegetação, próxima a prédios baixos e da Lagoa da Tijuca
5 - Condomínio Blue Ship	2	-23,001388	-43,347166	6,7	Rua com pouco trânsito e pouca vegetação, próxima a algumas edificações

6 - Fórum	1	-22,996291	-43,354979	6,2	Rua com pouco trânsito e pouca vegetação, próxima à Lagoa da Tijuca
7 - Carrefour Supermercado	3	-22,99645	-43,365296	6,5	Estacionamento próximo a uma avenida de alto tráfego
8 - Construção de negócios CEO	1	-22,985899	-43,359167	5,1	Rua com baixo tráfego, próxima a prédios altos e com pouca vegetação
9 - Pan Village	1	-22,974372	-43,35656	3,8	Rua com pouco trânsito e próxima a prédios altos, pequeno canal de água e pouca vegetação
10 - Assaí Atacadista Supermercado	3	-22,959769	-43,356765	2,2	Rua com muito trânsito e perto de edifícios altos
11 - Condomínio Worldwide Offices	3	-22,972765	-43,367048	4,0	Estacionamento perto de ruas com tráfego intenso e edifícios altos
12 – SARA Hospital	2	-22,969287	-43,379213	4,5	Rua com pouco trânsito e pouca vegetação
13 - Condomínio Cidade Jardim	3	-22,965617	-43,389325	5,0	Rua com pouco trânsito e pouca vegetação, próxima de prédios altos
14 – Floresta da Barra	3	-22,999160	-43,3719470	6,9	Estacionamento na mata, próximo à vegetação e alguns prédios baixos
15 - Cidade Olímpica	3	-22,974721	-43,400773	6,5	Estacionamento da Cidade Olímpica, próximo a alguns prédios e avenida com muito trânsito
16 - Studio Globo	5	-22,960635	-43,403654	6,2	Ampla área de estacionamento, próximo a prédios baixos e área de vegetação
17 - Escola Vicente Januzzi	3	-22,998755	-43,375285	7,0	Rua com pouco trânsito, perto de edifícios baixos
18 – Condomínio Barra Tower	2	-23,002504	-43,388385	8,1	Rua com pouco trânsito, perto de edifícios altos
19 - Loja Fiat Itália	2	-23,000793	-43,414506	9,6	Avenida com muito trânsito e próxima de edifícios
20 – Condomínio do Colaborador 1	3	-23,002602	-43,376897	7,4	Estacionamento em rua de pouco trânsito, com prédios e perto de praça

21 - Igreja de São Marcos	2	-23,007774	-43,428911	11,0	Rua com pouco trânsito e prédios baixos, próxima a uma praça
22 - Praia da Reserva	2	-23,020473	-43,440157	13,0	Avenida que margeia a praia da Reserva, com praia de um lado e área de reserva natural do outro
23 – Praia da Reserva 2	1	-23,014799	-43,406583	10,1	Avenida que margeia a praia da Reserva, com praia de um lado e área de reserva natural do outro
24 – Praia da Reserva 3	2	-23,013019	-43,393763	9,3	Avenida que margeia a praia da Reserva, com praia de um lado e área de reserva natural do outro
25 – Praia da Reserva 4	1	-23,012123	-43,384085	8,7	Avenida que margeia a praia da Reserva, com a praia de um lado e vegetação do outro. A avenida apresentava tráfego intenso.
26 – Posto 8, Praia da Barra	2	-23,010459	-43,362609	7,9	Avenida que margeia a praia da Barra, com a praia de um lado e prédios altos do outro. A avenida apresentava tráfego intenso.
27 – Condomínio Eldorado	19	-22,945556	-43,330000	2,0	Área residencial cercada por casas e montanhas
28 – Condomínio do colaborador 2	3	-23,010049	-43,356259	7,6	Estacionamento com a praia de um lado e prédios altos do outro.
29 - Igreja de Nossa Senhora do Loreto	38	-22,939926	-43,345226	0,4	O local estava situado ao pé do morro, próximo ao transmissor da Penna, em uma área com poucas casas e vegetação ao redor.
30 – Supermercado Viannense	22	-22,938003	-43,333644	1,6	Rua com muito movimento de pessoas e carros, com prédios de altura média

Fonte: [6]

Neste estudo, o Google Earth foi utilizado como uma ferramenta visual para ilustrar, conforme mostrado na Figura 8, a localização dos pontos e do transmissor. Esta plataforma oferece uma visualização detalhada e interativa do terreno, permitindo uma melhor compreensão das áreas de cobertura e das interações entre o transmissor e os pontos. Dessa forma, é possível analisar com maior clareza a distribuição geográfica, o que contribui para um planejamento mais eficaz.

Figura 8. Distribuição Geográfica dos Pontos e do Transmissor



Fonte: Autor.

6.3 Configuração do Sistema de Testes

As medições foram realizadas em ambiente externo utilizando antena de dupla polarização, horizontal e vertical (H/V). Vários locais foram escolhidos para coletar medições de referências. As medições são repetidas e comparadas com as medições de referências para assegurar que a configuração de recepção esteja operando de maneira adequada e eficiente, garantindo que todos os componentes envolvidos no processo de recepção estejam funcionando corretamente e conforme o esperado, a fim de otimizar o desempenho do sistema e evitar possíveis falhas.

a) Configuração da Transmissão

O transmissor foi instalado no Rio de Janeiro, na estação Penna. Os parâmetros de transmissão utilizados são mostrados na Tabela 6. A infraestrutura de transmissão,

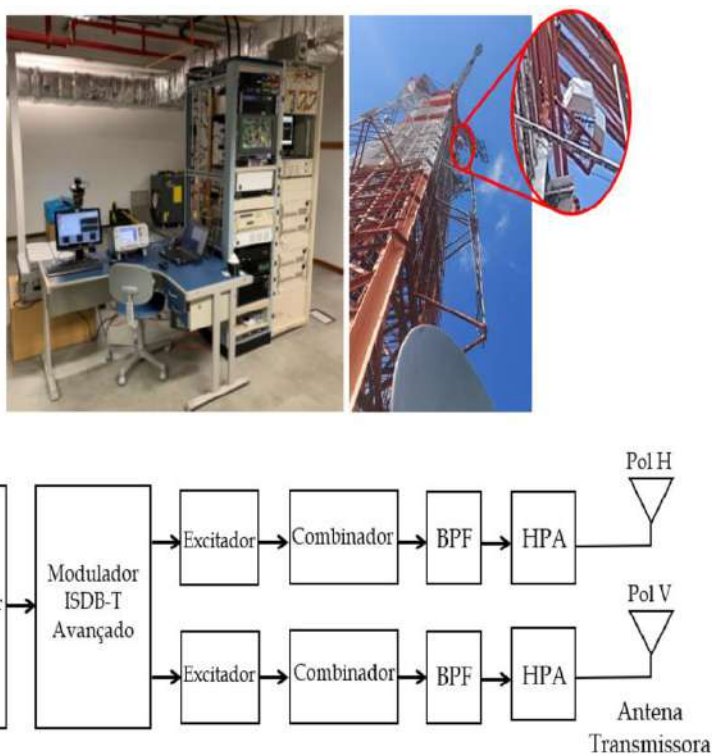
ilustrada na Figura 9, é composta pelos seguintes equipamentos: um multiplexador modelo 0416A-003, foi utilizado dois geradores de excitação modelo HPC-1990, responsável pela modulação e preparo do sinal de transmissão, um modulador modelo 0428-A, dois controladores de transmissor modelo HPC 1427, dois amplificadores de alta potência modelo DLP-240/200W por polarização e canal, além de dois combinadores. O sistema radiante é composto por painéis de polarização dupla (1 nível, duas faces a 90°) com H/V. Uma única sequência pseudo-aleatória de bits (PRBS) é gerada, codificada com códigos BCH e LDPC, e então modulada no modulador ISDB-T Avançado, sendo transmitida em pacotes Transport Stream (TS) de 980 bytes. Os sinais MIMO modulados são convertidos em sinais de RF na mesma frequência e amplificados até o nível de potência desejado. Por fim, os sinais são transmitidos pela antena de polarização dupla instalada na estação Penna.

Tabela 6. Parâmetros de Transmissão do ISDB-T Avançado

Modulação	64-QAM
Constelação	Não uniforme
Correção de erros	LDPC + BCH (8/16)
FFT	16K
Relação GI	800/16384 (126 μ s)
Padrão de piloto	Dx=6, Dy=2
Intercalação temporal	I=3
Camada	Camada-A, 35 segmentos
Largura de banda útil	5,83 MHz
Taxa de bits	30,9 Mbps

Fonte: [6]

Figura 9. Infraestrutura de Transmissão



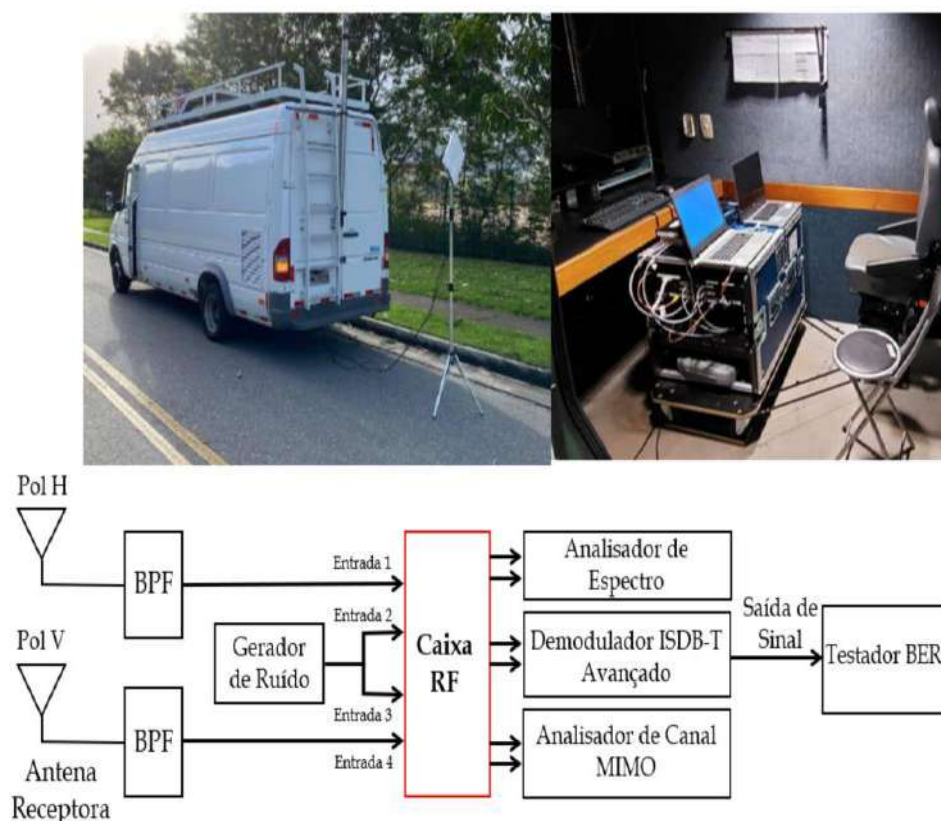
Fonte: [61] Adaptado.

b) Configuração da Recepção

A infraestrutura de recepção foi montada no laboratório de telecomunicações móvel e incluiu os seguintes equipamentos: um analisador vetorial de sinais, modelo MS 2692A, utilizado como analisador de espectro; um gerador de sinais modelo DTU-315, empregado como gerador de ruído; um modulador ISDB-T Avançado; um testador BER, modelo 7709C; um analisador de canais MIMO; uma caixa RF; uma antena MIMO de polarização dupla (H/V); filtros; uma antena GPS e dois notebooks com software de controle e medição. A Figura 10 apresenta a configuração da infraestrutura de recepção no laboratório de comunicações móvel.

As antenas com polarização dupla foram posicionadas a uma altura de 2 metros e captam os sinais transmitidos pelo transmissor. Cada sinal recebido é filtrado e direcionado às entradas 1 e 4 da caixa RF, conforme ilustrado na Figura 10. Essa caixa RF permite a análise dos limites de C/N e dos limites de recepção em cada ponto de medição. A caixa RF contava com dois caminhos de entrada para os sinais, um para polarização horizontal e outro para polarização vertical, além de dois canais para a entrada de ruído AWGN.

Figura 10. Infraestrutura de Recepção



Fonte: [61] Adaptado.

Dentro da caixa RF, havia dois combinadores, dois divisores, quatro atenuadores variáveis e dois amplificadores de baixo ruído (LNAs), conforme mostrado na Figura 11. Os sinais de entrada na caixa RF passam pelos atenuadores variáveis (A1 e A4), que permitem atenuar até 60 dB. Em seguida, os sinais passam pelos LNAs (LNA1 e LNA2). Cada saída do LNA é combinada com uma entrada de ruído. Com a introdução de ruído, é possível realizar a análise dos limites de C/N do sistema. O ruído AWGN, gerado pelo gerador de sinais modelo DTU-315, é adicionado pelas entradas 2 e 3 da caixa RF.

Os atenuadores variáveis (A2 e A3), com capacidade de atenuar até 60 dB, também são utilizados. As saídas dos atenuadores são combinadas com o sinal principal. As quatro entradas da caixa de RF foram caracterizadas utilizando um analisador vetorial de redes, modelo MS2036C, operando com uma largura de banda de 569 MHz. Durante esse processo de caracterização, os quatro atenuadores variáveis das entradas, um para cada entrada da caixa de RF, foram ajustados para 0 dB de atenuação.

O procedimento de caracterização consiste em injetar um sinal de referência em cada entrada de forma individual e medir a resposta de saída enquanto as demais entradas permanecem combinadas. Como resultado, cada ramal foi submetido às seguintes etapas:

- Ramo Horizontal

O mesmo procedimento foi repetido, um sinal de $-30,6$ dBm foi aplicado na entrada de ruído, com medições nas saídas seis saídas. A potência observada foi de $-44,3$ dBm, o que indica uma perda de aproximadamente $13,7$ dB na frequência de 569 MHz. A resposta em frequência também se mostrou bastante estável entre as saídas. Posteriormente, ao injetar o sinal de $-30,6$ dBm na entrada de sinal e medir na saída LNA, obteve-se uma potência média de $-17,2$ dBm, o que representa um ganho de cerca de $13,4$ dB.

- Ramo Vertical

Primeiramente, um sinal de $-30,6$ dBm foi injetado na entrada de ruído. Em seguida, o nível de saída foi medido individualmente nas seis saídas. A potência observada foi de $-44,8$ dBm, o que indica uma perda de cerca de $14,2$ dB na frequência central de 569 MHz. A resposta em frequência foi bastante semelhante entre todas as saídas. Na sequência, injetou-se o mesmo sinal de $-30,6$ dBm na entrada de sinal, e foi coletado o nível de sinal na saída LNA. A potência medida foi, em média, $-17,5$ dBm, o que corresponde a um ganho de aproximadamente $13,1$ dB.

Os ramos horizontal e vertical apresentaram ganhos aproximados de $13,4$ dB e $13,1$ dB, respectivamente, entre a entrada de sinal e as saídas. Já as perdas observadas foram de $13,7$ dB e $14,2$ dB. O amplificador de baixo ruído ZX60-112LN+ possui um ganho típico de 28 dB na frequência de 600 MHz. Ao compararmos a perda na entrada de ruído (sem LNA) com o ganho na entrada de sinal (com LNA), observamos uma diferença de aproximadamente $27,3$ dB. As medições realizadas nas saídas de ambos os ramos estão apresentadas na Tabela 7.

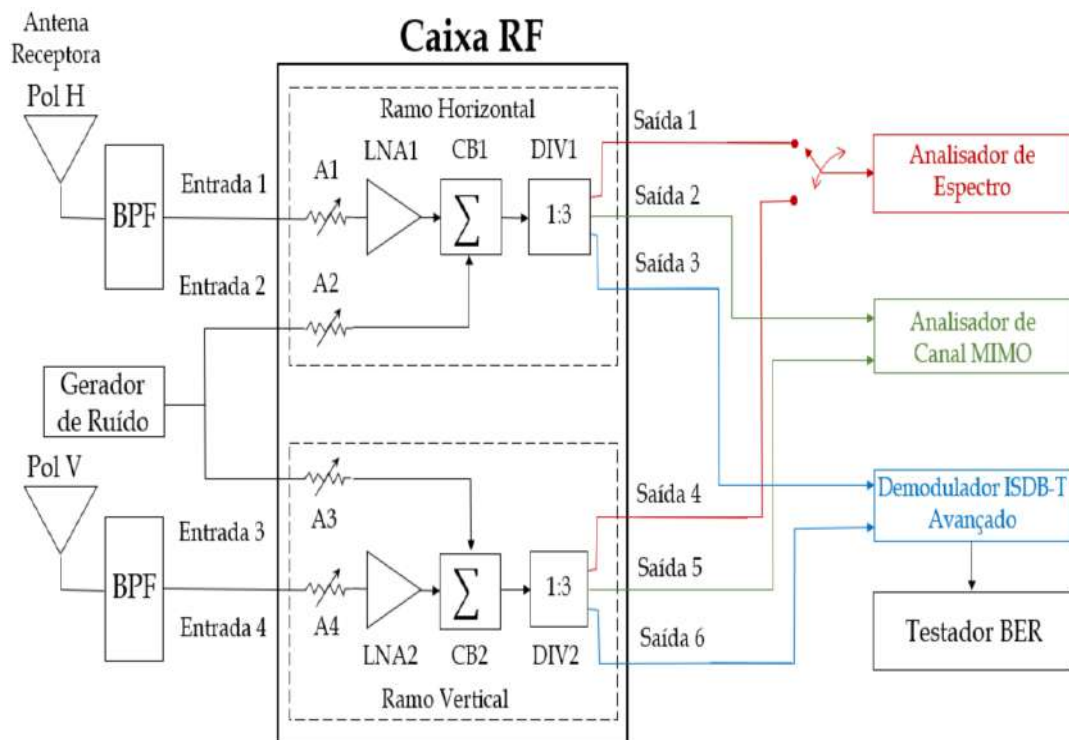
O sinal recebido pela antena MIMO é filtrado e alimentado na entrada 1 (Polarização horizontal) e na entrada 4 (Polarização vertical) da caixa RF. A caixa RF possui uma saída horizontal e uma saída vertical para cada dispositivo: analisador de espectro, analisador de canal MIMO e demodulador ISDB-T Avançado.

Tabela 7. Ganhos e Perdas entre os Ramos na Caixa de RF

Saídas da Caixa de RF	Sinal (Ganho) Ramo Horizontal Pol H (dB)	Sinal (Ganho) Ramo Vertical Pol V (dB)	Ruído (Perda) Ramo Horizontal Pol H (dB)	Ruído (Perda) Ramo Vertical Pol V (dB)
Saídas 1 e 4 (Analisador de Espectro)	13,4	13,1	13,7	14,2
Saídas 2 e 5 (Analisador de Canal MIMO)	13,2	13,0	13,8	14,1
Saídas 3 e 6 (Demodulador ISDB-T Avançado)	13,3	13,1	13,9	14,0

Fonte: [6]

Figura 11. Caixa RF



Fonte: [61] Adaptado.

A Tabela 8 e a Tabela 9 fornecem uma visão detalhada dos parâmetros de transmissão e recepção utilizados no experimento prático. Ela apresenta informações essenciais, como a potência de transmissão e recepção, as perdas causadas por cabos e conectores, além dos ganhos das antenas e da caixa de RF. Esses dados são fundamentais para compreender o desempenho do sistema, permitindo uma análise precisa da eficiência da transmissão e das condições de recepção em diferentes cenários.

Tabela 8. Perdas e Ganhos do Transmissor

Transmissor	
Potência de Saída	53 dBm
Ganho da Antena	11,14 dBi
Perdas em Cabos e Conectores	3 dB
EIRP	61,14 dBm

Fonte: Autor.

Tabela 9. Perdas e Ganhos do Receptor

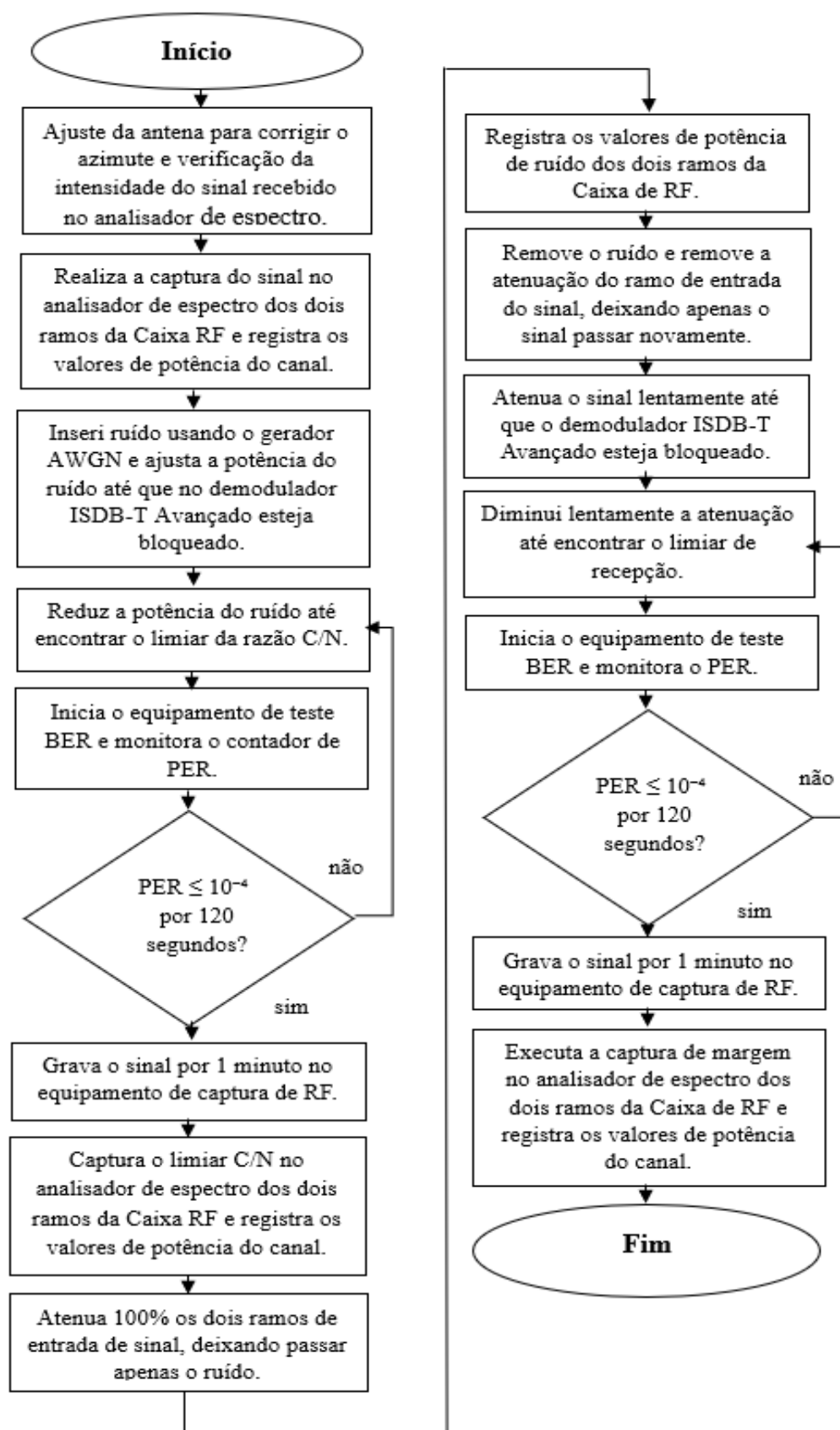
Receptor	Ramo Horizontal	Ramo Vertical
Ganho da Antena	8,7 dBi	8,7 dBi
Perdas em Cabos e Conectores	2,92 dB	2,97 dB
Ganho da Caixa RF	13,4 dB	13,1 dB

Fonte: Autor.

6.4 Procedimento de Coleta de Dados

Os procedimentos utilizados para a medição da potência do canal, do limiar C/N e do limiar de recepção estão apresentados no fluxograma da Figura 12. Essas etapas visam garantir a caracterização precisa do desempenho do sistema de recepção em condições controladas de teste. Durante os testes, o analisador de canal MIMO é utilizado para registrar diversos parâmetros fundamentais, como a constelação do sinal recebido, a MER, a resposta ao impulso do canal e a resposta em frequência do canal. Embora o BER na condição QEF (Quasi Error Free) não esteja formalmente definido no contexto do sistema ISDB-T Avançado, estudos anteriores conduzidos pela NHK propõem um valor de referência provisório de $BER = 10^{-7}$ após a decodificação LDPC. Adicionalmente, a NHK sugere a utilização de uma taxa de erro de pacote (PER) igual a 10^{-4} como métrica alternativa para a avaliação da qualidade de recepção em cenários reais. A partir desses critérios, considera-se que o sistema atinge a condição QEF quando permanece com desempenho estável, sem degradação perceptível de áudio e vídeo, por um período mínimo de 30 segundos. Uma vez atingido esse estado, procede-se à medição do limiar C/N, definido como o menor valor da relação C/N ainda capaz de garantir a recepção e decodificação corretas do conteúdo transmitido. Para a determinação desse limiar, ruído é gradualmente introduzido no sistema de recepção até que seja alcançada a condição QEF, caracterizando assim o ponto mínimo de operação aceitável do sistema [20].

Figura 12. Fluxograma



Fonte: Autor.

6.5 Desenvolvimento e Aplicação do Código MATLAB

O código desenvolvido em MATLAB foi projetado para analisar e correlacionar diversos parâmetros essenciais à avaliação do desempenho. Entre as métricas investigadas, destacam-se:

- **Perfil de Potência de Retardos:** Permite caracterizar a distribuição de potência dos sinais recebidos em função do atraso de propagação, fornecendo informações importantes sobre a dispersão temporal do canal e o comportamento dos multipercursos.
- **Banda de coerência:** Permite identificar se o canal de propagação é plano ou apresenta seletividade em frequência, auxiliando na compreensão dos efeitos do desvanecimento.
- **Resposta em frequência do canal:** Fornece informações sobre a atenuação seletiva ao longo do espectro, auxiliando na identificação de regiões mais suscetíveis a interferências e perda de qualidade.
- **Número de condição da matriz do canal:** Indica a robustez da recepção no contexto MIMO, sendo um fator crucial para a eficiência do esquema de detecção adotado.
- **Constelação do sinal recebido:** A constelação do sinal recebido permite visualizar distorções causadas por ruído, interferências e multipercursos, sendo essencial para avaliar a integridade do sinal modulado. Nesse contexto, a MER complementa essa análise ao quantificar numericamente o nível dessas distorções: quando a MER é elevada, os pontos da constelação se mantêm mais concentrados em suas posições ideais; quando a MER é baixa, a dispersão dos pontos aumenta, indicando maior degradação do sinal.

Dessa forma, a aplicação desenvolvida em MATLAB proporciona uma visão aprofundada do comportamento do sistema em diferentes condições de recepção, permitindo correlacionar métricas fundamentais e identificar padrões relevantes de degradação do sinal. A análise conjunta desses parâmetros oferece uma compreensão mais precisa do desempenho do canal e do impacto das características do ambiente sobre a qualidade da transmissão digital, contribuindo para avaliações mais robustas e para o aperfeiçoamento de sistemas de comunicação.

7 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir das medições realizadas em campo, com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema em diferentes condições de recepção. As análises e correlações contemplam uma série de parâmetros que refletem a qualidade do sinal recebido, os efeitos do canal de propagação e a robustez do sistema frente a cenários com presença de desvanecimento e multipercurso.

7.1 Apresentação Geral dos Dados

Inicialmente, são apresentadas as medições que permitem avaliar os níveis reais de sinal presentes em cada ponto de teste. Em complemento, é apresentado o limiar de recepção, parâmetro diretamente relacionado à capacidade do receptor em decodificar corretamente os dados transmitidos.

Em seguida, são apresentados a quantidade de multipercurso e o retardo médio, ambos extraídos da resposta ao impulso do canal. Esses parâmetros descrevem a dispersão temporal do sinal recebido e são essenciais para caracterizar os efeitos do multipercurso, especialmente em cenários com elevada ocorrência de reflexões.

Na sequência, são mostrados o retardo RMS e a banda de coerência, parâmetros diretamente relacionados à seletividade em frequência do canal. Quando a banda de coerência é maior que a largura de banda do sinal, o canal pode ser considerado como desvanecimento plano, de modo que todas as subportadoras sofrem atenuação semelhante. Em contrapartida, quando a banda de coerência é menor, o canal pode ser considerado como desvanecimento seletivo, afetando diferentes regiões do espectro. Para mitigar a influência do ruído nos valores obtidos, a técnica CFAR foi aplicada a todos os pontos avaliados.

Por fim, são apresentadas a relação C/N , o número de condição e a MER, métricas essenciais para avaliar a qualidade do sinal. A relação C/N representa a razão entre a potência útil e o ruído no canal. A MER, por sua vez, mensura a qualidade da modulação, quantificando o nível de distorção presente na constelação recebida, incluindo efeitos de ruído, interferência e desvanecimento. Já o número de condição associado à matriz MIMO 2×2 descreve a estabilidade da inversão de canal aplicada pelos equalizadores, evidenciando o grau de correlação entre os caminhos de propagação e a robustez do sistema MIMO em cada ponto avaliado.

Todas essas informações estão organizadas na Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13, que reúnem os dados coletados nos diferentes pontos de medição e servem de base para as análises e correlações desenvolvidas.

Tabela 10. Potência de Recepção e Limiar de Recepção

PONTOS	POTÊNCIA DE RECEPÇÃO (dBm)		LIMIAR DE RECEPÇÃO (dBm)	
	V	H	V	H
1	-51,74	-53,96	-89,69	-92,19
2	-69,45	-77,08	-84,89	-92,83
3	-65,48	-69,73	-86,63	-90,27
4	-60,10	-60,35	-90,79	-91,32
5	-56,43	-57,06	-86,16	-87,10
6	-69,62	-66,12	-86,44	-86,27
7	-57,31	-61,56	-86,49	-90,78
8	-55,05	-58,85	-85,79	-89,33
9	-49,95	-53,38	-89,13	-92,72
10	-50,69	-54,82	-88,43	-92,52
11	-49,48	-51,92	-87,90	-91,07
12	-53,55	-54,85	-90,28	-91,84
13	-59,98	-62,83	-85,51	-88,98
14	-58,79	-57,7	-91,62	-90,65
15	-61,41	-64,12	-90,26	-90,55
16	-64,73	-68,17	-88,46	-92,48
17	-56,93	-56,13	-91,35	-91,04
18	-62,58	-64,95	-82,14	-84,55
19	-47,93	-46,79	-91,75	-90,96
20	-44,97	-44,99	-91,73	-91,96
21	-64,54	-63,23	-90,83	-89,82
22	-52,74	-50,78	-90,89	-89,38
23	-61,52	-60,35	-91,16	-90,28
24	-65,22	-61,69	-92,38	-89,34
25	-53,86	-55,19	-89,38	-91,23
26	-49,31	-50,77	-90,11	-91,79
27	-44,97	-44,99	-91,73	-91,96
28	-49,53	-51,17	-89,98	-91,82
29	-60,96	-65,57	-82,89	-87,52
30	-64,70	-65,74	-88,56	-88,55

Fonte: Autor.

Tabela 11. Multipercurso e Retardo Médio

PONTOS	MULTIPERCURSO				RETARDO MÉDIO (μs)			
	VV	VH	HV	HH	VV	VH	HV	HH
1	19	37	37	12	1,54	2,85	2,89	0,98
2	13	31	19	14	1,21	2,58	1,46	1,56
3	23	50	26	24	1,82	3,51	2,09	2,41
4	23	44	40	26	2,63	3,34	3,15	2,60
5	18	35	39	19	1,58	2,59	2,80	1,66
6	28	45	41	32	2,55	3,15	3,11	2,84
7	13	35	33	28	1,14	2,64	2,70	2,55
8	19	39	31	24	2,14	2,84	2,64	2,02
9	15	36	36	19	1,25	2,90	2,95	1,47
10	25	44	38	31	2,27	3,34	3,03	2,57
11	32	41	44	30	2,70	3,05	3,25	2,77
12	20	40	35	20	1,82	3,03	2,74	1,62
13	27	47	43	34	2,29	3,42	3,09	2,56
14	16	38	35	22	1,40	2,92	3,08	1,97
15	35	47	45	35	2,82	3,28	3,09	2,92
16	6	29	21	11	0,41	2,21	1,87	0,80
17	21	36	34	16	1,62	2,84	2,73	1,23
18	24	34	25	20	1,89	2,94	2,01	1,72
19	26	39	36	28	1,98	3,04	2,93	2,11
20	30	40	39	31	2,42	3,07	2,99	2,44
21	11	33	26	22	0,83	2,64	1,98	2,01
22	23	39	35	17	1,81	2,92	2,78	1,51
23	7	36	29	8	0,50	2,67	2,29	1,37
24	11	31	32	19	1,04	2,50	2,52	1,40
25	23	44	37	22	1,85	3,25	2,96	1,64
26	32	40	40	31	2,97	3,21	3,09	2,70
27	10	30	32	14	0,90	2,47	2,56	1,21
28	33	35	38	27	2,57	2,87	2,95	2,25
29	44	48	43	45	3,02	3,21	3,22	3,41
30	22	37	16	8	2,05	2,88	1,48	0,53

Fonte: Autor.

Tabela 12. Retardo RMS e Banda de Coerência

PONTOS	RETARDO RMS (μ s)				BANDA DE COERÊNCIA (KHz)			
	VV	VH	HV	HH	VV	VH	HV	HH
1	0,83	1,47	1,58	0,52	240,28	135,78	126,83	387,49
2	0,78	1,55	0,74	1,19	257,98	129,22	270,52	168,58
3	1,02	1,75	1,18	1,27	196,52	114,47	170,06	158,01
4	1,72	1,69	1,55	1,61	116,18	118,12	128,76	124,41
5	1,05	1,32	1,36	0,93	189,87	151,45	147,16	215,43
6	1,45	1,68	1,59	1,63	138,01	119,10	125,98	122,91
7	0,52	1,45	1,55	1,74	382,56	138,40	129,26	114,64
8	1,82	1,66	1,79	1,61	109,95	120,68	111,51	124,08
9	0,65	1,52	1,62	0,77	309,52	131,37	123,80	260,29
10	1,27	1,69	1,64	1,57	157,03	118,01	121,69	127,37
11	1,49	1,66	1,65	1,69	134,07	120,69	121,41	118,58
12	0,94	1,56	1,49	0,79	213,80	128,19	133,79	253,57
13	1,28	1,73	1,64	1,46	156,64	115,45	121,77	136,68
14	1,18	1,54	1,69	1,29	168,91	130,28	118,63	154,77
15	1,66	1,65	1,60	1,69	120,60	121,58	124,97	118,32
16	0,18	1,18	1,03	0,34	1098,70	168,86	194,94	591,48
17	0,90	1,49	1,48	0,54	222,22	133,84	135,24	373,39
18	0,99	1,63	1,11	1,24	202,63	122,99	179,73	161,52
19	0,97	1,57	1,51	0,99	206,33	127,50	132,66	202,06
20	1,38	1,65	1,57	1,30	145,27	121,48	127,65	154,22
21	0,43	1,39	1,03	0,98	460,84	143,76	193,25	204,34
22	0,99	1,57	1,46	0,80	202,14	127,30	136,76	248,61
23	0,22	1,43	1,31	1,16	914,09	139,56	152,71	172,15
24	0,58	1,48	1,38	0,72	347,54	135,55	144,65	276,70
25	1,24	1,68	1,66	0,86	160,94	119,27	120,58	231,83
26	1,85	1,66	1,68	1,67	108,10	120,57	118,80	119,86
27	0,52	1,52	1,37	0,60	382,72	131,30	146,45	331,42
28	1,44	1,52	1,58	1,28	138,79	131,95	126,78	155,75
29	1,69	1,69	1,74	1,77	118,36	118,63	115,23	112,79
30	1,47	1,54	1,14	0,25	136,17	130,29	176,06	785,26

Fonte: Autor.

Tabela 13. C/N, MER e Número de Condição

PONTOS	C/N (dB)		MER (dB)		NÚMERO DE CONDIÇÃO (dB)
	V	H	V	H	MÉDIA
1	13,59	11,50	33,12	31,28	0,99
2	18,94	11,60	17,17	11,71	4,97
3	17,28	13,09	17,80	14,93	3,37
4	12,45	12,54	26,23	26,75	0,81
5	14,32	14,08	28,15	27,42	2,62
6	21,35	21,63	15,18	18,27	0,73
7	19,17	14,94	22,13	22,18	3,64
8	17,34	14,53	24,88	22,36	2,52
9	14,53	11,28	35,46	32,93	1,62
10	15,35	11,71	33,92	31,29	1,47
11	15,71	13,42	32,70	28,12	2,07
12	13,50	12,51	31,84	31,58	0,92
13	17,79	15,18	19,65	17,20	4,12
14	12,08	13,66	29,12	27,86	0,84
15	12,86	13,05	28,01	27,71	1,67
16	15,80	12,04	22,93	19,44	2,46
17	12,36	13,42	28,98	29,96	0,99
18	21,97	19,95	15,53	15,53	5,38
19	13,02	14,19	32,57	34,74	0,91
20	13,23	13,56	36,80	37,60	0,55
21	12,71	14,51	22,59	20,96	1,52
22	12,04	14,29	31,26	30,37	1,27
23	11,14	12,86	23,18	25,42	0,70
24	9,69	13,75	21,43	24,41	2,25
25	13,84	12,75	30,71	27,98	0,92
26	13,49	6,38	35,51	33,77	0,78
27	13,23	13,56	36,80	37,60	1,67
28	14,49	13,37	35,90	34,92	1,05
29	20,35	16,04	17,12	16,61	4,81
30	14,29	16,33	17,70	16,17	3,71

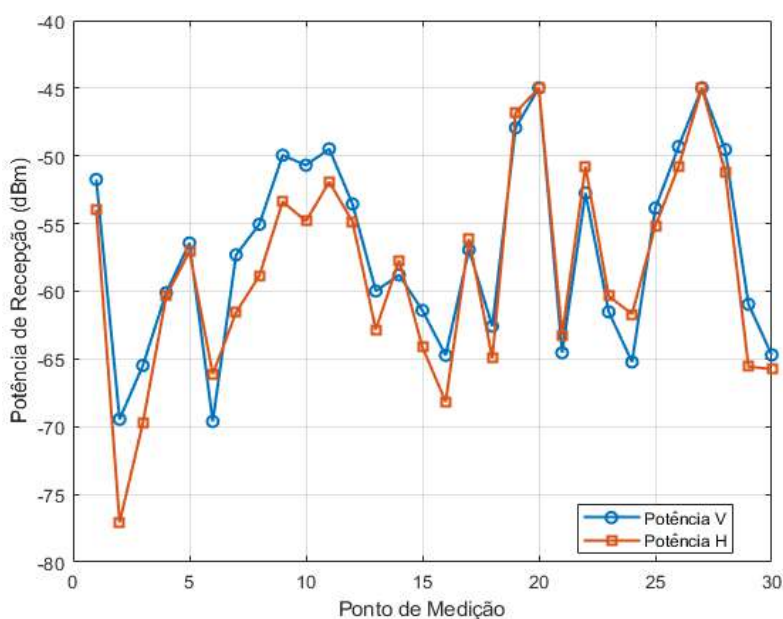
Fonte: Autor.

Com base nas informações dos pontos apresentados, foram gerados diversos gráficos no MATLAB que auxiliam na visualização e interpretação dos dados coletados. Esses gráficos permitem observar, de forma comparativa e detalhada, o comportamento dos principais parâmetros e métricas analisadas nos diferentes pontos de medição, facilitando a identificação de padrões, correlações e anomalias nos cenários avaliados.

Neste momento, serão apresentados os gráficos gerais, que sintetizam o comportamento das principais métricas analisadas ao longo dos 30 pontos de medição. Esses gráficos permitem uma visão geral do desempenho do sistema em diferentes cenários de recepção, abrangendo tanto ambientes com visada direta, quanto aqueles com presença significativa de obstáculos e multipercurso. Através dessa visualização, é possível identificar tendências gerais que fornecem um panorama para as análises subsequentes.

A Figura 13 apresenta a variação da potência de recepção ao longo dos 30 pontos de medição para as polarizações H/V. Observa-se que ambas as polarizações apresentam comportamento semelhante, com oscilações significativas ao longo do trajeto, variando aproximadamente entre -45 dBm e -77 dBm. Em diversos pontos, a potência das duas polarizações é muito próxima, indicando condições de recepção similares, porém, em alguns locais, nota-se pequenas diferenças entre elas, o que reflete pequenas variações nas condições de propagação. De forma geral, a Figura 13 evidencia um cenário de recepção variável, típico de ambientes sujeitos a multipercurso e obstruções.

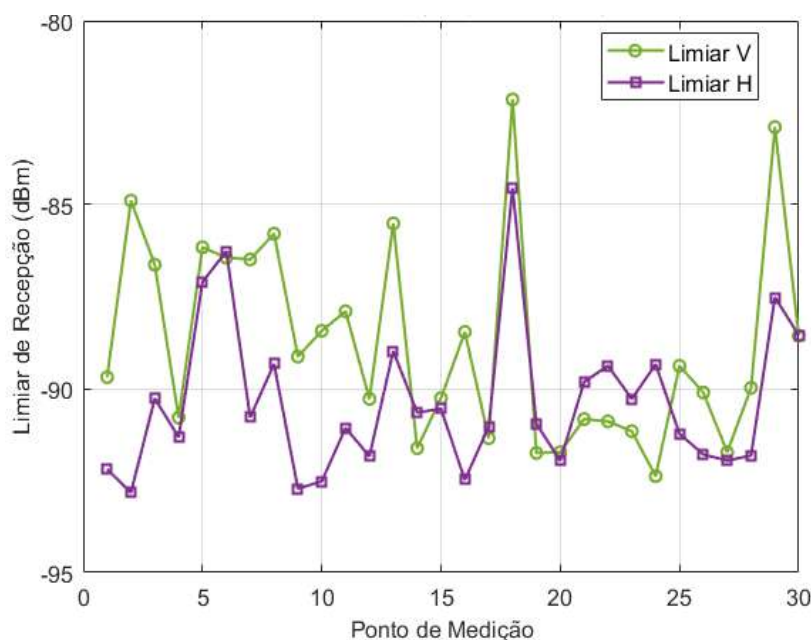
Figura 13. Potência de Recepção por Polarização



Fonte: Autor.

A Figura 14 apresenta o limiar de recepção para os 30 pontos de medição nas polarizações H/V. Observa-se que ambas as polarizações mostram variações significativas ao longo dos pontos, refletindo diferenças nas condições locais de propagação. Em diversos pontos a polarização H apresenta limiares mais baixos, indicando menor dificuldade de recepção. A polarização V, por sua vez, tende a apresentar limiares maiores em boa parte dos pontos, embora também exista variação e quedas pontuais, como no ponto 24. De modo geral, a Figura 14 evidencia que o limiar de recepção é altamente dependente do ambiente e das características de propagação, resultando em diferenças perceptíveis entre as duas polarizações.

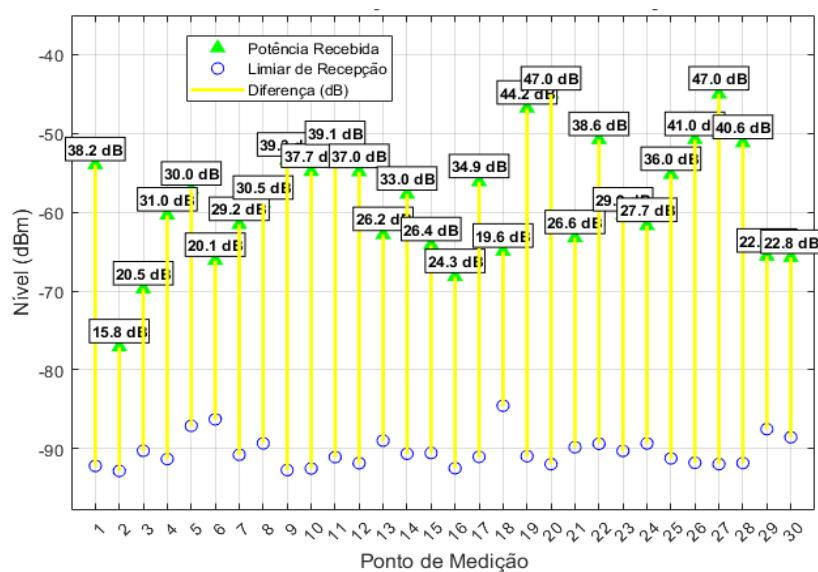
Figura 14. Limiar de Recepção por Polarização



Fonte: Autor.

A Figura 15 apresenta a diferença entre a potência de recepção e o limiar de recepção para cada ponto de medição na polarização H. Observa-se que, em todos os pontos avaliados, a potência recebida se mantém significativamente acima do limiar, com margens que variam de aproximadamente 15 dB até 47 dB. Esses valores indicam uma condição de recepção bastante favorável, garantindo ampla margem para a correta decodificação do sinal. De modo geral, a Figura 15 evidencia que, mesmo nos locais onde a potência é menor, o sinal permanece bem acima do limite mínimo necessário, demonstrando bom desempenho e alta confiabilidade na recepção.

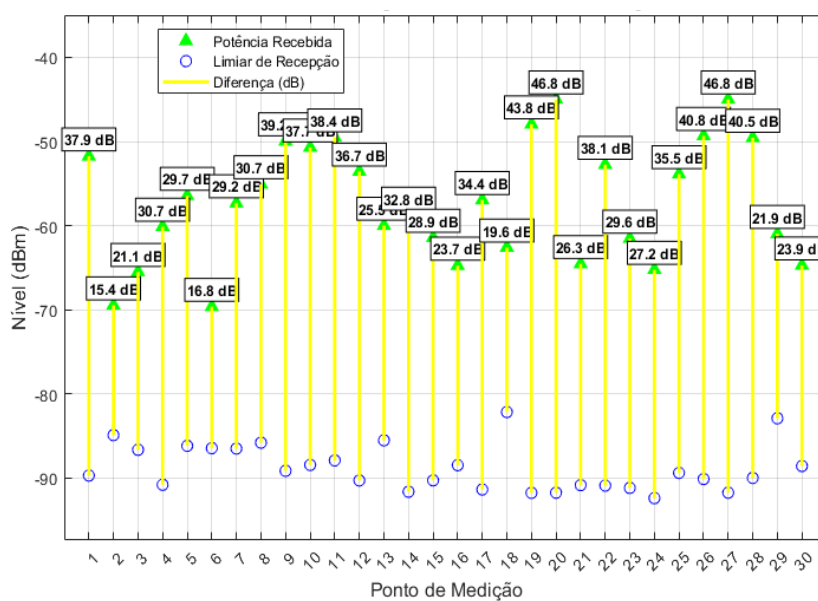
Figura 15. Potência em Relação ao Limiar - Polarização H



Fonte: Autor.

A Figura 16 apresenta a diferença entre a potência de recepção e o limiar de recepção para cada ponto de medição na polarização V. Observa-se que, em todos os pontos avaliados, a potência recebida se mantém significativamente acima do limiar, assim como na polarização H. A Figura 16 evidencia que, mesmo nos locais com menor potência, o sinal está bem acima do limite mínimo exigido, demonstrando bom desempenho e alta confiabilidade na recepção.

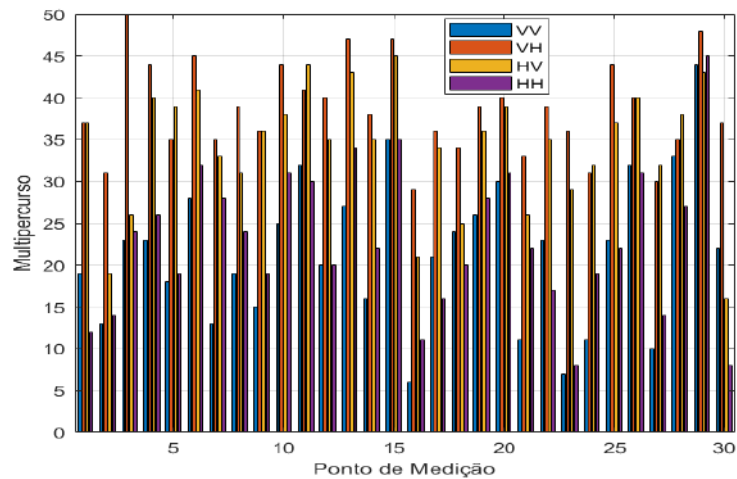
Figura 16. Potência em Relação ao Limiar - Polarização V



Fonte: Autor.

A Figura 17 apresenta a quantidade de multipercurso nos 30 pontos de medição para as quatro combinações de polarização. Nota-se uma variação significativa na quantidade de multipercurso entre os pontos, refletindo diferenças nas condições de propagação do ambiente.

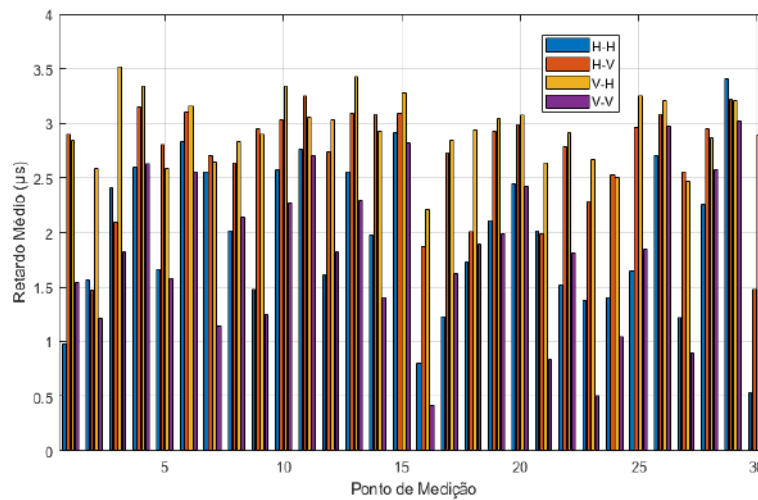
Figura 17. Quantidade de Multipercurso por Polarização



Fonte: Autor.

A Figura 18 apresenta o retardo médio para cada ponto de medição considerando as quatro combinações de polarização. Observa-se que os valores de retardo variam entre aproximadamente 1 μ s e 3,5 μ s ao longo dos pontos, indicando diferenças significativas nas condições de propagação entre os cenários avaliados.

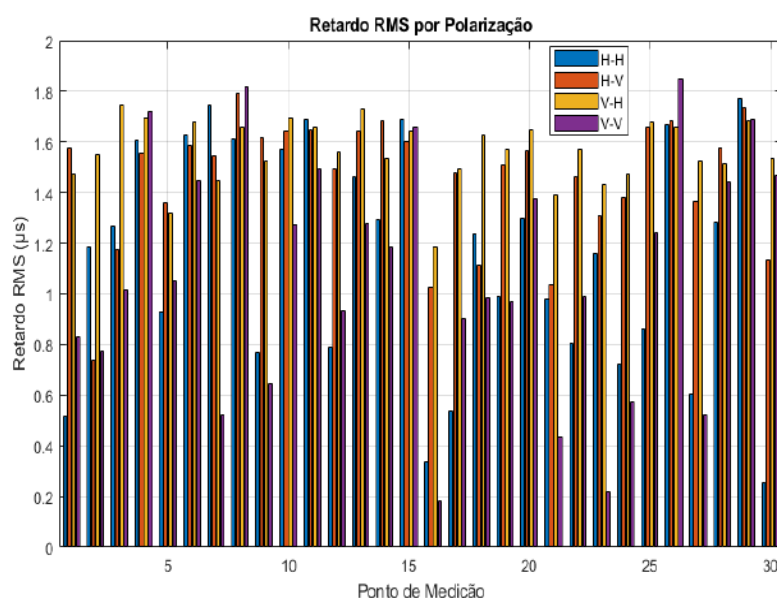
Figura 18. Retardo Médio por Polarização



Fonte: Autor.

A Figura 19 apresenta o comportamento do retardo RMS para os 30 pontos de medição considerando as quatro combinações de polarização. Observa-se que os valores variam de forma significativa entre os pontos, evidenciando a influência do ambiente na dispersão temporal do canal. As polarizações cruzadas tendem a apresentar maiores variações em comparação às polarizações copolarizadas. De modo geral, percebe-se que a dispersão temporal não se mantém uniforme ao longo dos pontos avaliados, reforçando a necessidade de analisar cada cenário individualmente para compreender plenamente o comportamento do canal e seus impactos na recepção.

Figura 19. Retardo RMS por Polarização

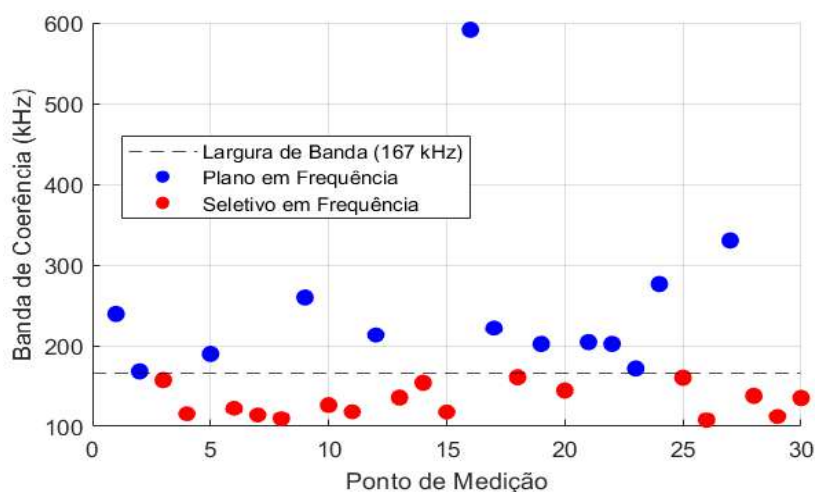


Fonte: Autor.

A Figura 20 apresenta a classificação dos tipos de desvanecimento ao longo de 30 pontos de medição, adotando a banda de coerência como critério de análise. O sistema ISDB-T Avançado é composto por 35 segmentos e possui uma largura de banda útil de 5,83 MHz, sendo que cada segmento agrupa um conjunto de subportadoras OFDM que operam em uma largura de banda aproximada de 167 kHz. Observa-se que os enlaces seletivos em frequência, representados em vermelho, são mais numerosos e se concentram abaixo da linha que indica a largura de banda de um seguimento do sistema, evidenciando valores reduzidos de banda de coerência e maior variação do canal. Já os enlaces classificados como plano em frequência, mostrados em azul, aparecem em menor quan-

tidade com maior banda de coerência e um comportamento menos variável. Essa distribuição evidencia uma predominância de condições de seletividade em frequência nos pontos avaliados, refletindo cenários mais desafiadores para a recepção.

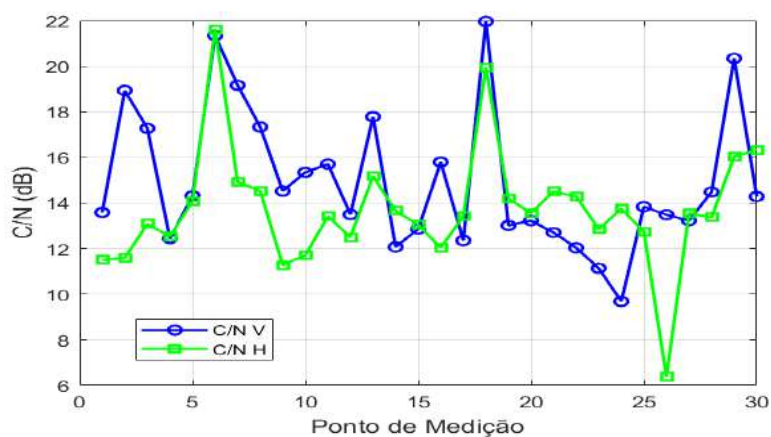
Figura 20. Classificação do Tipo de Desvanecimento



Fonte: Autor.

A Figura 21 apresenta a variação da relação C/N ao longo dos 30 pontos de medição em condição de recepção com inserção de ruído, evidenciando flutuações significativas em ambas as polarizações. Observa-se que a polarização V tende a apresentar valores mais elevados, alcançando aproximadamente 22 dB no Ponto 18. Já a polarização H apresenta seu desempenho mais crítico no Ponto 26, onde a relação C/N atinge cerca de 6,5 dB.

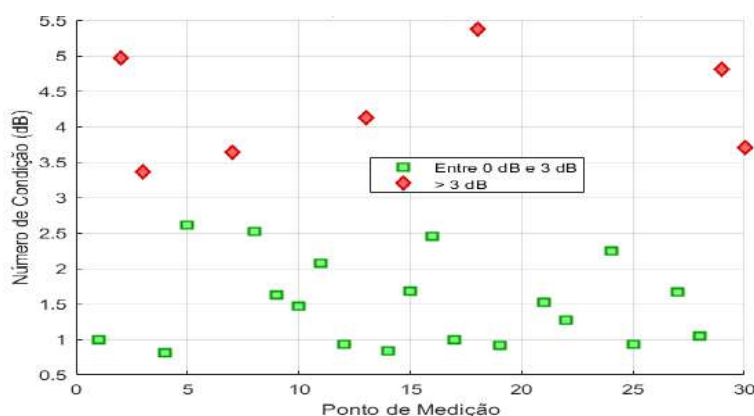
Figura 21. C/N por Ponto de Medição



Fonte: Autor.

A Figura 22 apresenta o número de condição médio para cada ponto de medição, evidenciando que a maioria dos valores obtidos neste trabalho permaneceu abaixo de 3 dB. Esse resultado indicou canais bem condicionados, o que favorece o desempenho do sistema MIMO. Em alguns pontos, o número de condição ultrapassa 3 dB, revelando situações de maior correlação entre os caminhos de propagação e condições menos favoráveis de recepção [47]. De modo geral, percebe-se cenários com maior estabilidade.

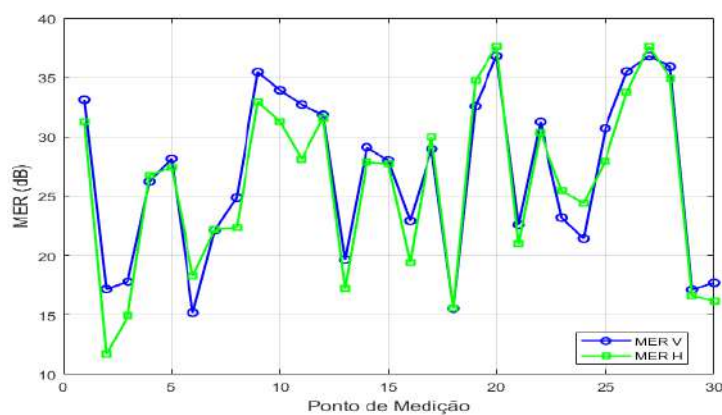
Figura 22. Número de Condição Médio por Ponto de Medição



Fonte: Autor.

A Figura 23 apresenta o comportamento da métrica MER, ao longo dos 30 pontos de medição, comparando as polarizações H/V. Observa-se uma forte correlação entre as duas curvas, evidenciando que a qualidade da modulação varia, porém similar, em ambas as polarizações. O valor máximo de MER atinge aproximadamente 38 dB no Ponto 20, indicando excelente qualidade de sinal, enquanto o valor mínimo, de cerca de 12 dB observado na polarização H do Ponto 2, representa o cenário de pior desempenho.

Figura 23. MER por Ponto de Medição



Fonte: Autor.

7.2 Avaliação do Canal e do Desempenho da Recepção MIMO

A seguir, são apresentados os resultados e análises para cada um dos 30 pontos de medição analisados ao longo do estudo. Em cada ponto, são apresentados os principais parâmetros que permitem uma avaliação detalhada da qualidade do canal e do desempenho da recepção. Os parâmetros considerados incluem:

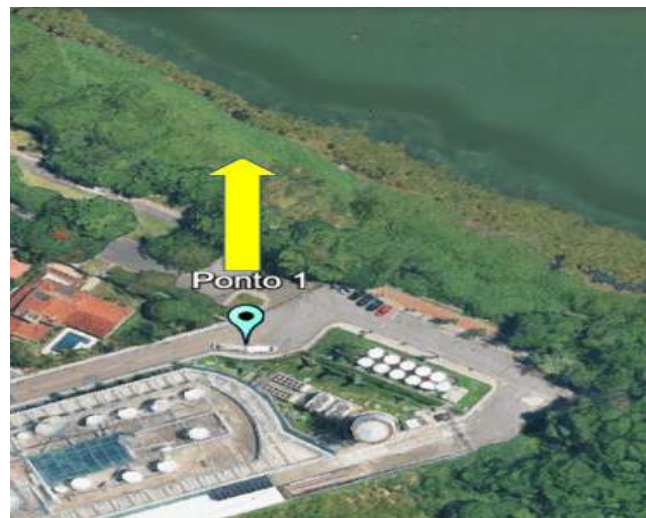
- Resposta em Frequência, que revela as características espectrais do canal.
- Número de Condição, que indica o grau de condicionamento do canal.
- Perfil de Potência de Retardos, que evidencia a dispersão temporal do canal.
- Diagrama de Constelação, que permite observar a integridade do sinal recebido.

A apresentação individual desses resultados possibilita uma compreensão mais detalhada da caracterização do canal e das variações entre os diferentes cenários analisados, servindo como fundamento para as análises finais e para as correlações que serão discutidas posteriormente neste trabalho.

1) Análise do Ponto 01

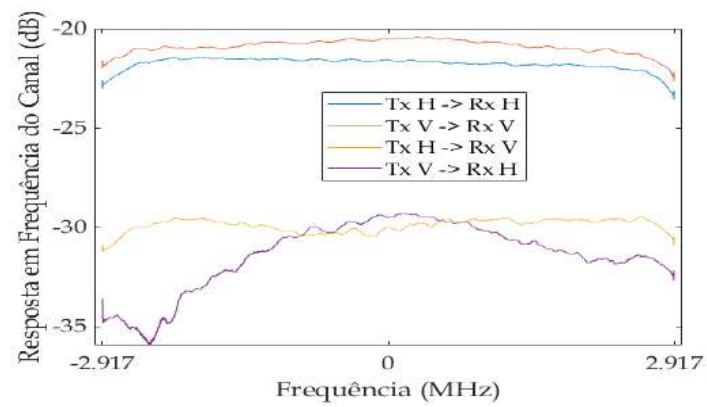
O Ponto 1 (Figura 24) estava localizado em uma área composta por prédios de altura média e presença moderada de vegetação, próximo à Lagoa da Tijuca e à sede da TV Globo, caracterizando um ambiente relativamente aberto e com poucos obstáculos significativos à propagação do sinal. A resposta em frequência do canal (Figura 25) apresentou um comportamento estável ao longo de toda a banda analisada, sem variações bruscas entre os diferentes enlaces, o que indica um canal pouco sujeito à seletividade em frequência. O número de condição (Figura 26) manteve-se baixo em toda a faixa observada, evidenciando boa ortogonalidade entre os canais MIMO e favorecendo a eficiência do processo de detecção. O perfil de potência de retardos (Figura 27) revelou baixa dispersão temporal, o que reforça a caracterização de um canal pouco seletivo. Consequentemente, a banda de coerência estimada classificou o canal MIMO como plano em frequência, uma vez que os enlaces copolares não apresentaram comportamento seletivo. As constelações (Figura 28) exibiram símbolos bem definidos e com baixa dispersão, o que está em concordância com os valores de MER, reforçando a qualidade do sinal recebido. Assim, o Ponto 1 configura um cenário extremamente favorável para a recepção MIMO, apresentando excelente desempenho tanto em termos de MER quanto de número de condição, caracterizando-se como um ambiente excelente para a transmissão.

Figura 24. Imagem de satélite do Ponto 1



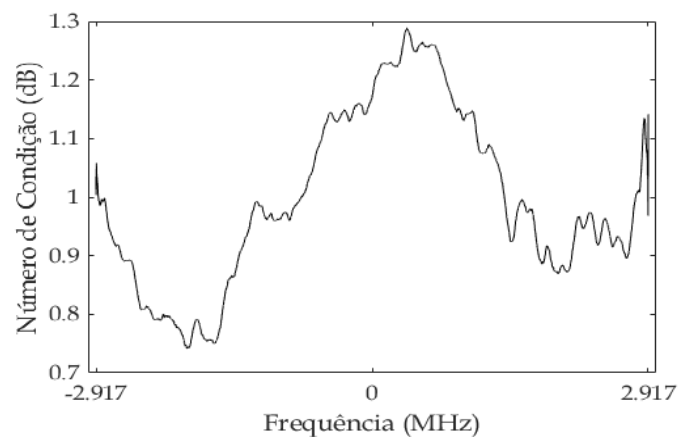
Fonte: Autor.

Figura 25. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 01



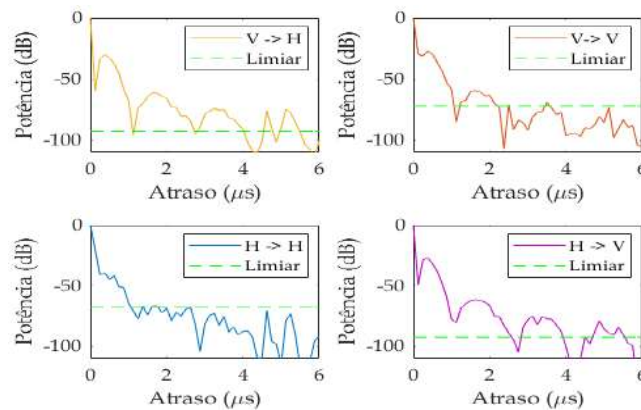
Fonte: Autor.

Figura 26. Número de Condição – Ponto 01



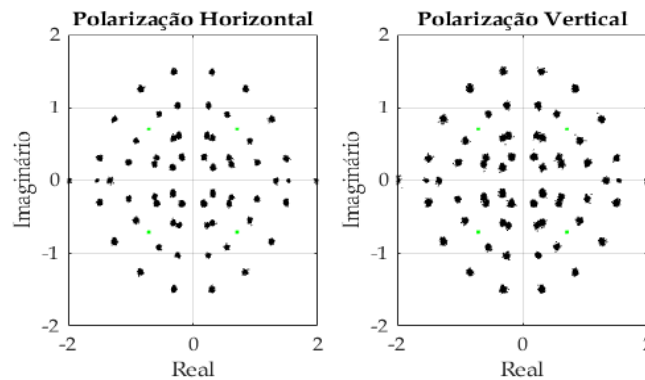
Fonte: Autor.

Figura 27. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 01



Fonte: Autor.

Figura 28. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 01



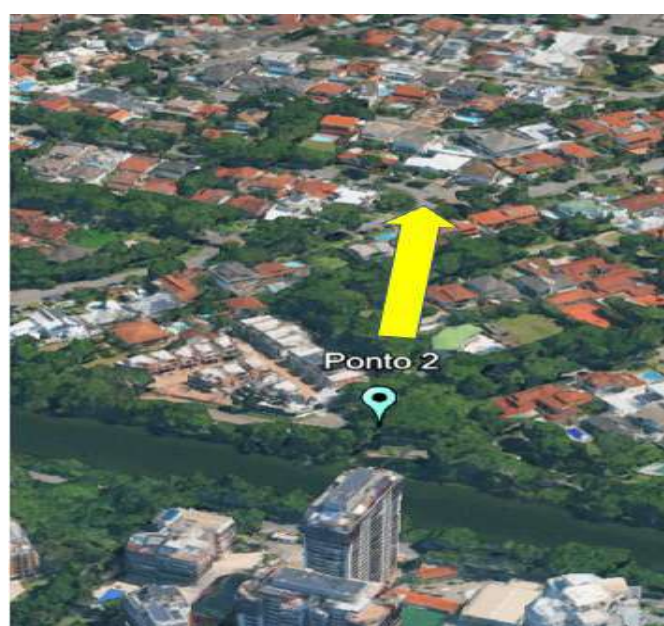
Fonte: Autor.

2) Análise do Ponto 02

O Ponto 2 (Figura 29) estava localizado em uma rua com pouco trânsito e vegetação moderada, nas proximidades do Canal de Marapendi. Entretanto, a presença do morro conhecido como Morro do Sonho, de relevo elevado, introduziu obstruções na propagação do sinal e perda na intensidade do sinal. Com isso, contribuindo para um cenário mais complexo de recepção. A resposta em frequência do canal (Figura 30) apresentou comportamento bastante instável entre os diferentes enlaces, com variações bruscas ao longo da banda analisada. O número de condição (Figura 31) revelou uma expressiva perda de ortogonalidade entre os canais MIMO, o que compromete o desempenho do sistema. O perfil de potência de retardos (Figura 32) revelou dispersão temporal instável, indicando a predominância de trajetórias diretas e poucos multipercurso. Consequentemente, a banda de coerência estimada classificou o canal MIMO como plano em frequência, uma vez que

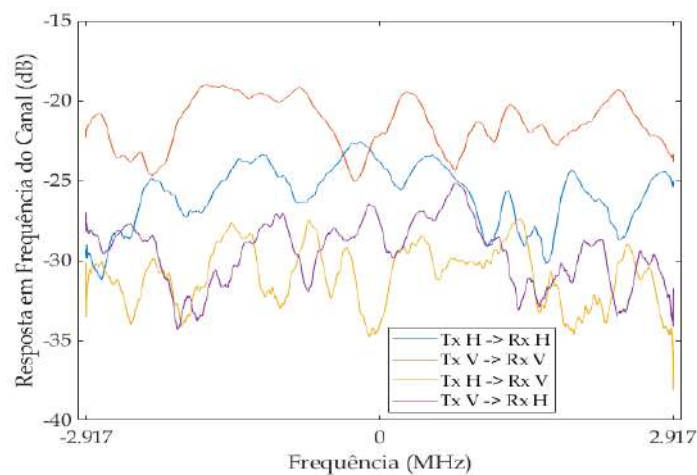
os enlaces copolares apresentaram comportamento pouco seletivo. As constelações (Figura 33) apresentaram pontos pouco definidos e com elevada dispersão, em conformidade com os valores observados de MER. De forma geral, o Ponto 2 representa um cenário crítico em comparação ao Ponto 1, devido à baixa potência de recepção, à degradação da MER e ao número de condição elevado. Esses fatores estão diretamente relacionados à obstrução causada pelo Morro do Sonho, resultando em condições mais desafiadoras e baixo desempenho para a recepção MIMO.

Figura 29. Imagem de satélite do Ponto 2



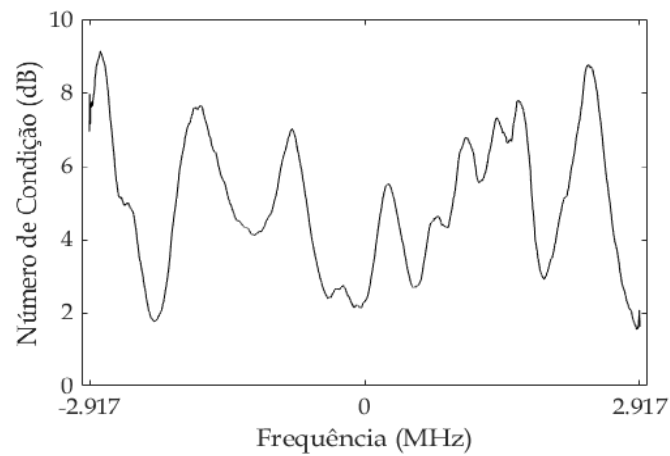
Fonte: Autor.

Figura 30. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 02



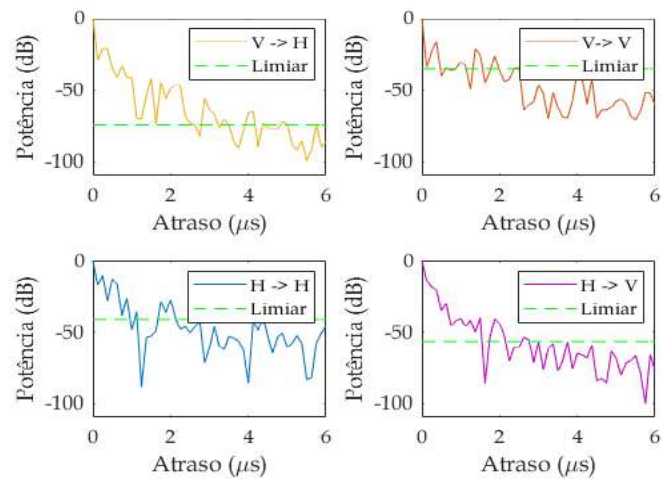
Fonte: Autor.

Figura 31. Número de Condição – Ponto 02



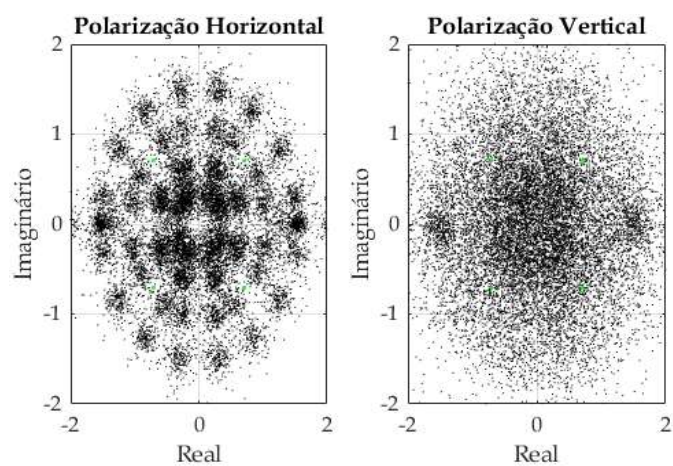
Fonte: Autor.

Figura 32. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 02



Fonte: Autor.

Figura 33. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 02



Fonte: Autor.

3) Análise do Ponto 03

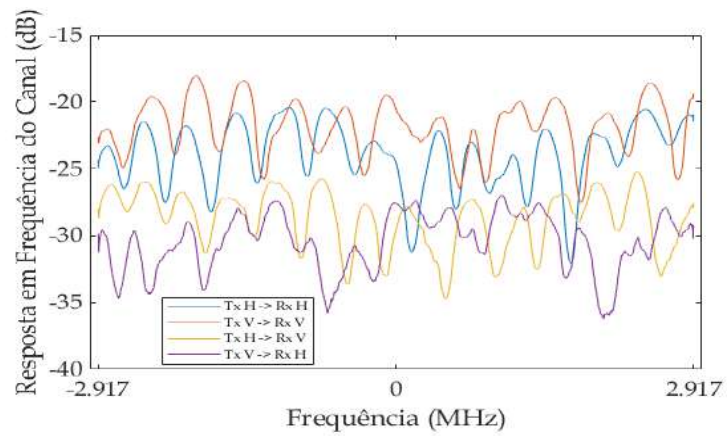
O Ponto 3 (Figura 34) estava localizado em uma rua de baixo fluxo de veículos, com pouca vegetação e nas proximidades de edificações de grande porte. Além disso, assim como no Ponto 2, havia a presença do Morro do Sonho, que atuou como uma barreira natural à propagação do sinal. Esse conjunto de fatores resultou em condições adversas de propagação, ocasionando degradação significativa na recepção MIMO. A resposta em frequência do canal (Figura 35) apresentou comportamento bastante instável entre os diferentes enlaces de polarização, com variações bruscas ao longo de toda a banda analisada. O número de condição (Figura 36), revelou uma expressiva perda de ortogonalidade entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 37) apresentou elevada dispersão temporal, esse comportamento indica um ambiente fortemente com presença de multipercurso, o que, conseqüentemente, resultou em uma banda de coerência reduzida e caracterizada como seletiva em frequência. As constelações (Figura 38) apresentaram ampla dispersão dos pontos, em concordância com os baixos valores de MER. Esses resultados evidenciam uma acentuada degradação na qualidade do sinal recebido. De forma geral, o Ponto 3 apresentou um cenário desfavorável para a recepção MIMO. O conjunto de evidências indica que a topografia local e a presença de barreiras físicas exerceram influência significativa na degradação das condições do canal, comprometendo o desempenho do sistema.

Figura 34. Imagem de satélite do Ponto 3



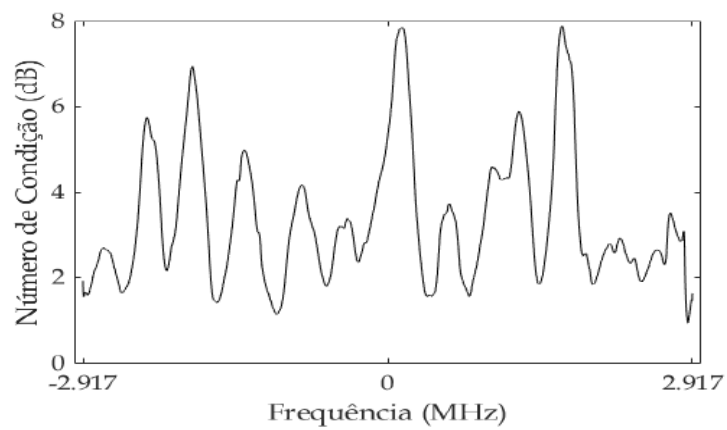
Fonte: Autor.

Figura 35. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 03



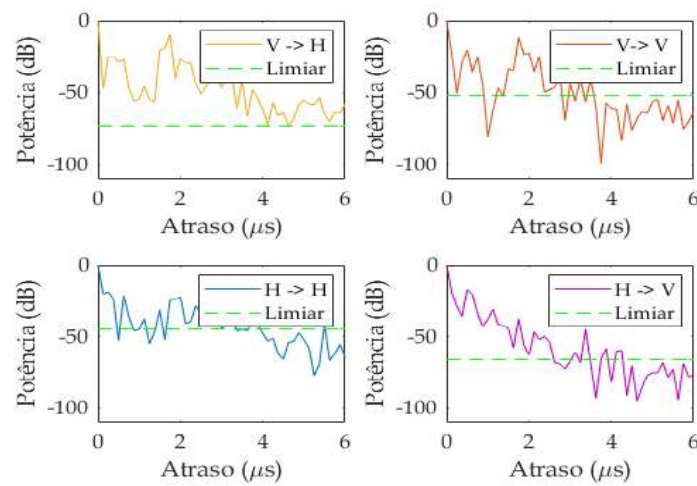
Fonte: Autor.

Figura 36. Número de Condição – Ponto 03



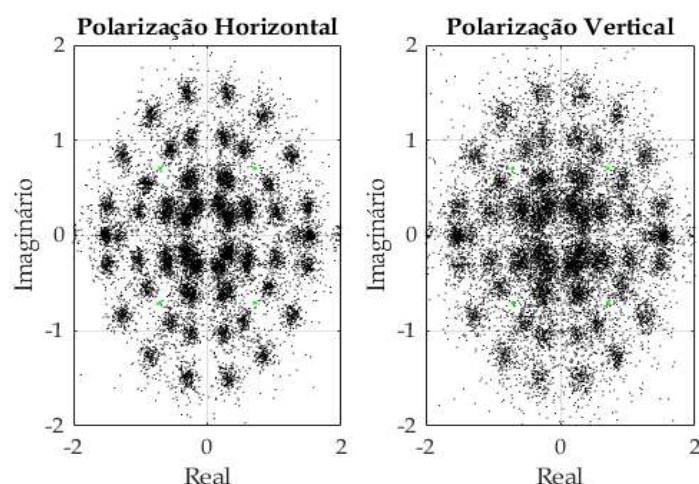
Fonte: Autor.

Figura 37. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 03



Fonte: Autor.

Figura 38. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 03



Fonte: Autor.

4) Análise do Ponto 04

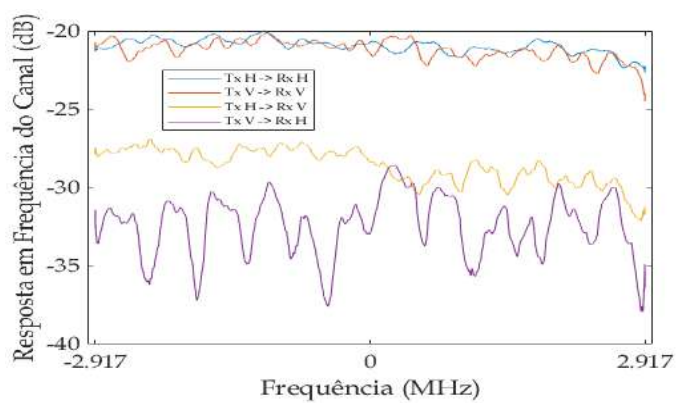
O Ponto 4 (Figura 39) estava localizado às margens da Lagoa da Tijuca, em um ambiente mais aberto entre o transmissor e o receptor. No entanto, a presença de superfície d'água e do Morro do Sonho introduziu efeitos adicionais. Ainda assim, os resultados obtidos foram superiores aos observados nos Pontos 2 e 3, onde o Morro do Sonho atuava como barreira natural à propagação. A resposta em frequência do canal (Figura 40) mostrou nos enlaces copolarizados um comportamento relativamente estável e sem atenuações profundas, já os enlaces cruzados apresentaram maior atenuação. O número de condição (Figura 41) se manteve baixo e com pequenas oscilações ao longo da banda, indicando bom condicionamento do canal MIMO e, portanto, alta separabilidade espacial entre os fluxos transmitidos. O perfil de potência de retardos (Figura 42) evidenciou uma alta dispersão temporal. Esse comportamento indica um ambiente com forte influência de multipercurso, no qual as reflexões e difrações desempenham papel relevante na modelagem do canal. Como consequência, a banda de coerência resultante apresentou-se reduzida e classificou-se como seletiva em frequência. As constelações (Figura 43) mostraram pontos bem concentrados ao redor das posições ideais, com pouca dispersão. Essas características refletem os altos valores de MER. De forma geral, o Ponto 4 apresentou bom desempenho na recepção MIMO, representando um cenário de propagação favorável. Mesmo com uma banda de coerência seletiva em frequência, o sinal manteve excelente qualidade, evidenciando condições adequadas para a transmissão e recepção eficientes.

Figura 39. Imagem de satélite do Ponto 4



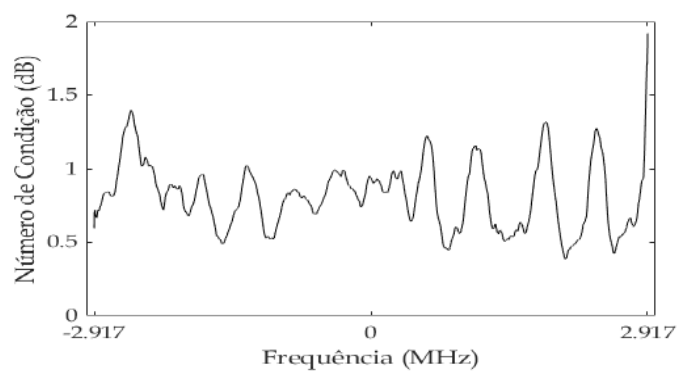
Fonte: Autor.

Figura 40. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 04



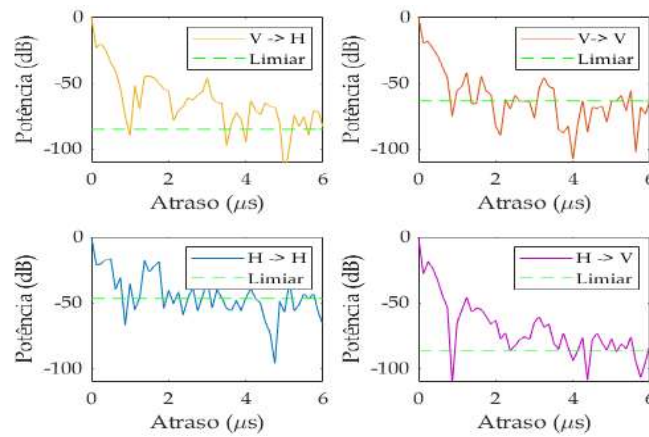
Fonte: Autor.

Figura 41. Número de Condição – Ponto 04



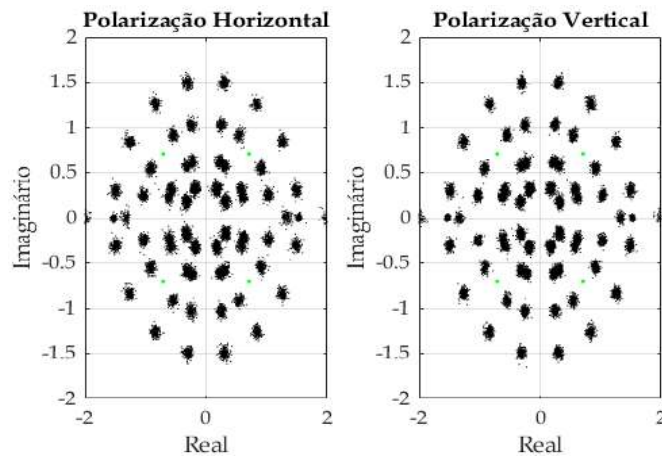
Fonte: Autor.

Figura 42. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 04



Fonte: Autor.

Figura 43. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 04



Fonte: Autor.

5) Análise do Ponto 05

O Ponto 5 (Figura 44) estava localizado em uma rua de baixo fluxo de veículos e com pouca vegetação, nas proximidades de algumas edificações e da Lagoa da Tijuca. A resposta em frequência do canal (Figura 45) apresentou comportamento um pouco instável entre os diferentes enlaces de polarização, com variações ao longo de toda a banda analisada. O número de condição (Figura 46), mostrou uma pequena perda de ortogonalidade entre os canais MIMO. Esse resultado indica uma pequena correlação entre os fluxos, o que afeta um pouco a eficiência das equalizações. O perfil de potência de retardos (Figura 47) revelou baixa dispersão temporal nos caminhos copolares. Consequentemente, a banda de coerência estimada classificou o canal MIMO como plano em frequência, uma vez que os enlaces copolares não apresentaram comportamento seletivo. As

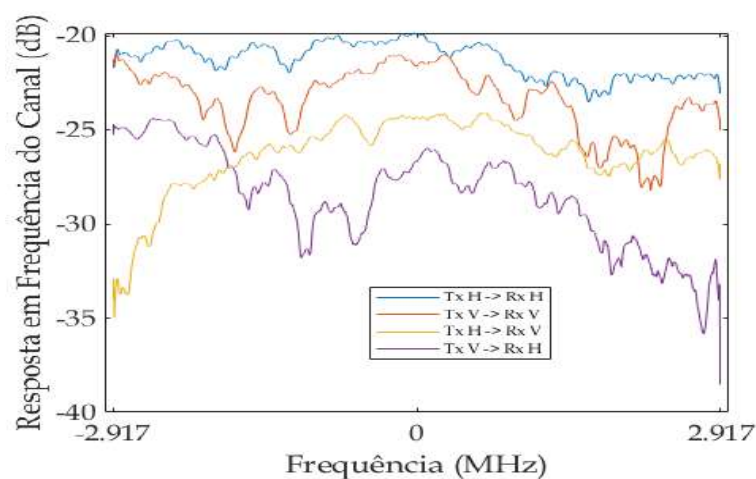
constelações (Figura 48) apresentaram uma dispersão dos pontos moderada. Esses resultados evidenciam pequena degradação na qualidade do sinal recebido. De forma geral, o Ponto 5 apresentou desempenho moderado para recepção MIMO, com potência adequada, mas limitada pela correlação e perda da ortogonalidade do canal. Esse conjunto de fatores indica que a topografia local e as barreiras físicas exerceram influência determinante na degradação do canal.

Figura 44. Imagem de satélite do Ponto 5



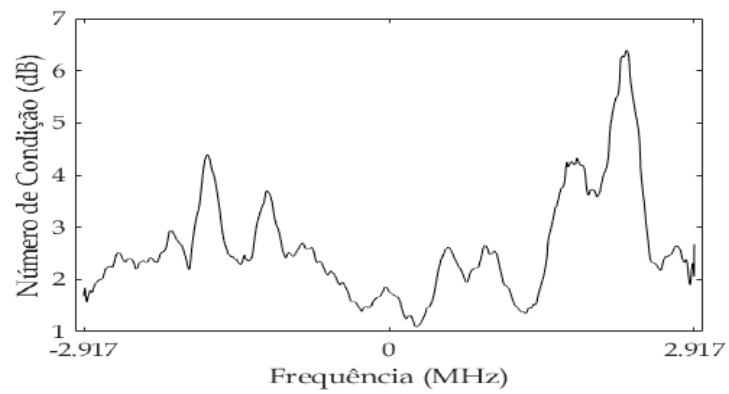
Fonte: Autor.

Figura 45. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 05



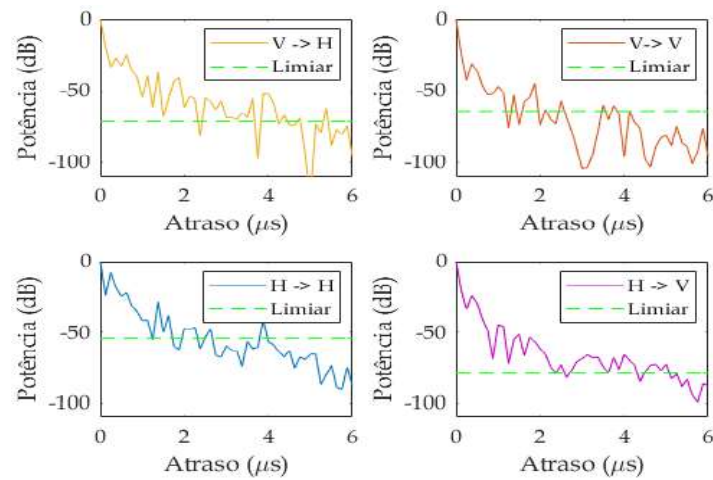
Fonte: Autor.

Figura 46. Número de Condição – Ponto 05



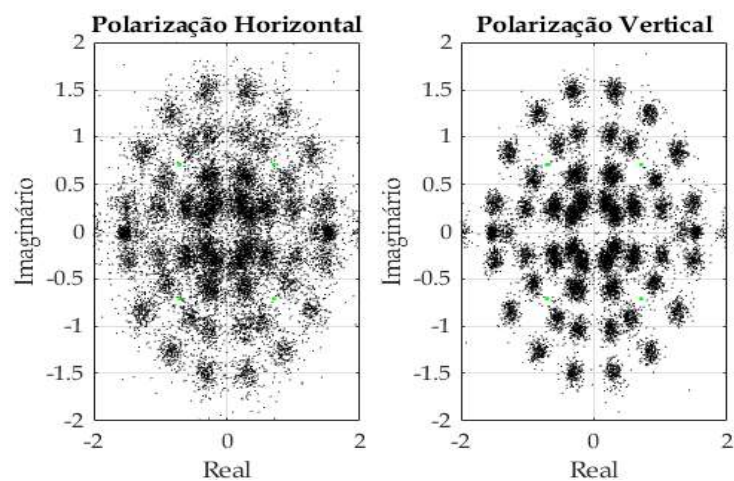
Fonte: Autor.

Figura 47. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 05



Fonte: Autor.

Figura 48. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 05



Fonte: Autor.

6) Análise do Ponto 06

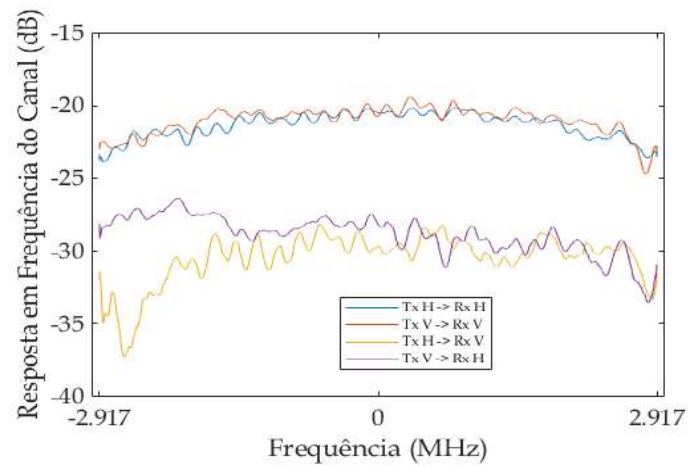
O Ponto 6 (Figura 49) estava localizado nas proximidades do Barra Shopping, em uma região caracterizada por prédios altos, vegetação moderada e próximo a Lagoa da Tijuca. Esse conjunto de elementos configurou um ambiente de propagação mais complexo, sujeito a múltiplas reflexões, difrações e espalhamentos, o que favoreceu a ocorrência de efeitos de multipercurso. A resposta em frequência do canal (Figura 50) apresentou pequenas variações ao longo do espectro. O número de condição (Figura 51) revelou boa separabilidade entre os canais MIMO e baixa correlação, evidenciando boa diversidade espacial. O perfil de potência de retardos (Figura 52) apresentou elevada dispersão temporal, o que resultou em uma banda de coerência reduzida e caracterizada como seletiva em frequência. Apesar desse comportamento mais crítico do canal, as constelações (Figura 53) exibiram baixa dispersão dos símbolos, indicando boa qualidade de recepção e níveis de ruído relativamente baixos. De forma geral, o Ponto 6 revelou um cenário favorável para a recepção MIMO, demonstrando boa ortogonalidade entre os canais e desempenho consistente. Mesmo diante da seletividade acentuada, o resultado final foi satisfatório.

Figura 49. Imagem de satélite do Ponto 6



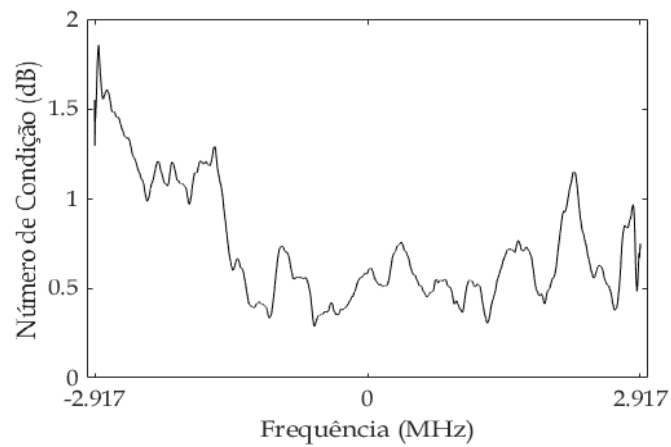
Fonte: Autor.

Figura 50. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 06



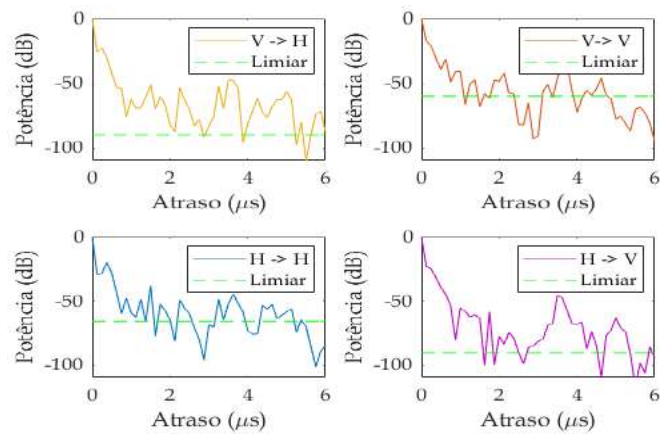
Fonte: Autor.

Figura 51. Número de Condição – Ponto 06



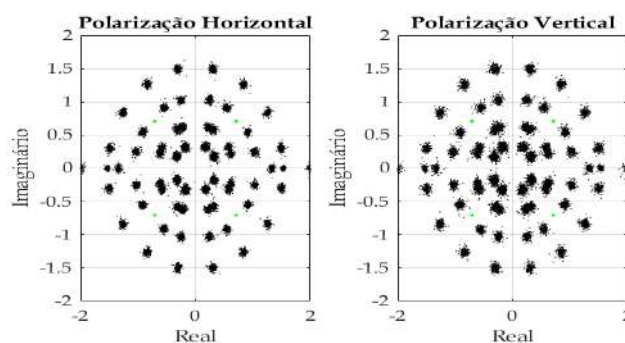
Fonte: Autor.

Figura 52. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 06



Fonte: Autor.

Figura 53. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 06



Fonte: Autor.

7) Análise do Ponto 7

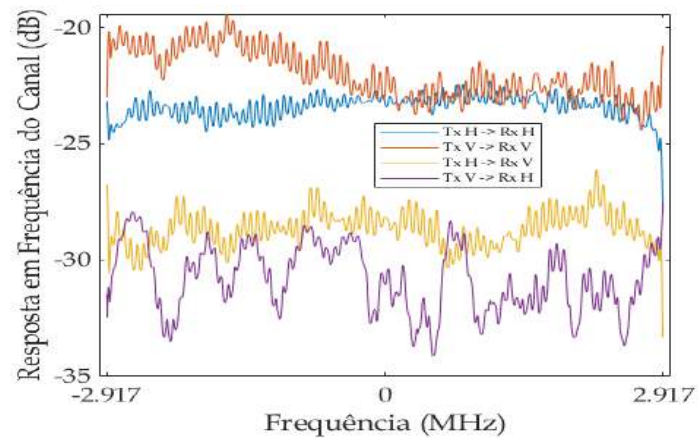
O Ponto 7 (Figura 54) estava situado em uma área urbana próximo à avenida, com edificações de médio porte e algumas áreas abertas, resultando em um ambiente parcialmente obstruído. A resposta em frequência do canal (Figura 55) apresentou comportamento bastante instável, com variações bruscas. O número de condição (Figura 56) revelou uma expressiva perda de ortogonalidade entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 57) revelou ampla dispersão temporal e, como consequência, uma banda de coerência reduzida e seletiva em frequência. As constelações (Figura 58) apresentaram uma dispersão moderada dos símbolos, indicando uma pequena perda de qualidade na recepção. De forma geral, o Ponto 7 apresentou desempenho limitado para recepção MIMO, com potência adequada, mas limitada pela alta correlação e baixa ortogonalidade do canal.

Figura 54. Imagem de satélite do Ponto 7



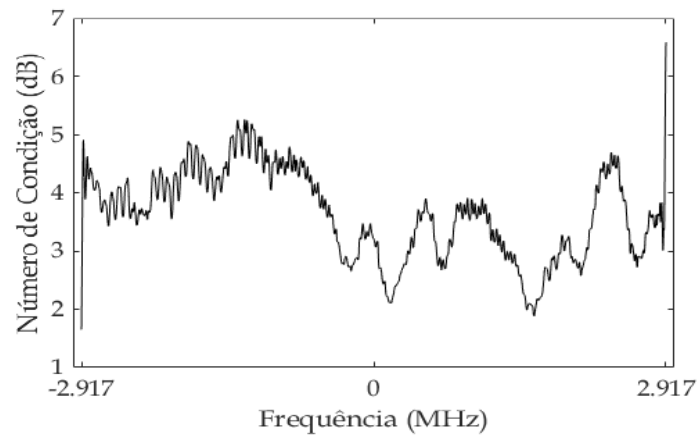
Fonte: Autor.

Figura 55. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 07



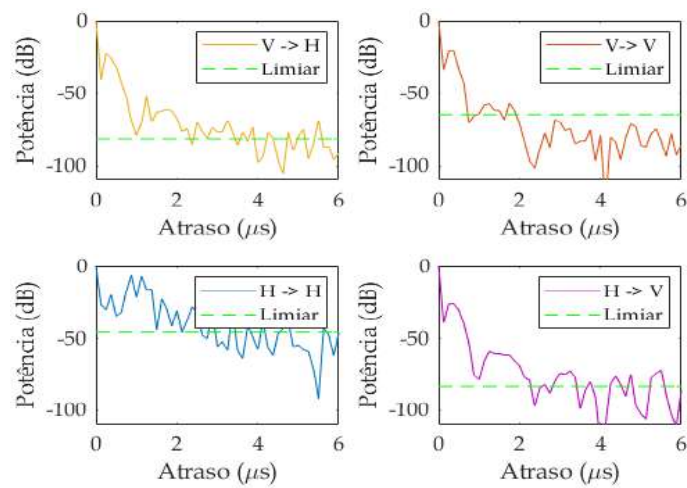
Fonte: Autor.

Figura 56. Número de Condição – Ponto 07



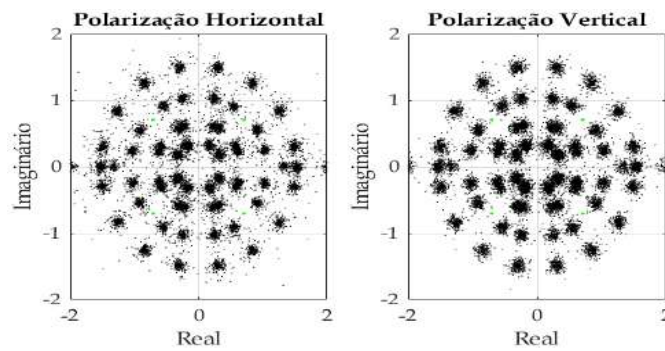
Fonte: Autor.

Figura 57. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 07



Fonte: Autor.

Figura 58. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 07



Fonte: Autor.

8) Análise do Ponto 08

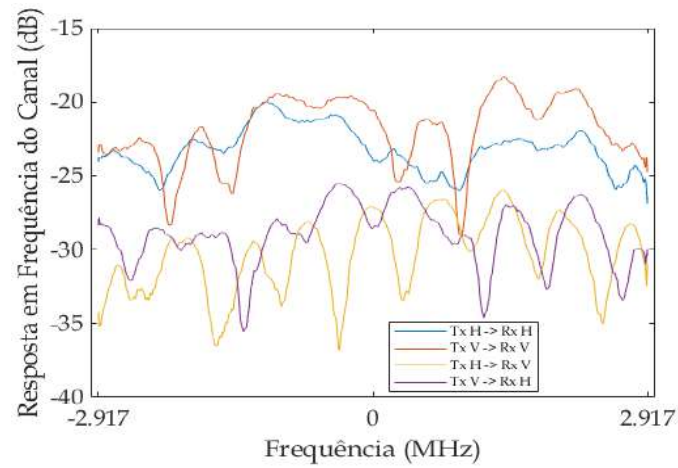
O Ponto 8 (Figura 59), estava localizado em frente a um conjunto de prédios, cercado por vegetação moderada, configurando um ambiente com diversos obstáculos e forte presença de multipercurso. A resposta em frequência do canal (Figura 60) apresentou seletividade, com instabilidades perceptíveis. O número de condição (Figura 61) apresentou valores moderados, indicando maior correlação entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 62) apresentou elevada dispersão temporal, o que, consequentemente, resultou em uma banda de coerência reduzida e caracterizada como seletiva em frequência. As constelações (Figura 63) apresentaram dispersão moderada e uma pequena degradação na qualidade do sinal recebido. De forma geral, o Ponto 8 apresentou um desempenho moderado para recepção MIMO, com potência adequada, porém limitada pela correlação entre canais e pela seletividade em frequência.

Figura 59. Imagem de satélite do Ponto 8



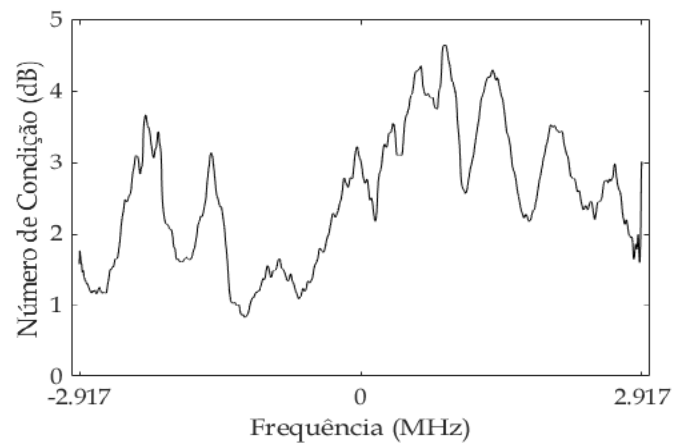
Fonte: Autor.

Figura 60. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 08



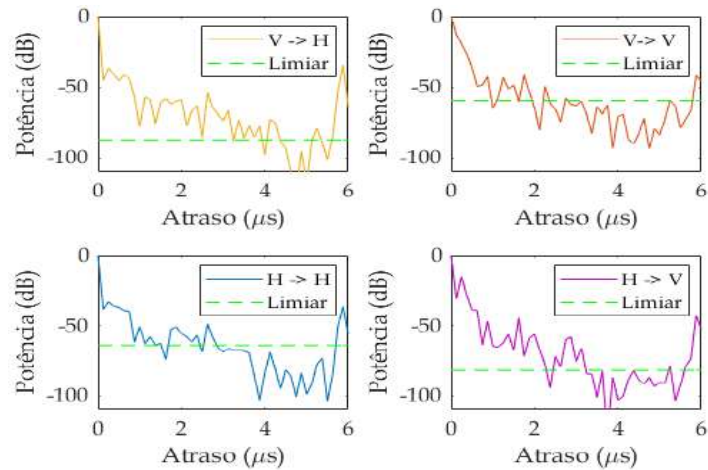
Fonte: Autor.

Figura 61. Número de Condição – Ponto 08



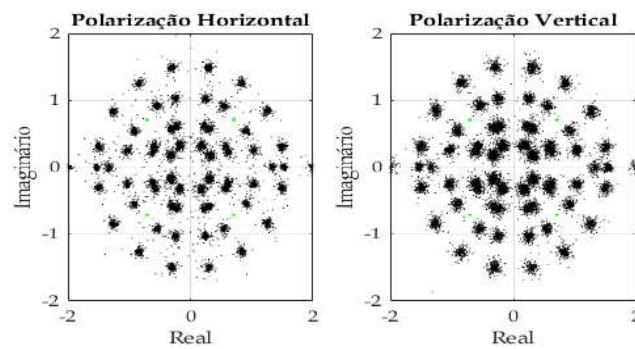
Fonte: Autor.

Figura 62. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 08



Fonte: Autor.

Figura 63. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 08



Fonte: Autor.

9) Análise do Ponto 09

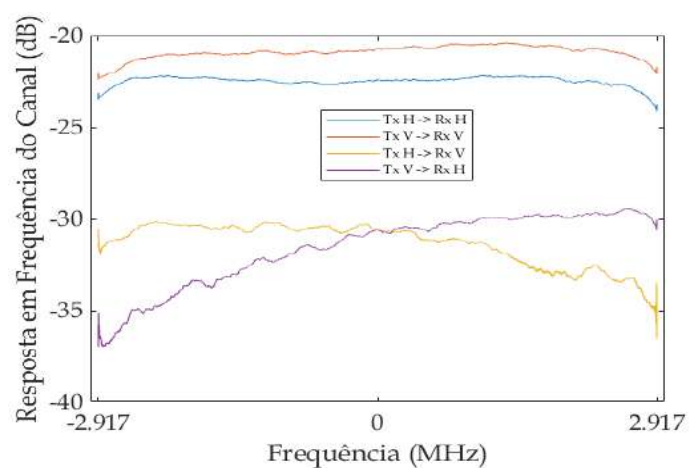
O Ponto 9 (Figura 64) estava localizado em uma região próxima a Lagoa do Camorim, caracterizada por vegetação densa e edificações residenciais de médio porte, configurando um ambiente com combinação de áreas abertas e obstruções. A resposta em frequência do canal (Figura 65) apresentou baixa seletividade. O número de condição (Figura 66) indicou baixa correlação entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 67) revelou uma dispersão temporal reduzida, característica de um ambiente com baixa presença de multipercursos, resultando em uma banda de coerência plana em frequência. As constelações (Figura 68) exibiram símbolos bem definidos e concentrados, o que reforça a boa qualidade do sinal recebido. De forma geral, o Ponto 9 configura um cenário favorável para a recepção MIMO, apresentando excelente desempenho.

Figura 64. Imagem de satélite do Ponto 9



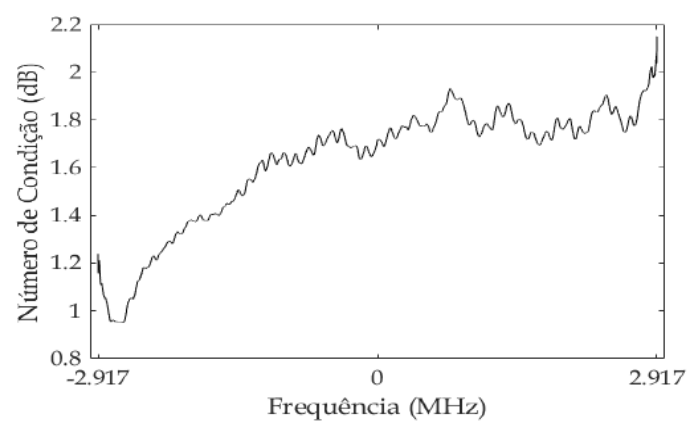
Fonte: Autor.

Figura 65. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 09



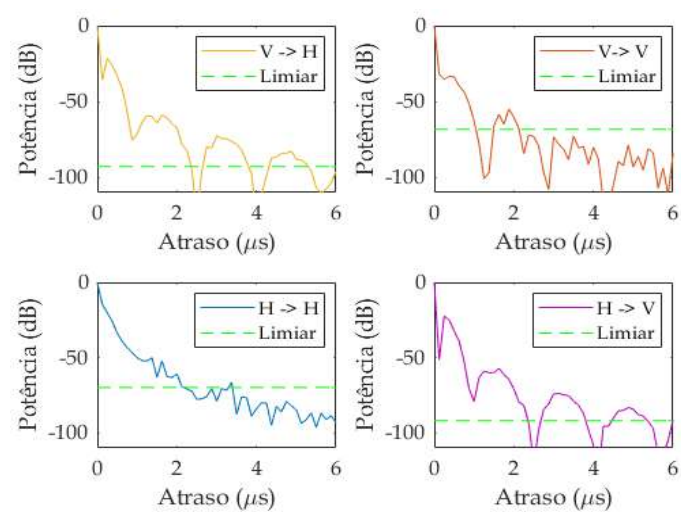
Fonte: Autor.

Figura 66. Número de Condição – Ponto 09



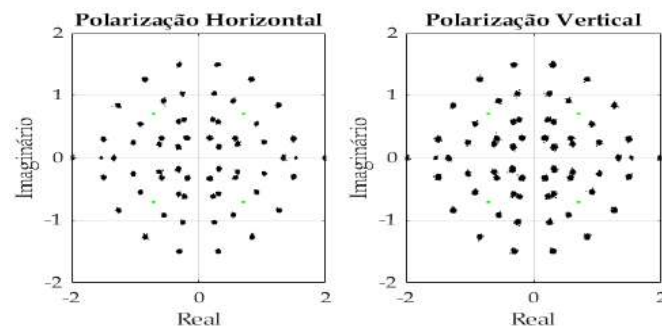
Fonte: Autor.

Figura 67. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 09



Fonte: Autor.

Figura 68. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 09



Fonte: Autor.

10) Análise do Ponto 10

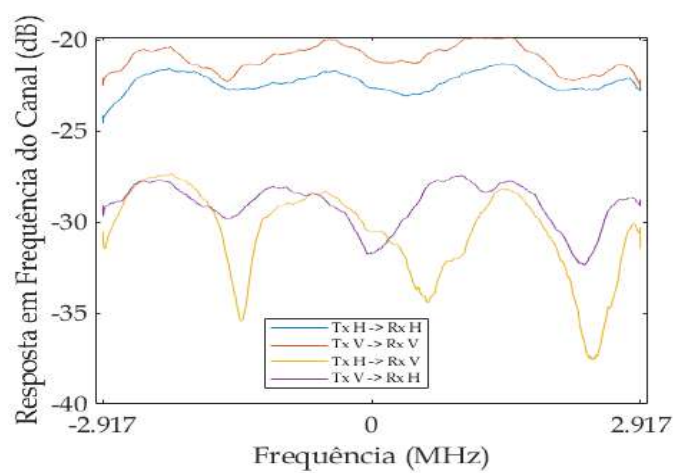
O Ponto 10 (Figura 69) estava localizado em uma área urbana densa e irregular, próxima a diversas construções baixas e ao galpão do Assaí Atacadista, configurando um ambiente com forte presença de multipercurso. A resposta em frequência (Figura 70) mostrou nos enlaces copolarizados um comportamento relativamente estável e sem atenuações profundas, já os enlaces cruzados apresentaram maior atenuação. O número de condição (Figura 71) indicou boa ortogonalidade entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 72) apresentou alta dispersão temporal, resultado de um ambiente fortemente influenciado por multipercurso. Como efeito, a banda de coerência tornou-se reduzida e o canal foi classificado como seletivo em frequência. As constelações (Figura 73) apresentaram pontos bem definidos e centralizados. De forma geral, o Ponto 10 apresentou desempenho satisfatório e boa robustez na recepção MIMO.

Figura 69. Imagem de satélite do Ponto 10



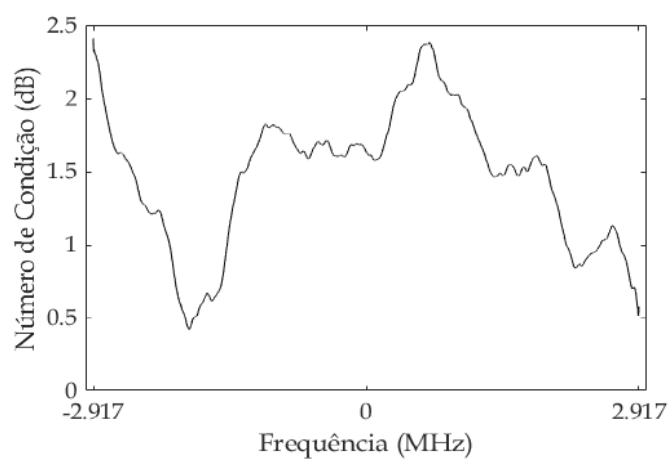
Fonte: Autor.

Figura 70. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 10



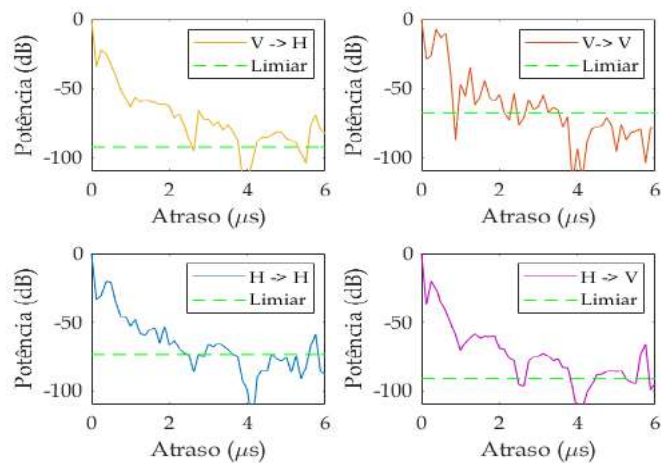
Fonte: Autor.

Figura 71. Número de Condição – Ponto 10



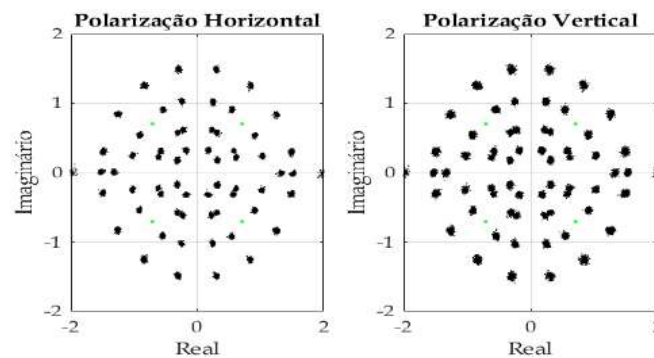
Fonte: Autor.

Figura 72. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 10



Fonte: Autor.

Figura 73. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 10



Fonte: Autor.

11) Análise do Ponto 11

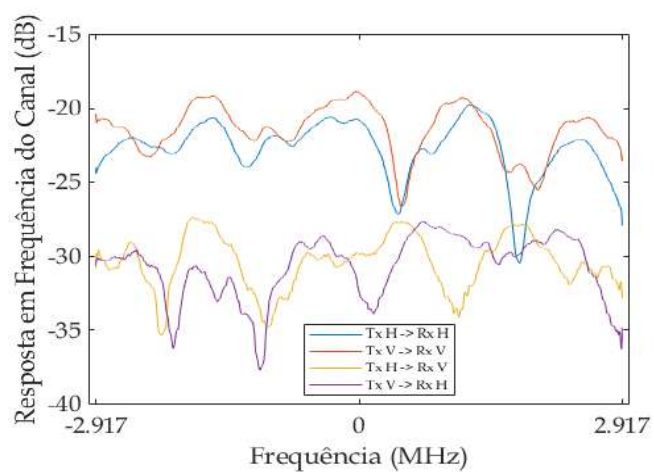
O Ponto 11 (Figura 74) estava localizado em uma área urbana densa, cercada por edifícios altos e próximos entre si, configurando um ambiente com forte presença de multipercurso. A resposta em frequência (Figura 75) apresentou seletividade moderada, com pequenas variações entre as combinações de polarização. O número de condição (Figura 76) indicou uma ortogonalidade moderada entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 77) revelou ampla dispersão temporal e banda de coerência seletiva em frequência em toda a faixa analisada. As constelações (Figura 78) mostraram pontos bem definidos e centralizados, coerentes com os valores de MER obtidos. De forma geral, o Ponto 11 apresentou um canal seletivo em frequência, típico de cenários urbanos densos, mas com desempenho satisfatório e boa robustez na recepção MIMO.

Figura 74. Imagem de satélite do Ponto 11



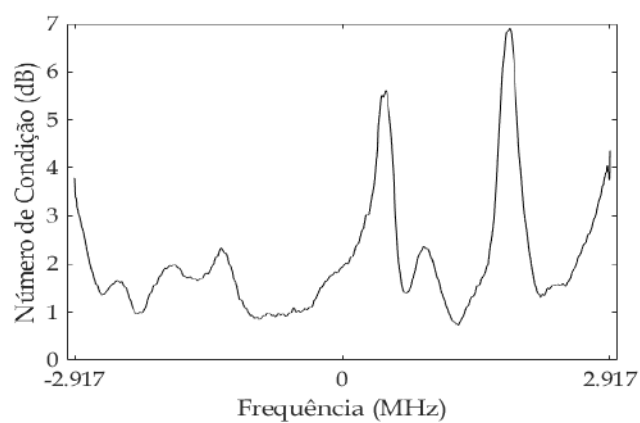
Fonte: Autor.

Figura 75. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 11



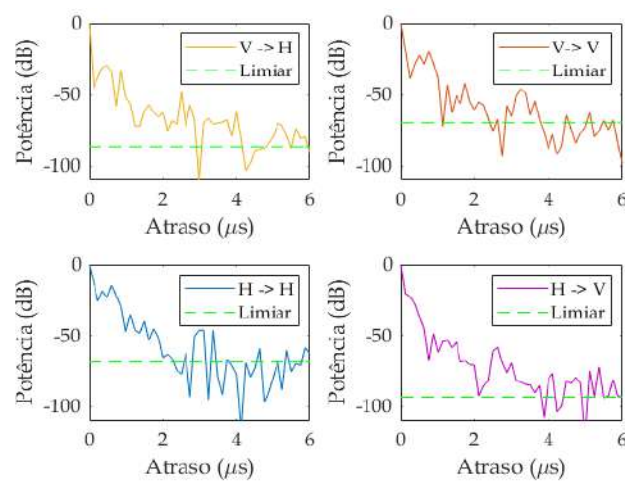
Fonte: Autor.

Figura 76. Número de Condição – Ponto 11



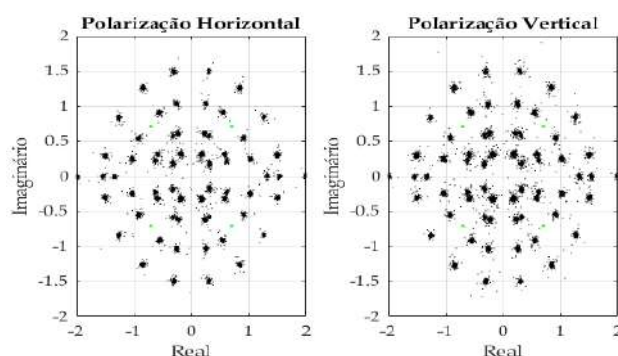
Fonte: Autor.

Figura 77. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 11



Fonte: Autor.

Figura 78. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 11



Fonte: Autor.

12) Análise do Ponto 12

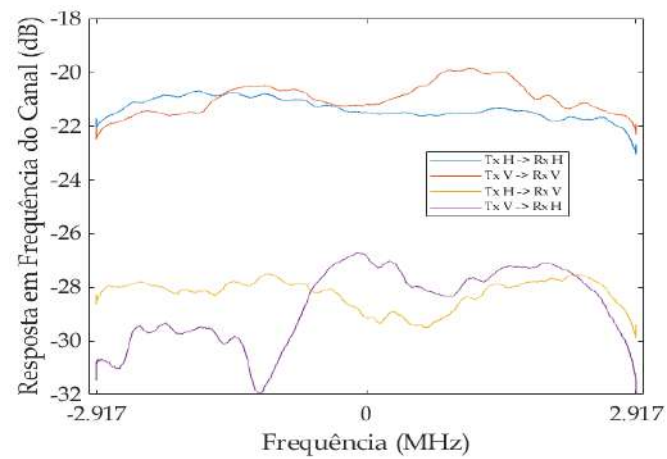
O Ponto 12 (Figura 79) estava localizado em uma área predominantemente aberta, com vegetação baixa e poucas edificações ao redor, o que favorece uma propagação mais limpa do sinal. A resposta em frequência (Figura 80) apresentou pouca seletividade, com algumas variações pontuais. O número de condição (Figura 81) indicou boa ortogonalidade e baixa correlação entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 82) revelou uma dispersão temporal reduzida, característica de um ambiente com baixa presença de multipercurso, resultando em uma banda de coerência plana em frequência. As constelações (Figura 83) mostraram símbolos bem definidos, evidenciando boa qualidade do sinal. De forma geral, o Ponto 12 apresentou um canal estável, desempenho satisfatório e boa robustez na recepção MIMO.

Figura 79. Imagem de satélite do Ponto 12



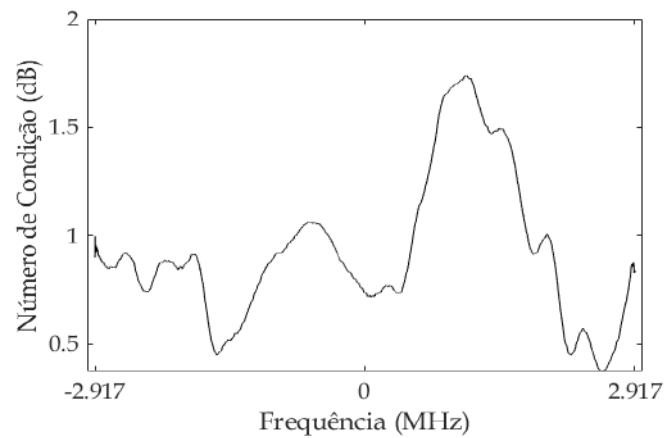
Fonte: Autor.

Figura 80. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 12



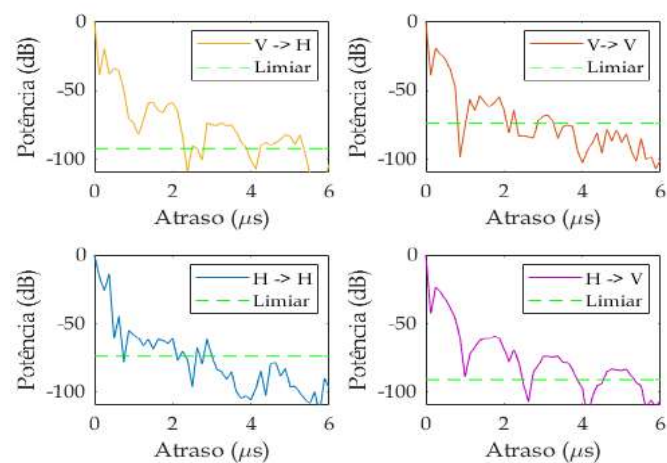
Fonte: Autor.

Figura 81. Número de Condição – Ponto 12



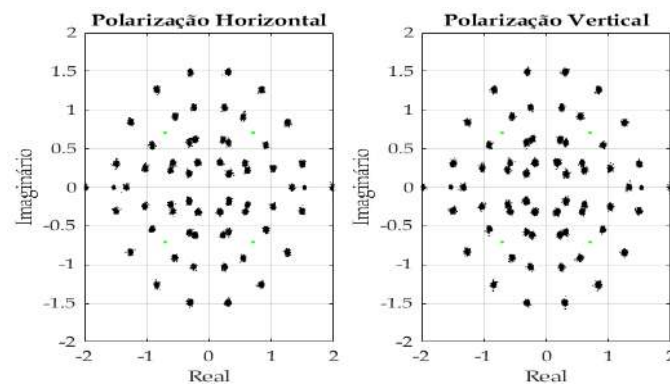
Fonte: Autor.

Figura 82. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 12



Fonte: Autor.

Figura 83. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 12



Fonte: Autor.

13) Análise do Ponto 13

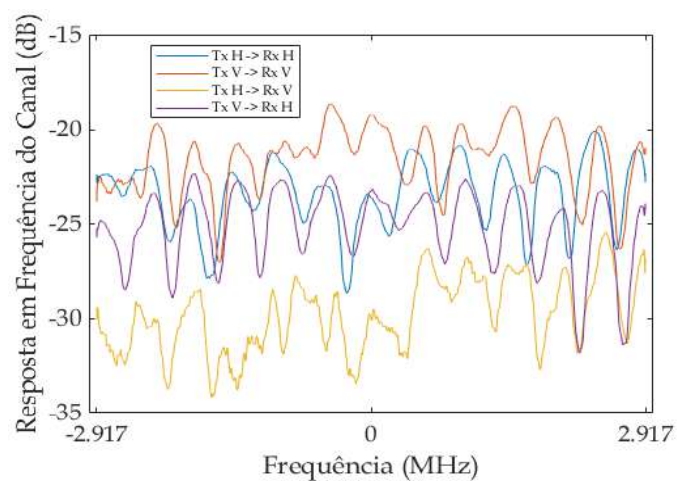
O Ponto 13 (Figura 84) estava situado em uma área com vegetação e próximo de edificações altas, configurando um ambiente de propagação mista, com zonas abertas e forte presença de multipercurso devido às reflexões nos prédios ao redor. A resposta em frequência (Figura 85) apresentou grande seletividade e variações acentuadas. O número de condição (Figura 86) variou amplamente, atingindo valores altos, o que indica alta correlação entre os canais MIMO e redução da ortogonalidade. O perfil de potência de retardos (Figura 87) revelou ampla dispersão temporal e banda de coerência seletiva em frequência. As constelações (Figura 88) exibiram símbolos muito dispersos, com bastante degradação. De modo geral, o Ponto 13 apresentou desempenho baixo para recepção MIMO, com forte multipercurso e correlação entre canais.

Figura 84. Imagem de satélite do Ponto 13



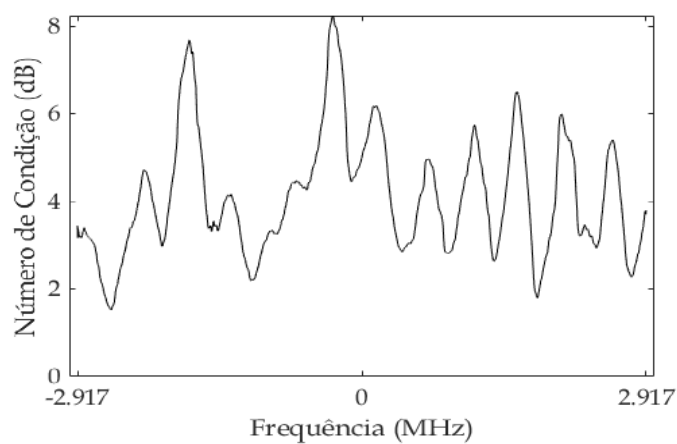
Fonte: Autor.

Figura 85. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 13



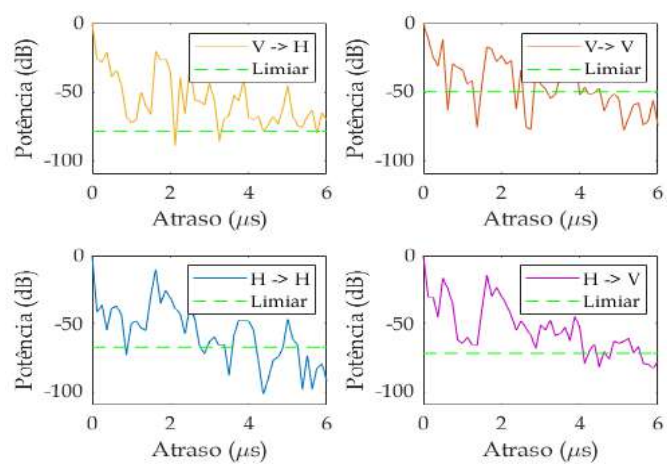
Fonte: Autor.

Figura 86. Número de Condição – Ponto 13



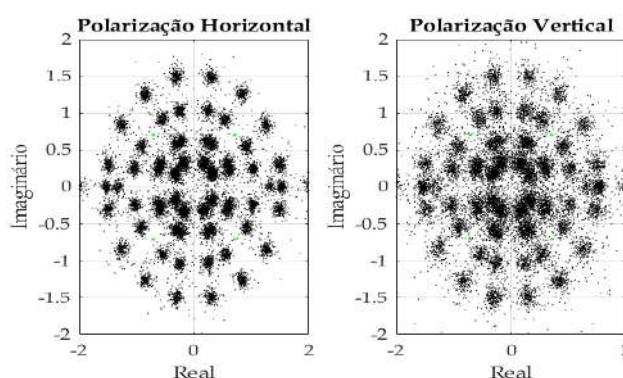
Fonte: Autor.

Figura 87. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 13



Fonte: Autor.

Figura 88. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 13

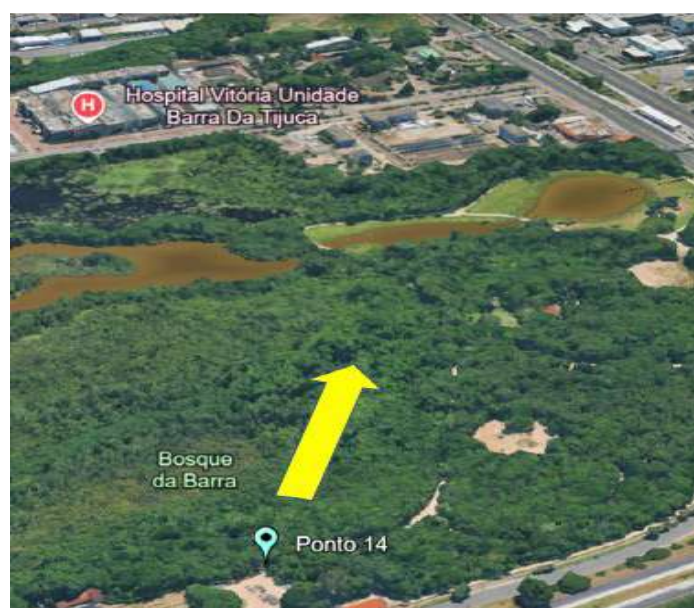


Fonte: Autor.

14) Análise do Ponto 14

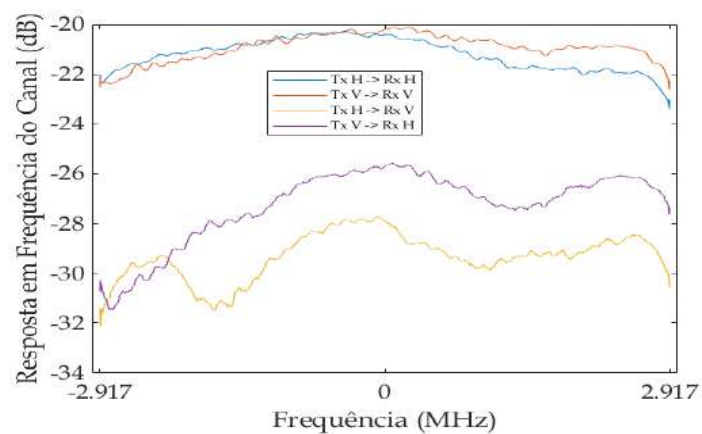
O Ponto 14 (Figura 89) estava situado em uma área de vegetação densa dentro do Bosque da Barra, cercada por pequenas edificações, configurando um ambiente misto. A resposta em frequência (Figura 90) apresentou poucas variações bruscas, principalmente nos enlaces copolares. O número de condição (Figura 91) permaneceu baixo e estável, evidenciando baixa correlação entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 92) indicou dispersão temporal moderada, resultando em uma banda de coerência seletiva em frequência. As constelações (Figura 93) apresentaram pouca dispersão e pontos bem definidos. De forma geral, o Ponto 14 apresentou um desempenho satisfatório para recepção MIMO, com resultados consistentes.

Figura 89. Imagem de satélite do Ponto 14



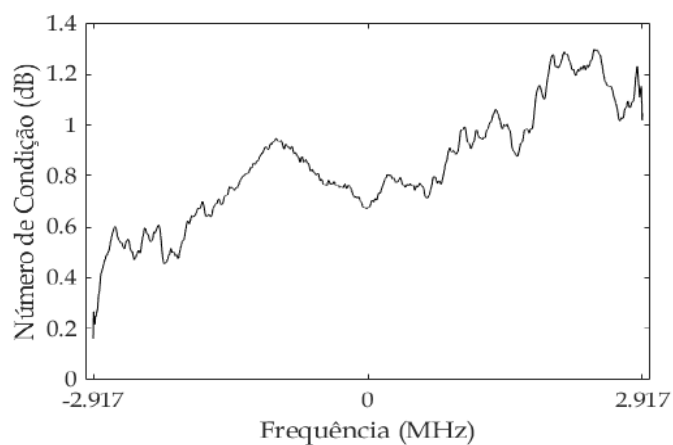
Fonte: Autor.

Figura 90. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 14



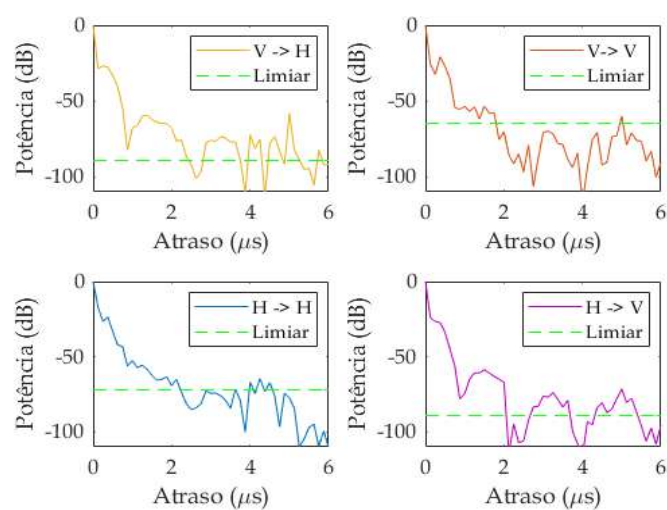
Fonte: Autor.

Figura 91. Número de Condição – Ponto 14



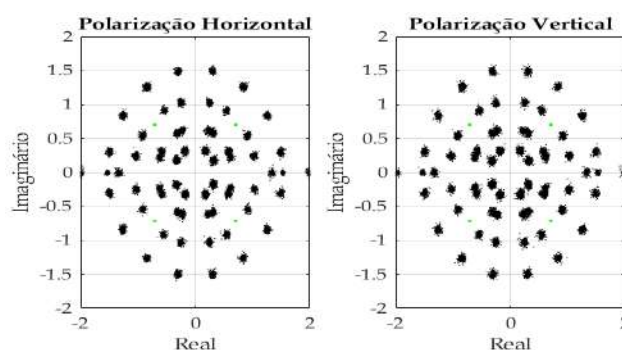
Fonte: Autor.

Figura 92. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 14



Fonte: Autor.

Figura 93. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 14



Fonte: Autor.

15) Análise do Ponto 15

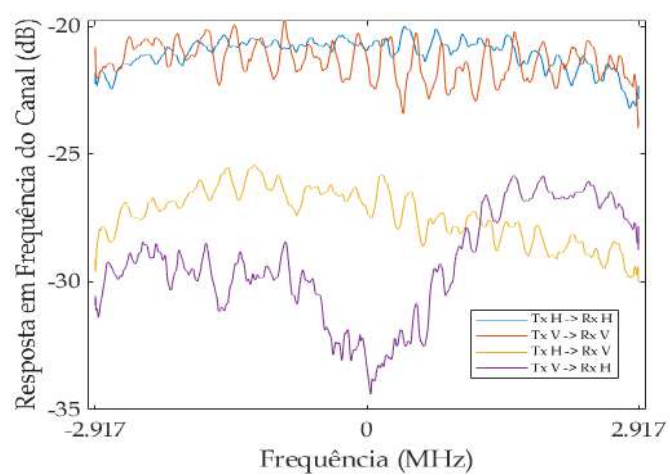
O Ponto 15 (Figura 94) estava localizado nas proximidades do Parque Olímpico, em uma área mista composta por edificações de grande porte e espaços abertos, caracterizando um ambiente urbano complexo, com forte presença de multipercurso, reflexões e difração. A resposta em frequência (Figura 95) apresentou pequenas variações de potência ao longo do espectro. O número de condição (Figura 96) indicou um pouco de correlação entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 97) evidenciou multipercurso relevantes, resultando em uma banda de coerência seletiva em frequência. As constelações (Figura 98) apresentaram pouca dispersão dos símbolos e sem distorções severas. De forma geral, o Ponto 15 configura um cenário favorável para a recepção MIMO, apresentando bom desempenho.

Figura 94. Imagem de satélite do Ponto 15



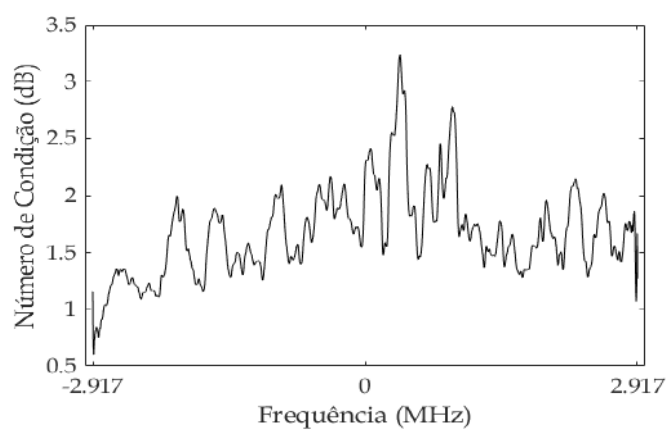
Fonte: Autor.

Figura 95. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 15



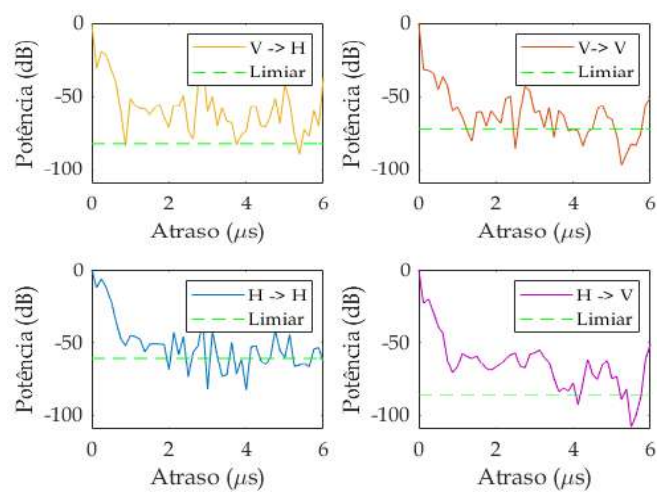
Fonte: Autor.

Figura 96. Número de Condição – Ponto 15



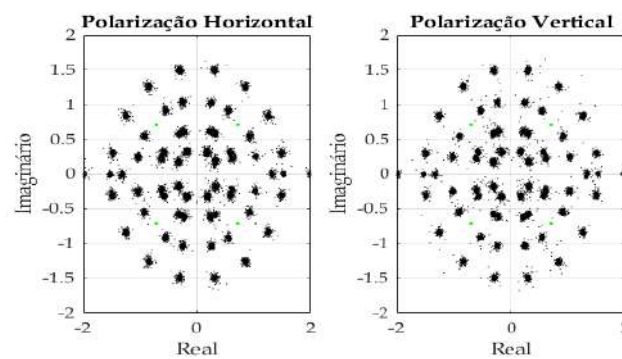
Fonte: Autor.

Figura 97. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 15



Fonte: Autor.

Figura 98. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 15



Fonte: Autor.

16) Análise do Ponto 16

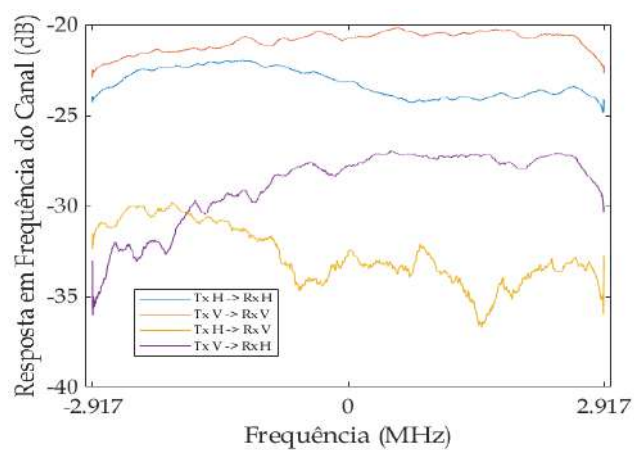
O Ponto 16 (Figura 99) estava localizado no estacionamento dos Estúdios Globo, em uma área mista composta por edificações de médio porte e vegetação densa ao redor. A resposta em frequência (Figura 100) apresentou baixa seletividade. O número de condição (Figura 101) indicou uma correlação baixa entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 102) revelou baixa dispersão temporal, resultando em uma banda de coerência praticamente plana. As constelações (Figura 103) exibiram símbolos com dispersão moderada, compatível com os valores de MER obtidos. De modo geral, o Ponto 16 apresentou níveis baixos de potência, o que limita parcialmente os ganhos de diversidade, mas ainda permite a operação eficiente de esquemas MIMO.

Figura 99. Imagem de satélite do Ponto 16



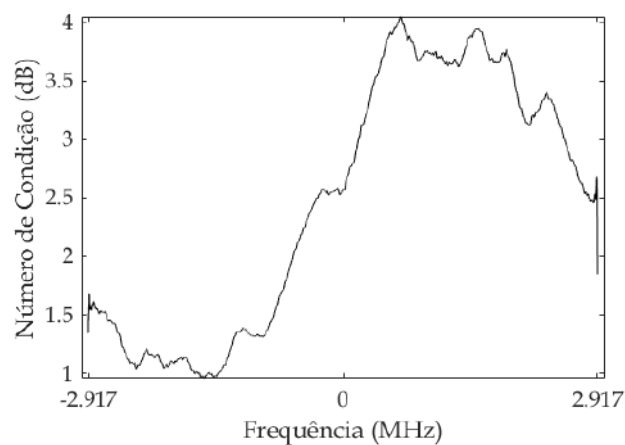
Fonte: Autor.

Figura 100. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 16



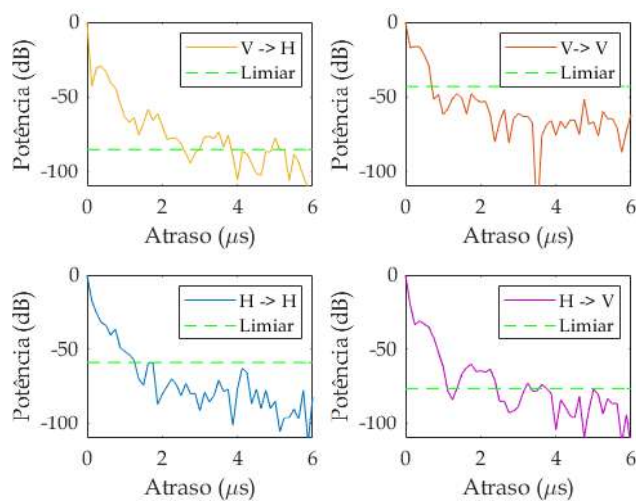
Fonte: Autor.

Figura 101. Número de Condição – Ponto 16



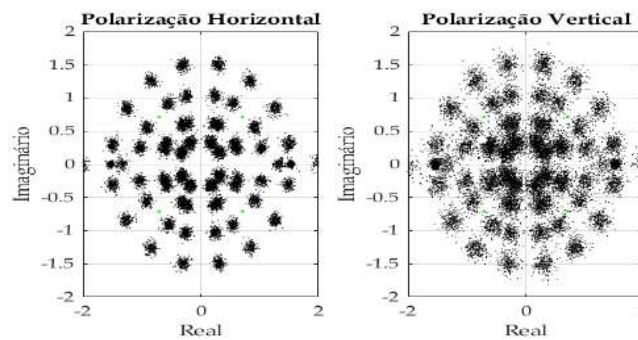
Fonte: Autor.

Figura 102. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 16



Fonte: Autor.

Figura 103. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 16



Fonte: Autor.

17) Análise do Ponto 17

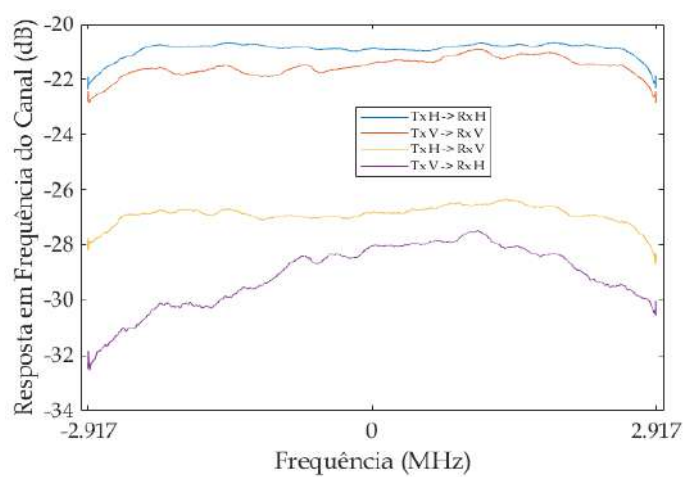
O Ponto 17 (Figura 104) estava localizado em uma região aberta, com prédios próximos e vegetação baixa, caracterizando um ambiente de propagação com poucos obstáculos significativos. A resposta em frequência (Figura 105) apresentou um comportamento estável ao longo de toda a banda analisada. O número de condição (Figura 106) indicou excelente ortogonalidade entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 107) revelou baixa dispersão temporal nos enlaces copolares, resultando em uma banda de coerência plana, evidenciando canal pouco seletivo em frequência. As constelações (Figura 108) exibiram símbolos concentrados e bem definidos, demonstrando boa qualidade. De forma geral, o Ponto 17 apresentou um cenário altamente favorável à operação MIMO, com baixa correlação, estabilidade espectral e excelente desempenho de recepção.

Figura 104. Imagem de satélite do Ponto 17



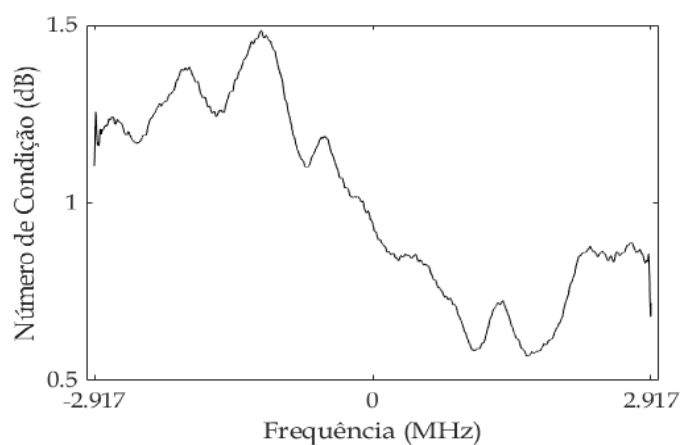
Fonte: Autor.

Figura 105. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 17



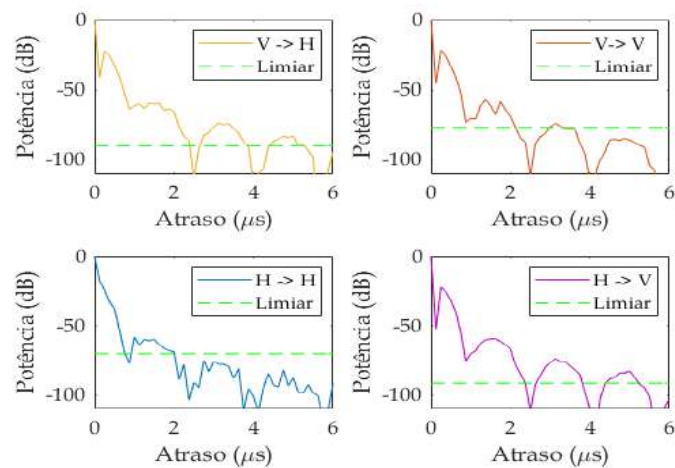
Fonte: Autor.

Figura 106. Número de Condição – Ponto 17



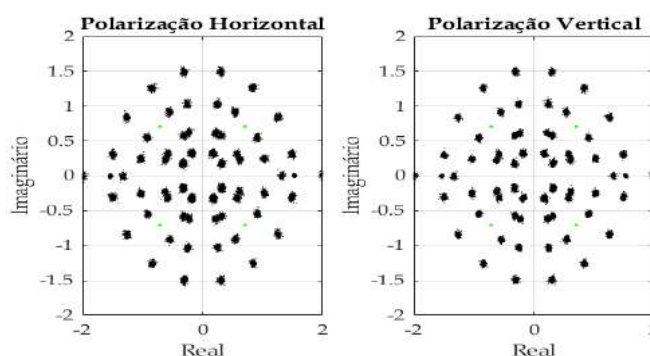
Fonte: Autor.

Figura 107. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 17



Fonte: Autor.

Figura 108. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 17



Fonte: Autor.

18) Análise do Ponto 18

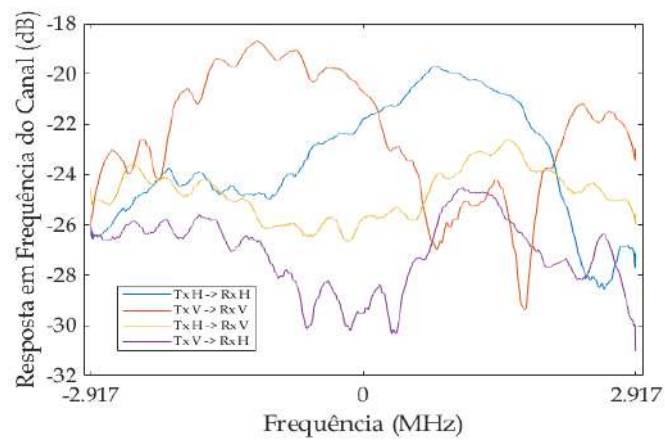
O Ponto 18 (Figura 109) estava localizado em uma área urbana densamente edificada, cercada por prédios de médio e alto porte, caracterizando um ambiente com forte presença de multipercurso e variações significativas nas condições de propagação. A resposta em frequência (Figura 110) apresentou oscilações acentuadas. O número de condição (Figura 111) apresentou variações amplas, indicando alta correlação entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 112) evidenciou ampla dispersão temporal, resultando em banda de coerência seletiva em frequência. As constelações (Figura 113) mostraram dispersão acentuada dos símbolos, em conformidade com os valores de MER. De forma geral, o Ponto 18 apresentou desempenho limitado para recepção MIMO, com nível de potência moderado, porém restrito pela baixa ortogonalidade do canal.

Figura 109. Imagem de satélite do Ponto 18



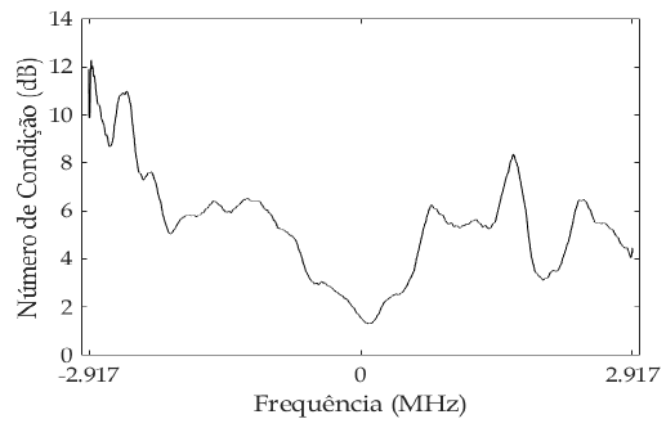
Fonte: Autor.

Figura 110. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 18



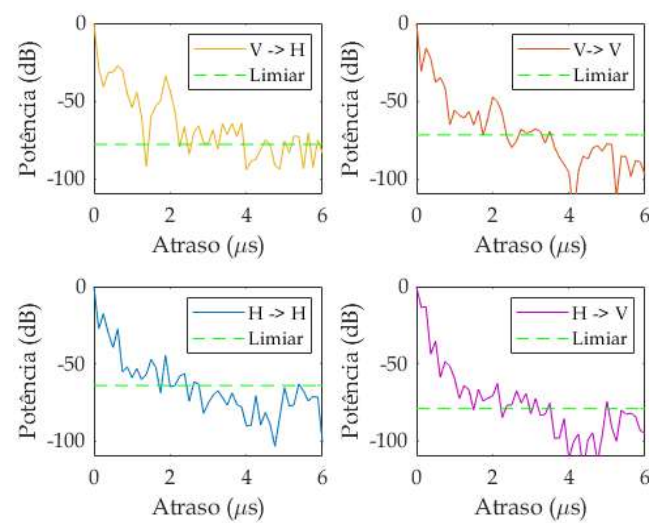
Fonte: Autor.

Figura 111. Número de Condição – Ponto 18



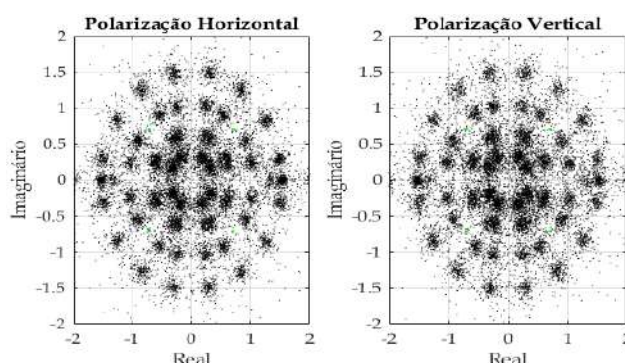
Fonte: Autor.

Figura 112. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 18



Fonte: Autor.

Figura 113. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 18



Fonte: Autor.

19) Análise do Ponto 19

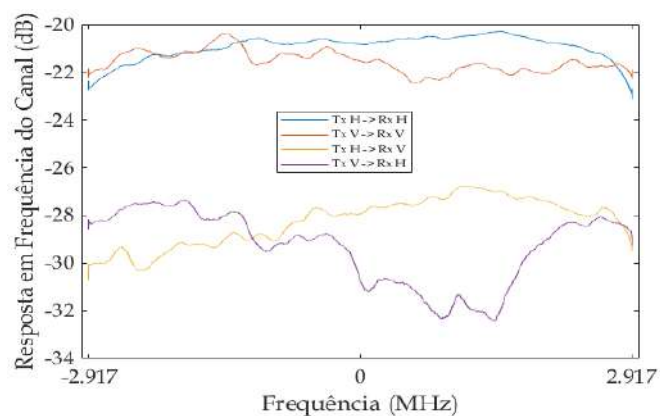
O Ponto 19 (Figura 114) estava localizado em uma área com edificações de médio porte e trechos abertos, caracterizando um ambiente de propagação com reflexões moderadas. A resposta em frequência (Figura 115) apresentou maior estabilidade nos enlaces copolarizados, enquanto os enlaces cruzados mostraram-se mais atenuados. O número de condição (Figura 116) indicou baixa correlação e boa ortogonalidade entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 107) evidenciou baixa dispersão temporal, resultando em banda de coerência plana em frequência. As constelações (Figura 108) exibiram símbolos concentrados e bem definidos, confirmando a alta qualidade do canal. De forma geral, o Ponto 19 apresentou um cenário favorável à recepção MIMO, com elevados valores de MER e excelente desempenho.

Figura 114. Imagem de satélite do Ponto 19



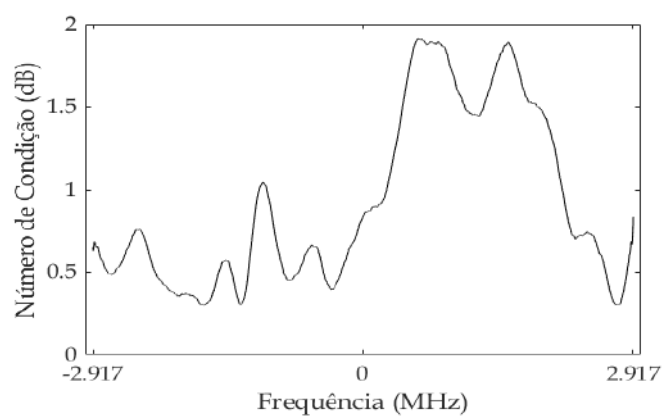
Fonte: Autor.

Figura 115. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 19



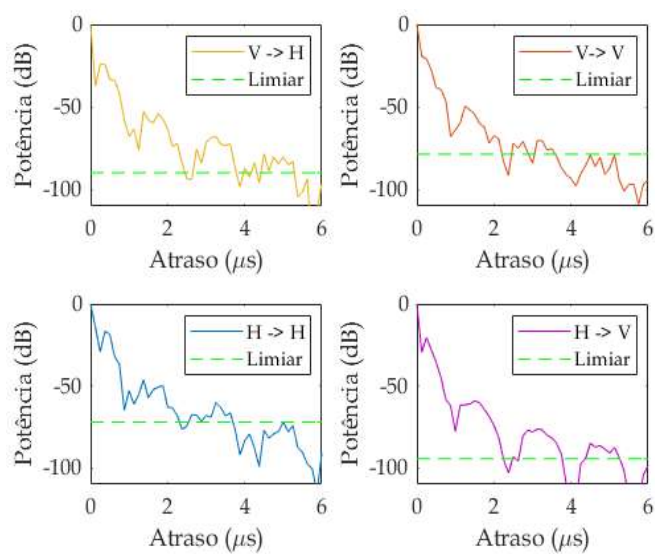
Fonte: Autor.

Figura 116. Número de Condição – Ponto 19



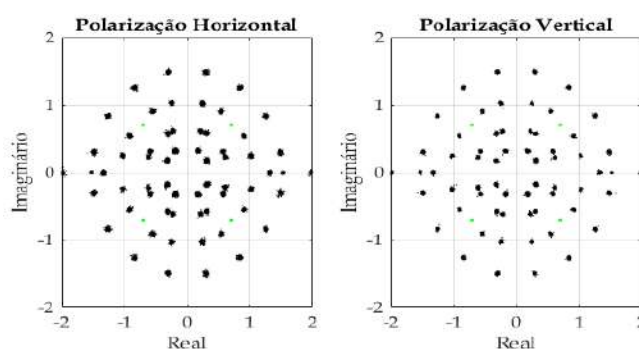
Fonte: Autor.

Figura 117. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 19



Fonte: Autor.

Figura 118. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 19

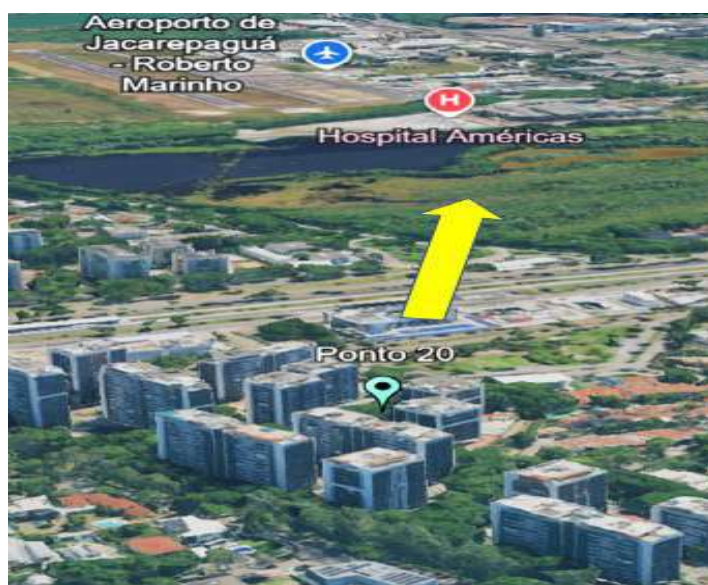


Fonte: Autor.

20) Análise do Ponto 20

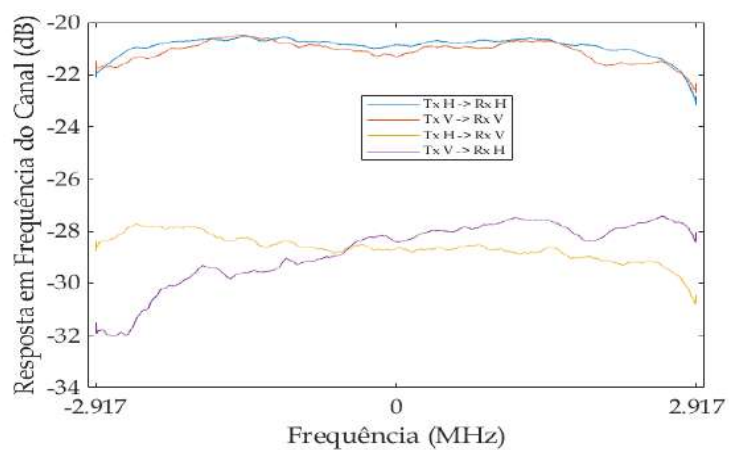
O Ponto 20 (Figura 119) estava localizado em uma área urbana irregular, próximo a diversos prédios de médio e grande porte, além de pouca vegetação ao redor, configurando um ambiente misto com presença de multipercurso. A resposta em frequência (Figura 120) apresentou pouca seletividade ao longo de todo o canal. O número de condição (Figura 121) indicou boa ortogonalidade entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 122) revelou uma dispersão temporal moderada, resultando em banda de coerência seletiva em frequência. As constelações (Figura 123) apresentaram pontos bem definidos e centralizados. De forma geral, o Ponto 20 apresentou um canal seletivo em frequência, porém com desempenho satisfatório e boa robustez na recepção MIMO, mesmo sob condições de propagação complexas.

Figura 119. Imagem de satélite do Ponto 20



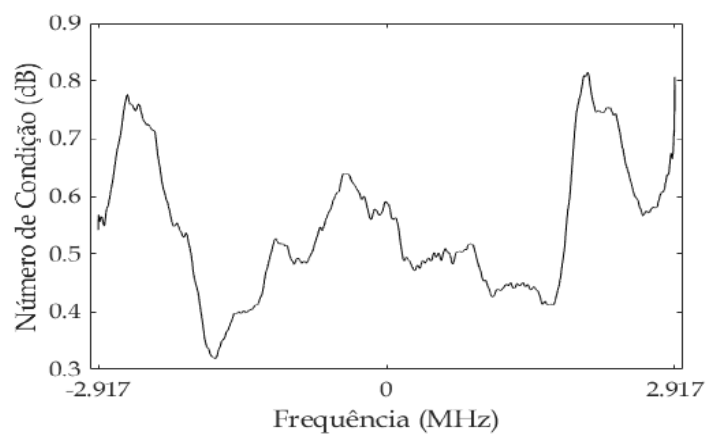
Fonte: Autor.

Figura 120. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 20



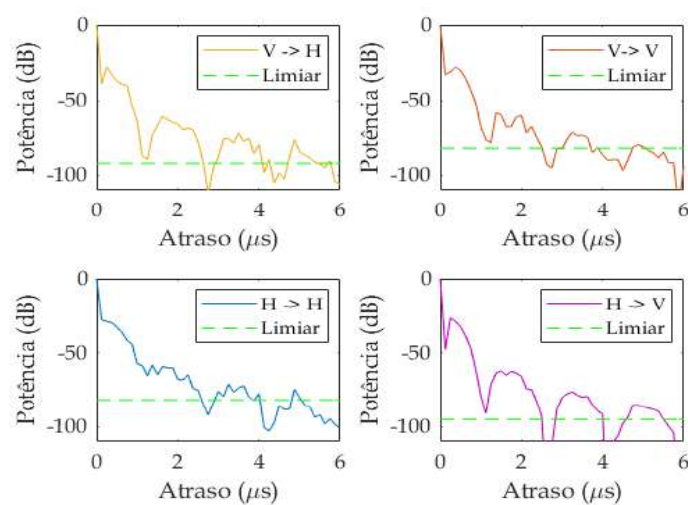
Fonte: Autor.

Figura 121. Número de Condição – Ponto 20



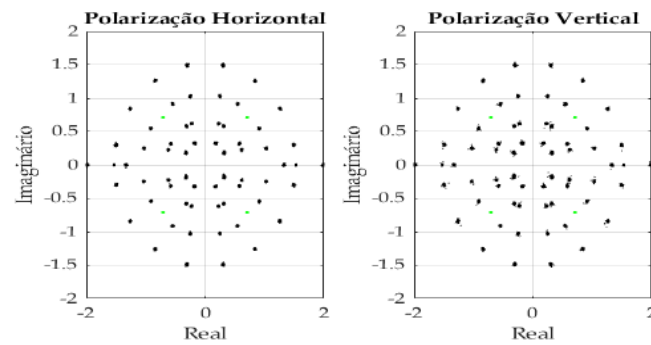
Fonte: Autor.

Figura 122. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 20



Fonte: Autor.

Figura 123. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 20



Fonte: Autor.

21) Análise do Ponto 21

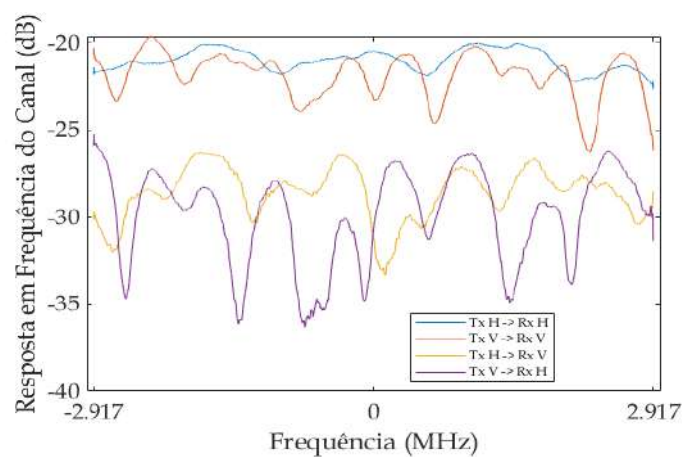
O Ponto 21 (Figura 124) estava localizado em uma área urbana densa, cercada por edifícios altos e vegetação leve. A resposta em frequência (Figura 125) apresentou algumas flutuações acentuadas. O número de condição (Figura 126) indicou correlação moderada e boa ortogonalidade entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 127) revelou baixa dispersão temporal, resultando em banda de coerência plana em frequência. As constelações (Figura 128) apresentaram dispersão moderada dos símbolos, refletindo leve instabilidade do canal. De forma geral, o Ponto 21 apresentou desempenho moderado na recepção MIMO, com MER e número de condição compatíveis com um cenário de potência baixa, mas ainda funcional para operação eficiente.

Figura 124. Imagem de satélite do Ponto 21



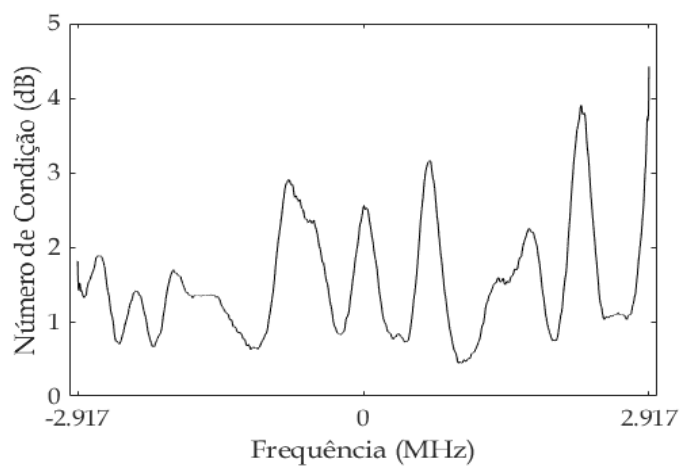
Fonte: Autor.

Figura 125. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 21



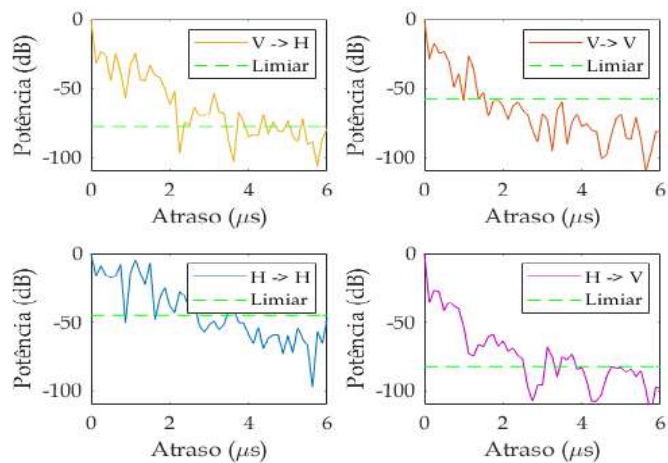
Fonte: Autor.

Figura 126. Número de Condição – Ponto 21



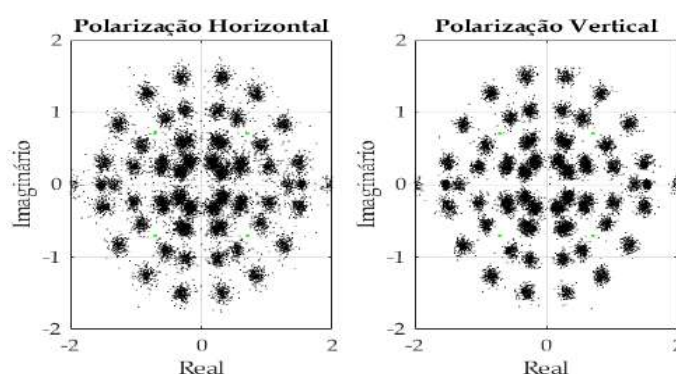
Fonte: Autor.

Figura 127. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 21



Fonte: Autor.

Figura 128. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 21



Fonte: Autor.

22) Análise do Ponto 22

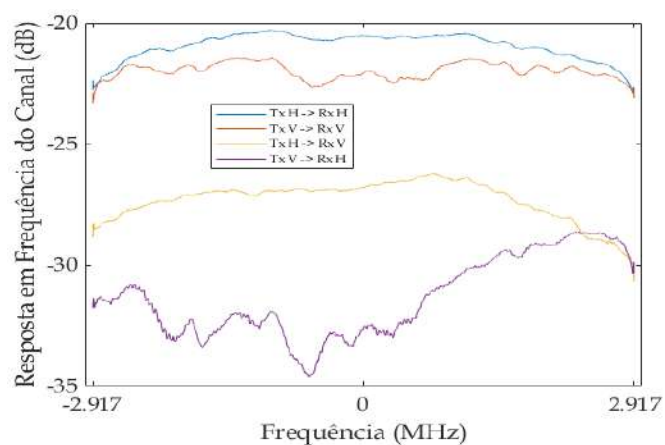
O Ponto 22 (Figura 129) estava localizado em uma região aberta e costeira, próxima à praia e à Lagoa de Marapendi, caracterizando um ambiente com poucos obstáculos. A resposta em frequência (Figura 130) apresentou boa estabilidade, indicando baixo acoplamento entre as polarizações. O número de condição (Figura 131) revelou boa separabilidade entre os canais MIMO, evidenciando boa diversidade espacial. O perfil de potência de retardos (Figura 132) mostrou baixa dispersão temporal, resultando em banda de coerência plana em frequência. As constelações (Figura 133) exibiram símbolos bem definidos e com pouca dispersão. De modo geral, o Ponto 22 apresentou bom desempenho na recepção MIMO, representando um cenário de propagação favorável, com baixa seletividade em frequência e elevada qualidade de sinal.

Figura 129. Imagem de satélite do Ponto 22



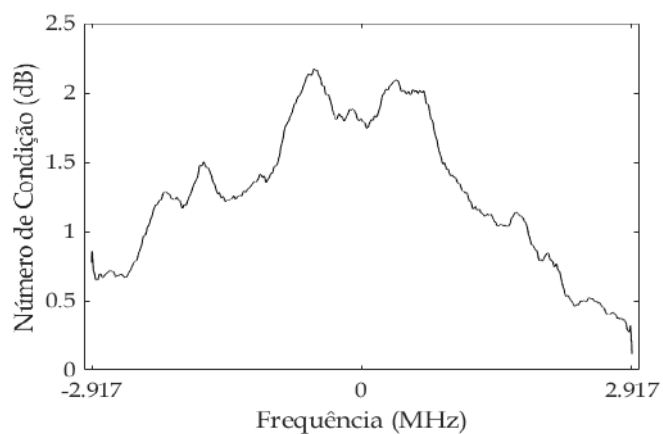
Fonte: Autor.

Figura 130. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 22



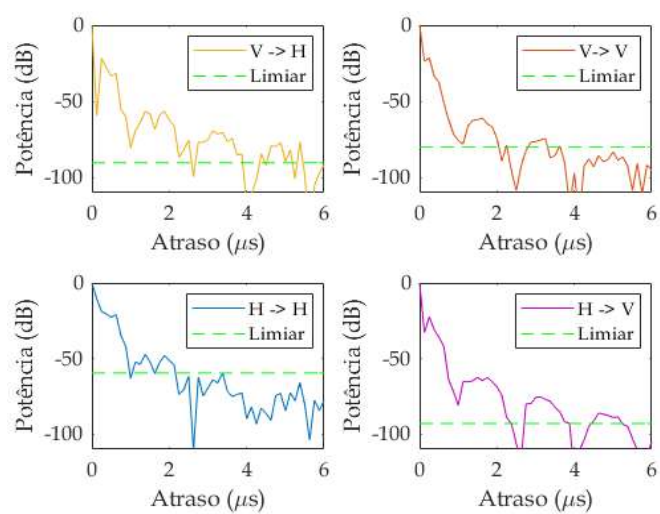
Fonte: Autor.

Figura 131. Número de Condição – Ponto 22



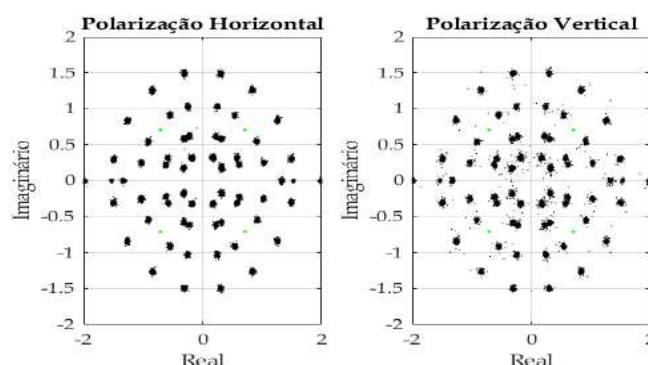
Fonte: Autor.

Figura 132. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 22



Fonte: Autor.

Figura 133. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 22



Fonte: Autor.

23) Análise do Ponto 23

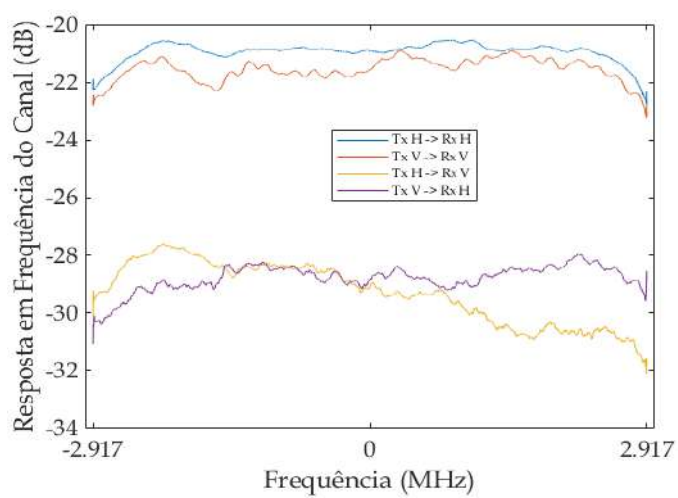
O Ponto 23 (Figura 134) estava localizado em uma área costeira, situada também em uma região com características semelhantes às do Ponto 22, entre a praia e a Lagoa de Marapendi, porém com maior presença de obstáculos à frente, como prédios altos. A resposta em frequência (Figura 135) apresentou boa estabilidade nas combinações copolarizadas e pequenas atenuações nos enlaces cruzados. O número de condição (Figura 136) revelou boa separabilidade entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 137) mostrou baixa dispersão temporal, resultando em banda de coerência plana em frequência. As constelações (Figura 138) exibiram símbolos bem definidos e pouca dispersão. De modo geral, o Ponto 23 apresentou bom desempenho na recepção MIMO, representando um cenário de propagação favorável, com canal estável.

Figura 134. Imagem de satélite do Ponto 23



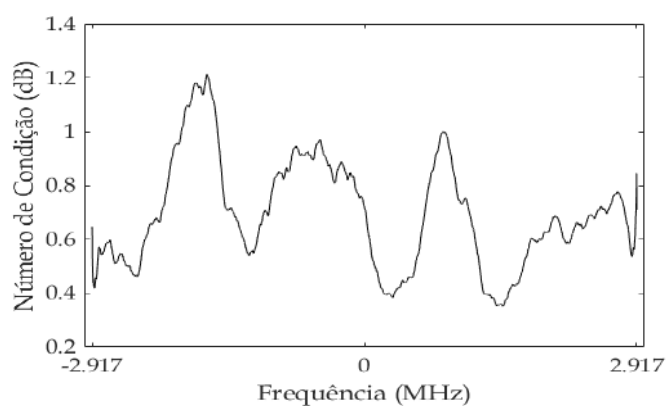
Fonte: Autor.

Figura 135. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 23



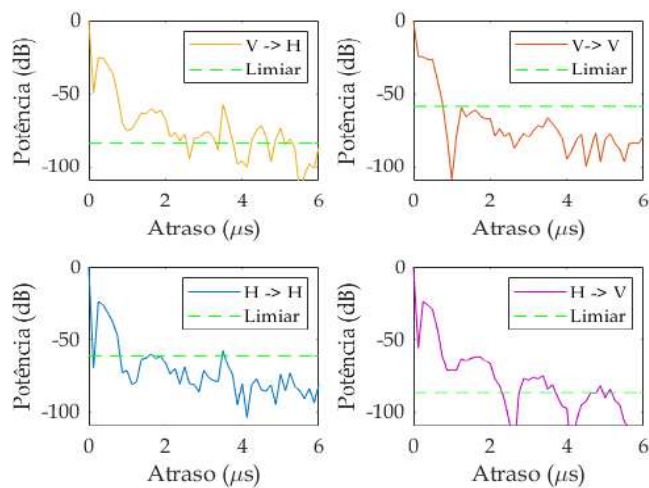
Fonte: Autor.

Figura 136. Número de Condição – Ponto 23



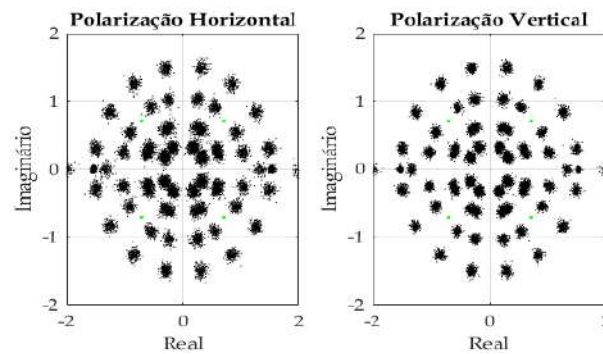
Fonte: Autor.

Figura 137. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 23



Fonte: Autor.

Figura 138. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 23



Fonte: Autor.

24) Análise do Ponto 24

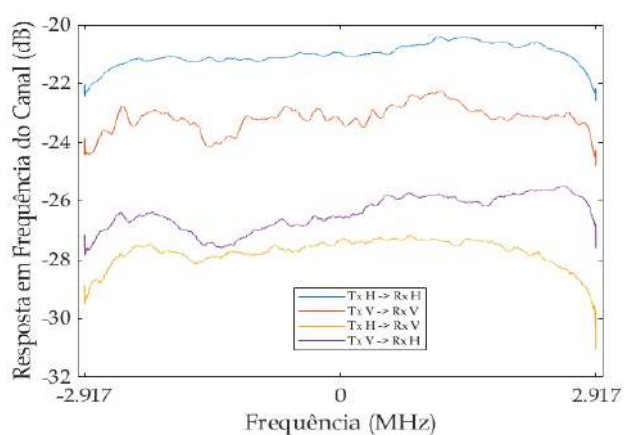
O Ponto 24 (Figura 139) estava localizado em uma área costeira, situada também entre a praia e a Lagoa de Marapendi, porém com maior presença de vegetação. A resposta em frequência (Figura 140) apresentou pequenas atenuações, indicando um acoplamento baixo. O número de condição (Figura 141) revelou separabilidade moderada entre os canais MIMO e baixa correlação. O perfil de potência de retardos (Figura 142) mostrou baixa dispersão temporal, resultando em banda de coerência plana em frequência, confirmando um canal pouco seletivo em frequência. As constelações (Figura 143) exibiram símbolos com dispersão moderada. De modo geral, o Ponto 24 apresentou desempenho moderado na recepção MIMO, representando um cenário de propagação estável, apesar de uma degradação considerável na potência de recepção.

Figura 139. Imagem de satélite do Ponto 24



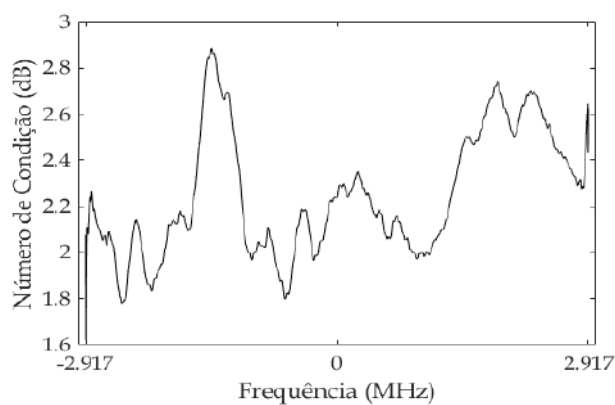
Fonte: Autor.

Figura 140. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 24



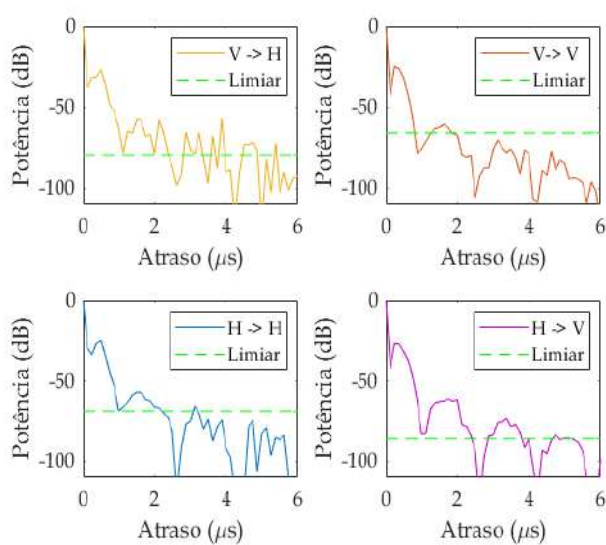
Fonte: Autor.

Figura 141. Número de Condição – Ponto 24



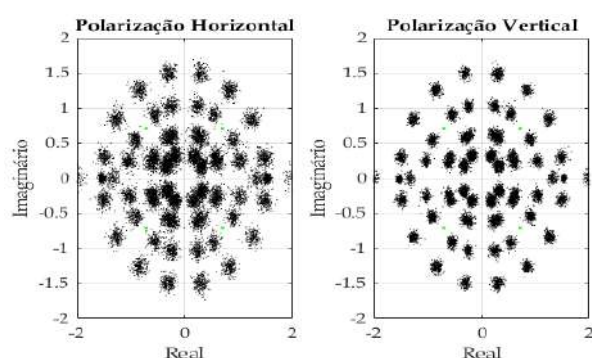
Fonte: Autor.

Figura 142. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 24



Fonte: Autor.

Figura 143. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 24

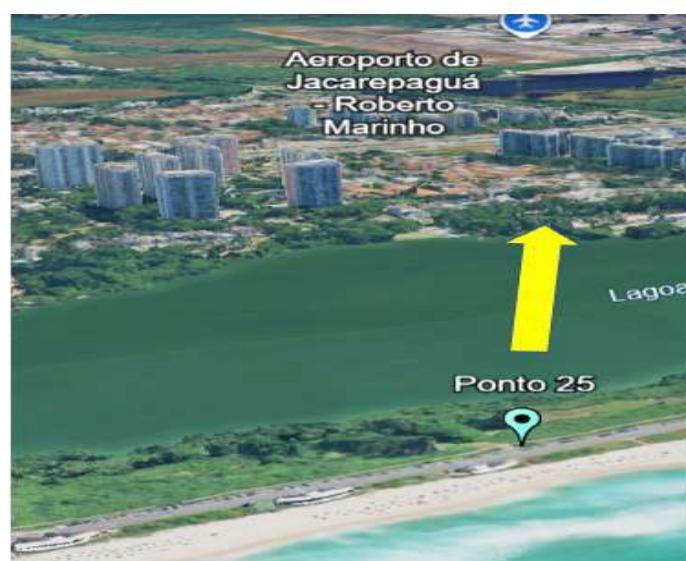


Fonte: Autor.

25) Análise do Ponto 25

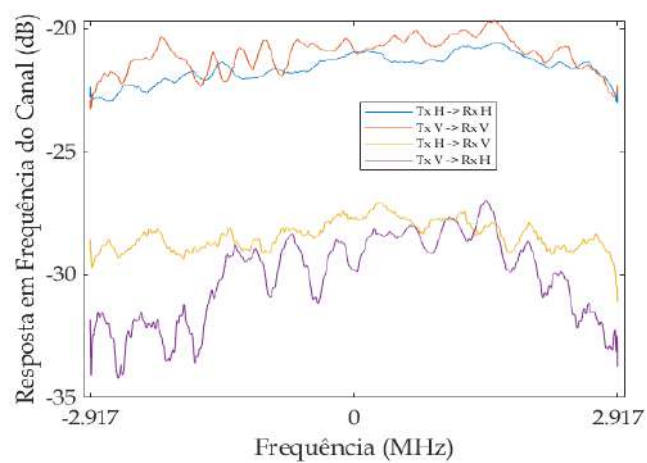
O Ponto 25 (Figura 144) estava localizado próximo à praia e à Lagoa de Marapendi, em uma área aberta com vegetação e poucos prédios, caracterizando um ambiente com reflexões moderadas. A resposta em frequência do canal (Figura 145) apresentou atenuações moderadas nos enlaces. O número de condição (Figura 146) revelou boa separabilidade entre os canais MIMO e baixa correlação. O perfil de potência de retardos (Figura 147) indicou maior dispersão temporal, resultando em banda de coerência seletiva em frequência. As constelações (Figura 148) exibiram símbolos bem definidos e com pouca dispersão, refletindo altos valores de MER. De modo geral, o Ponto 25 apresentou bom desempenho na recepção MIMO, com características de propagação favoráveis, sinal estável e excelente qualidade de canal.

Figura 144. Imagem de satélite do Ponto 25



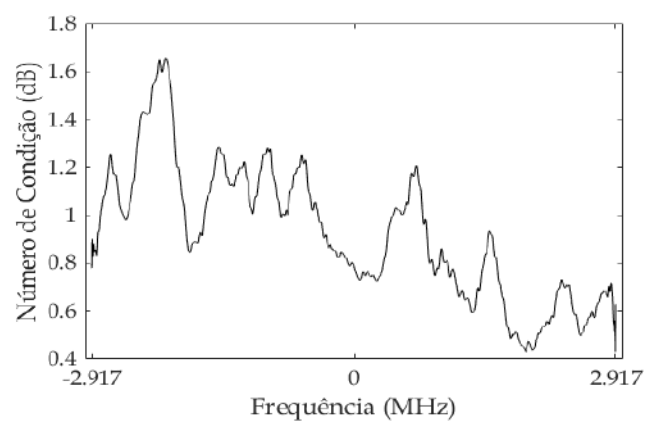
Fonte: Autor.

Figura 145. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 25



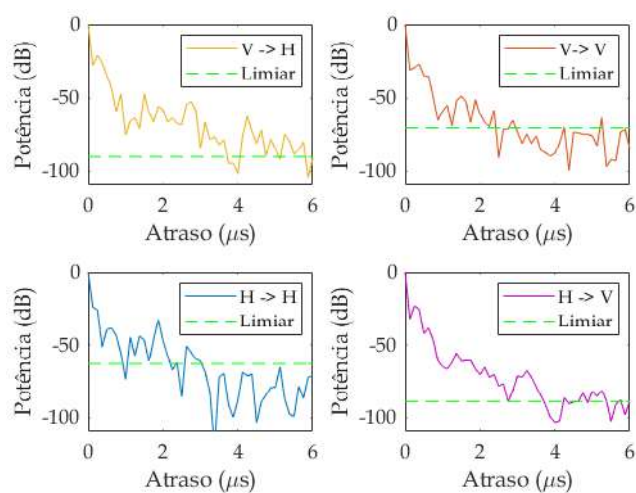
Fonte: Autor.

Figura 146. Número de Condição – Ponto 25



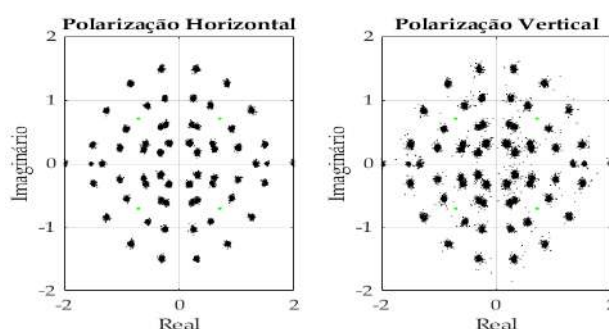
Fonte: Autor.

Figura 147. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 25



Fonte: Autor.

Figura 148. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 25



Fonte: Autor.

26) Análise do Ponto 26

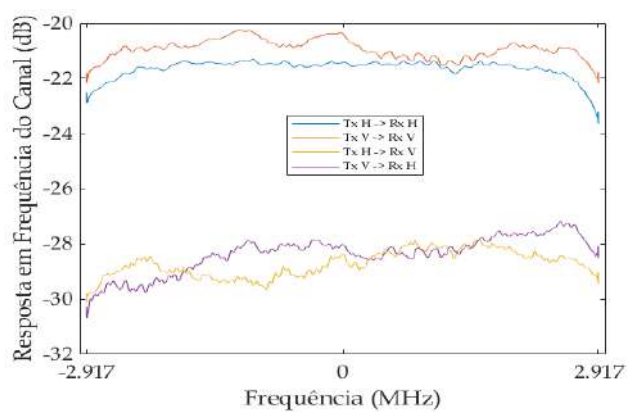
O Ponto 26 (Figura 149) estava localizado à beira da praia Alvorada, próximo à edifícios residenciais altos e com visada parcialmente obstruída para a estação transmissora devido à presença de prédios altos logo à frente. O canal apresentou resposta em frequência (Figura 150) estável, com atenuações leves nos enlaces. O número de condição (Figura 151) revelou boa separabilidade entre os canais MIMO e baixa correlação. O perfil de potência de retardos (Figura 152) indicou alta dispersão temporal, resultando em banda de coerência seletiva em frequência em todos os enlaces. As constelações (Figura 153) exibiram símbolos bem definidos e com pouca dispersão. De modo geral, o Ponto 26 apresentou bom desempenho na recepção MIMO, com características de propagação favoráveis, sinal estável e excelente qualidade de sinal.

Figura 149. Imagem de satélite do Ponto 26



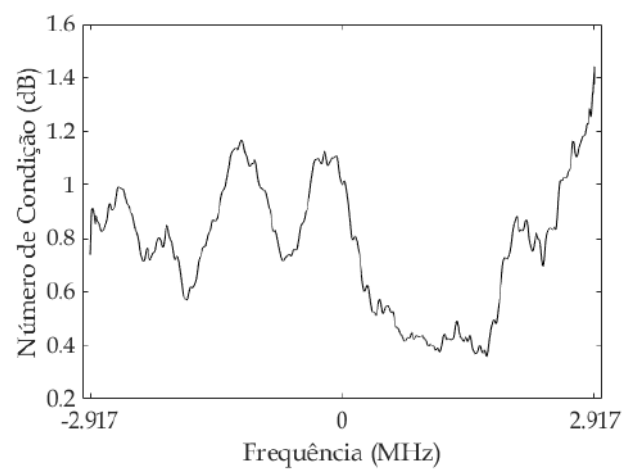
Fonte: Autor.

Figura 150. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 26



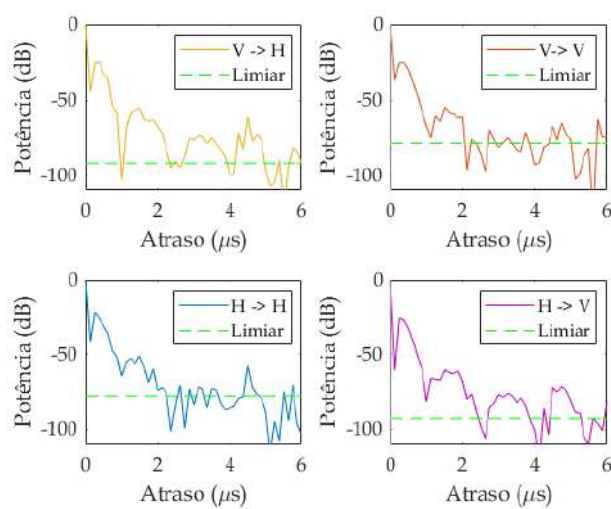
Fonte: Autor.

Figura 151. Número de Condição – Ponto 26



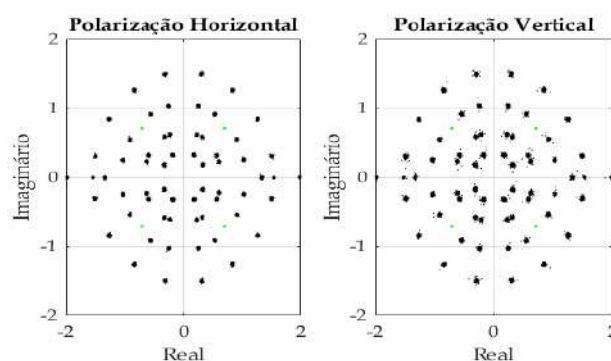
Fonte: Autor.

Figura 152. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 26



Fonte: Autor.

Figura 153. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 26



Fonte: Autor.

27) Análise do Ponto 27

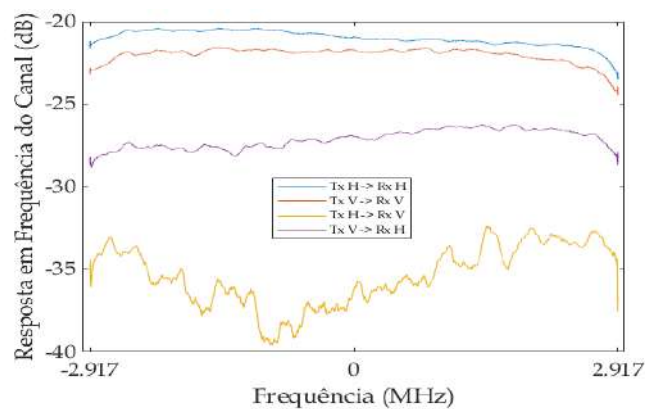
O Ponto 27 (Figura 154) estava localizado em um bairro predominantemente residencial, composto por casas e prédios baixos, com ruas estreitas e vegetação pontual entre as edificações. A resposta em frequência (Figura 155) apresentou boa estabilidade nos enlaces, indicando baixo acoplamento entre as polarizações. O número de condição (Figura 156) revelou boa separabilidade entre os canais MIMO e baixa correlação. O perfil de potência de retardos (Figura 157) mostrou baixa dispersão temporal, resultando em banda de coerência plana em frequência. As constelações (Figura 158) exibiram símbolos bem definidos e com pouca dispersão. De modo geral, o Ponto 27 apresentou bom desempenho na recepção MIMO, representando um cenário de propagação favorável, com baixa seletividade em frequência e boa qualidade de sinal.

Figura 154. Imagem de satélite do Ponto 27



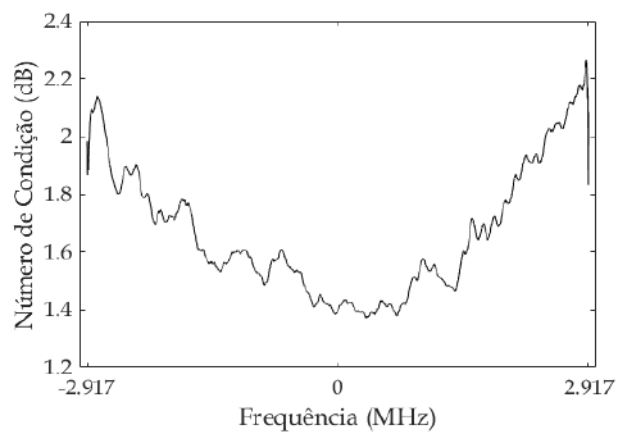
Fonte: Autor.

Figura 155. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 27



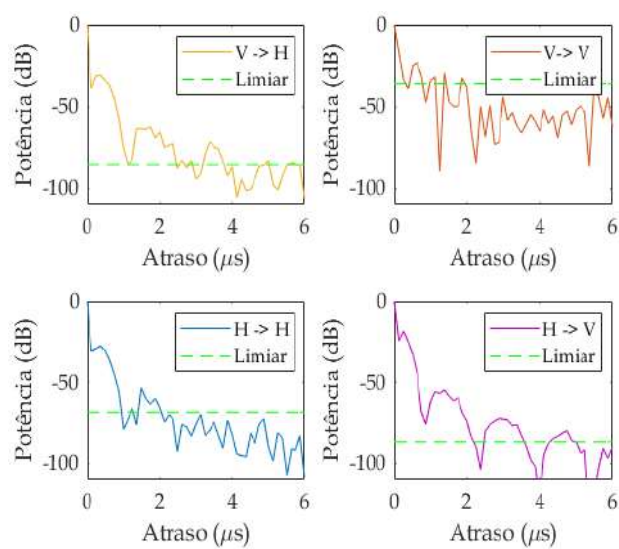
Fonte: Autor.

Figura 156. Número de Condição – Ponto 27



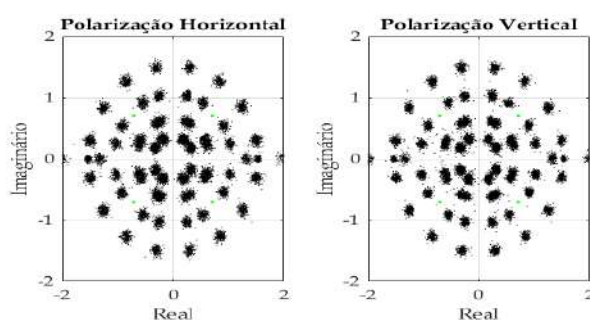
Fonte: Autor.

Figura 157. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 27



Fonte: Autor.

Figura 158. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 27

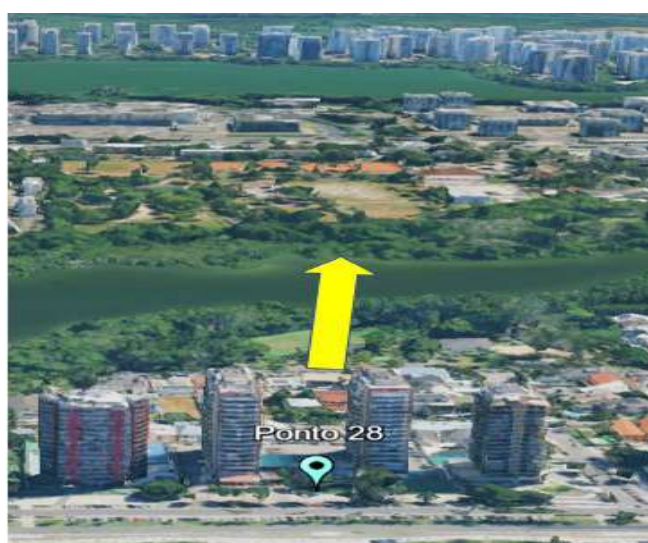


Fonte: Autor.

28) Análise do Ponto 28

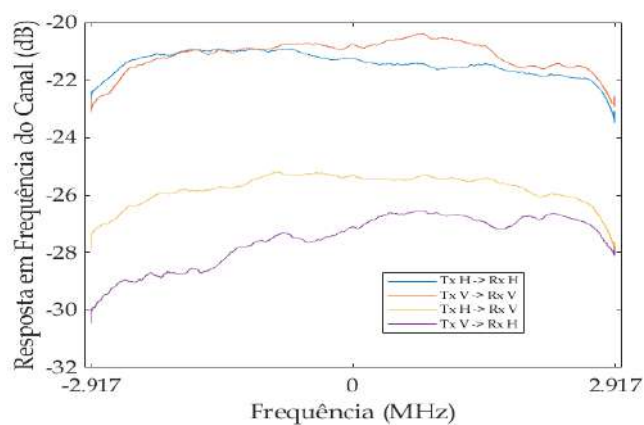
O Ponto 28 (Figura 159) estava localizado em uma área litorânea, próximo a diversos prédios de médio e grande porte, além de pouca vegetação ao redor, configurando um ambiente com forte presença de multipercurso. A resposta em frequência (Figura 160) apresentou boa estabilidade entre as polarizações. O número de condição (Figura 161) indicou boa ortogonalidade entre os canais MIMO, favorecendo uma recepção eficiente. O perfil de potência de retardos (Figura 162) revelou ampla dispersão temporal, resultando em banda de coerência seletiva em frequência. As constelações (Figura 163) apresentaram pontos bem definidos e centralizados. De forma geral, o Ponto 28 apresentou excelente desempenho na recepção MIMO, representando um cenário de propagação altamente favorável, com boa qualidade de sinal, mesmo sob condições de propagação complexas.

Figura 159. Imagem de satélite do Ponto 28



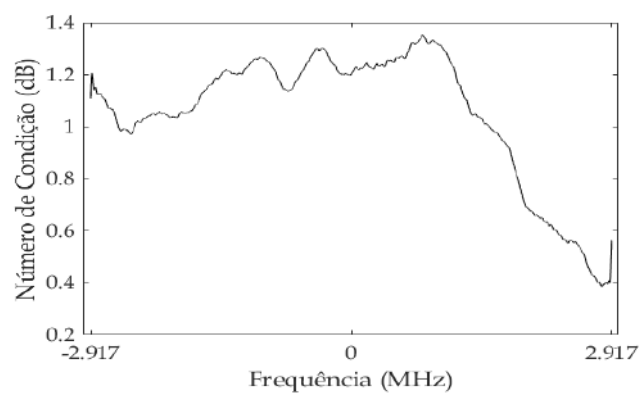
Fonte: Autor.

Figura 160. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 28



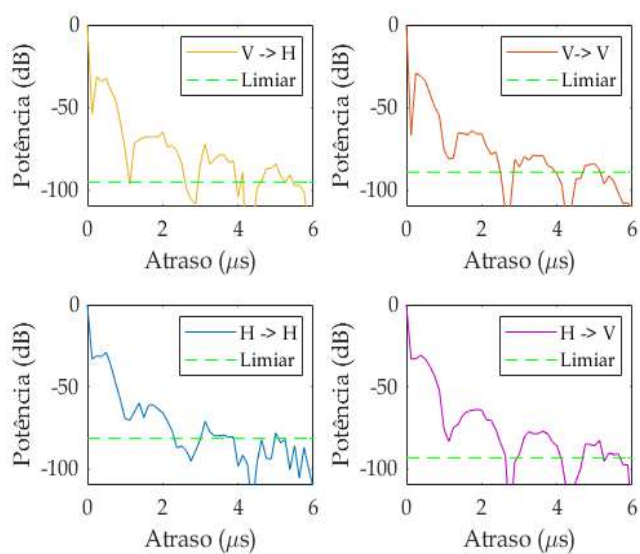
Fonte: Autor.

Figura 161. Número de Condição – Ponto 28



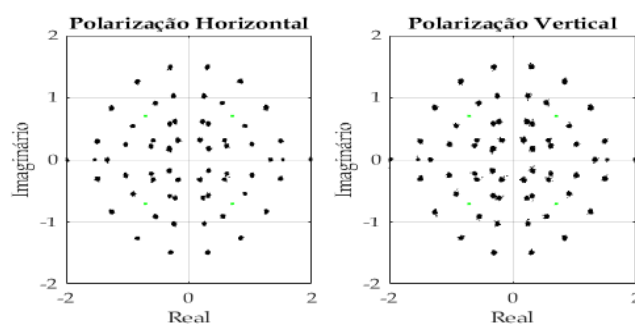
Fonte: Autor.

Figura 162. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 28



Fonte: Autor.

Figura 163. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 28



Fonte: Autor.

29) Análise do Ponto 29

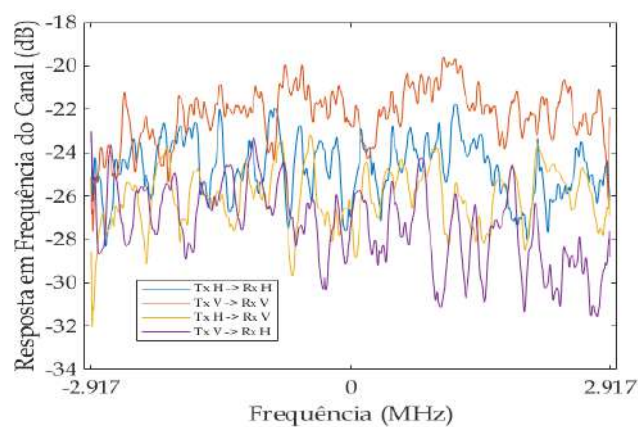
O Ponto 29 (Figura 164) estava localizado em uma região urbana densa, nas proximidades do Santuário Nossa Senhora de Loreto, caracterizada por forte presença de edificações, vegetação significativa e relevo acentuado. É importante destacar que, mesmo estando próximo à torre transmissora, o resultado obtido foi insatisfatório. O receptor, posicionado logo abaixo da torre, possivelmente se encontrava em uma zona de sombra, recebendo um sinal fraco ou instável. A resposta em frequência (Figura 165) apresentou alta seletividade e variações acentuadas. O número de condição (Figura 166) variou amplamente, o que indica alta correlação entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 167) mostrou grande dispersão temporal, resultando em banda de coerência seletiva em frequência. As constelações (Figura 168) exibiram símbolos bastante dispersos e degradados, refletindo baixa qualidade de recepção. De modo geral, o Ponto 29 apresentou baixo desempenho na recepção MIMO, com forte presença de multipercurso e elevada correlação entre os canais.

Figura 164. Imagem de satélite do Ponto 29



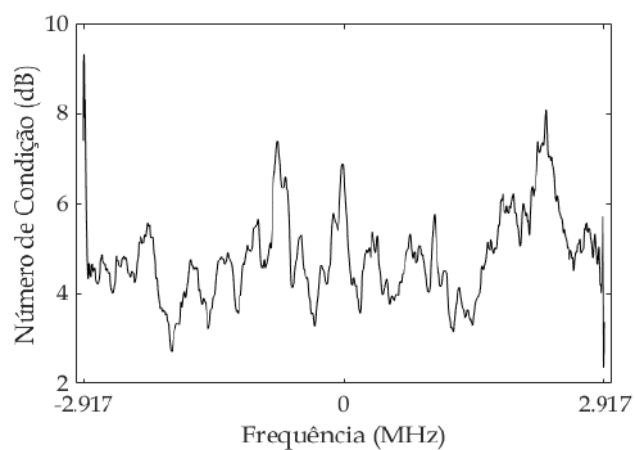
Fonte: Autor.

Figura 165. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 29



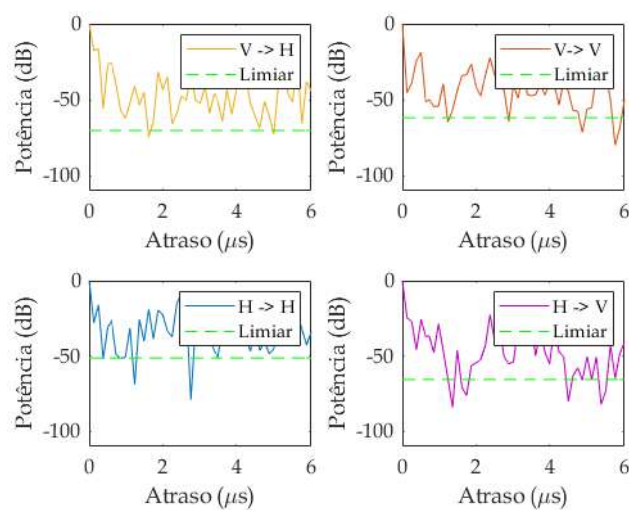
Fonte: Autor.

Figura 166. Número de Condição – Ponto 29



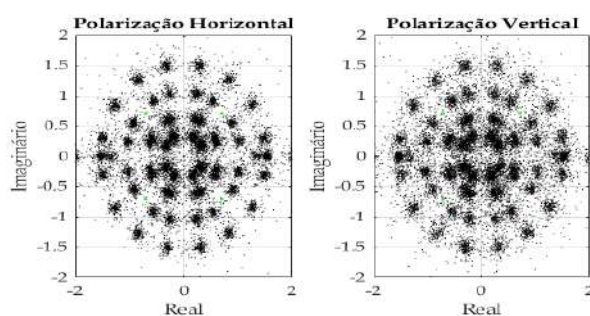
Fonte: Autor.

Figura 167. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 29



Fonte: Autor.

Figura 168. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 29



Fonte: Autor.

30) Análise do Ponto 30

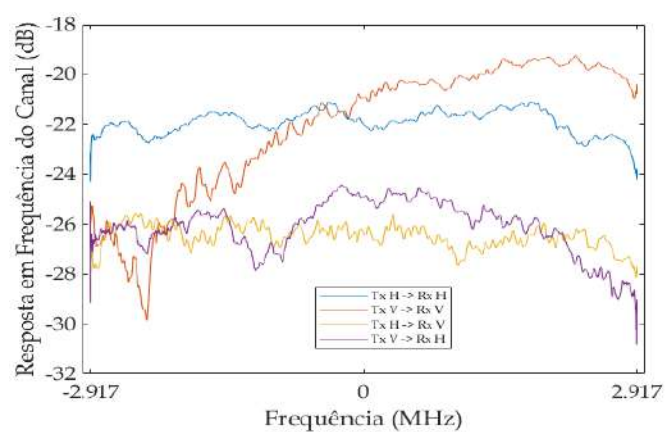
O Ponto 30 (Figura 169) estava localizado em uma região urbana densa, com edificações baixas e médias entre o receptor e o transmissor, que por sua vez está posicionado em um ponto elevado. Assim como no Ponto 29, mesmo estando próximo à torre transmissora, o resultado foi insatisfatório, possivelmente devido à presença de zona de sombra. A resposta em frequência (Figura 170) apresentou alta seletividade e variações acentuadas. O número de condição (Figura 171) variou significativamente, o que indica alta correlação entre os canais MIMO. O perfil de potência de retardos (Figura 172) mostrou grande dispersão temporal, resultando em banda de coerência seletiva em frequência. As constelações (Figura 173) exibiram símbolos bastante dispersos e degradados, refletindo baixa qualidade de recepção. De forma geral, o Ponto 30 apresentou baixo desempenho na recepção MIMO, caracterizado por elevada correlação e sinal baixo, o que resultou em redução significativa da eficiência do sistema, mesmo estando próximo à torre transmissora.

Figura 169. Imagem de satélite do Ponto 30



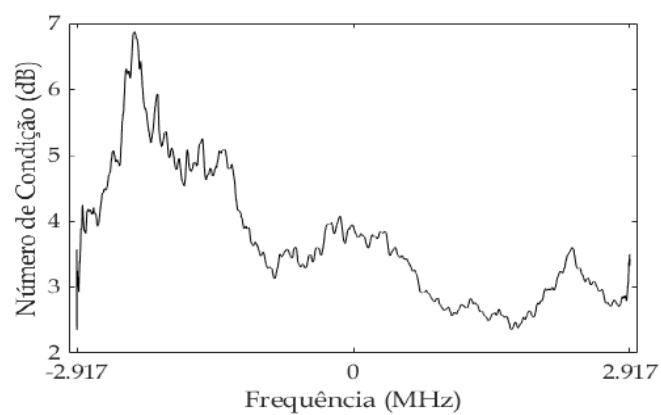
Fonte: Autor.

Figura 170. Resposta em Frequência do Canal - Ponto 30



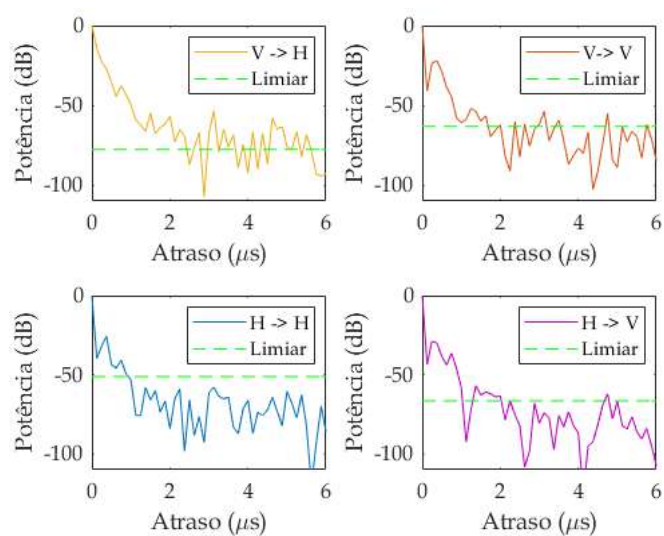
Fonte: Autor.

Figura 171. Número de Condição – Ponto 30



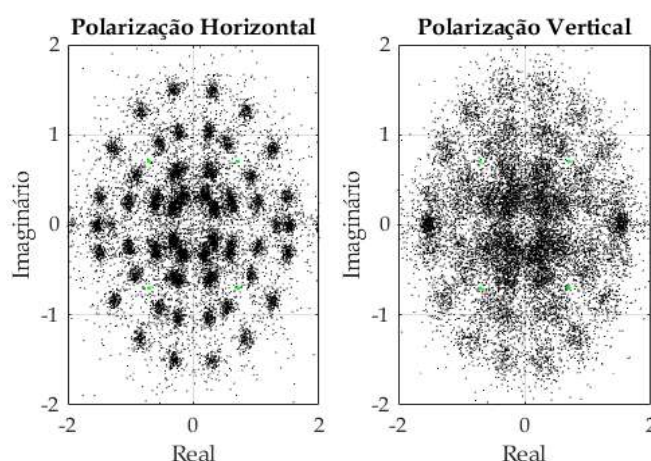
Fonte: Autor.

Figura 172. Perfil de Potência de Retardos - Ponto 30



Fonte: Autor.

Figura 173. Constelação do Sinal Recebido – Ponto 30



Fonte: Autor.

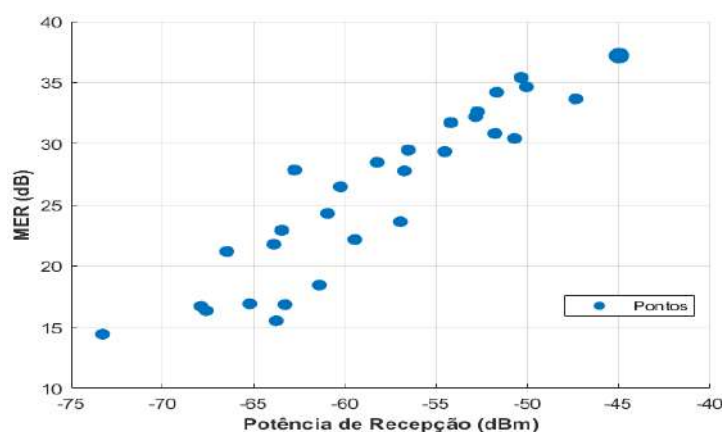
7.3 Análise Correlacional entre Métricas de Desempenho do Sistema MIMO

Nesta seção, realiza-se uma análise correlacional entre as principais métricas avaliadas, com o objetivo de identificar relações estatísticas e comportamentais que permitam compreender de forma mais abrangente o desempenho do sistema MIMO. A correlação entre parâmetros possibilita avaliar não apenas o desempenho isolado de cada métrica, mas também como elas se influenciam mutuamente. Essa abordagem integrada contribui para revelar padrões de dependência, evidenciar tendências associadas a ambientes mais favoráveis ou desafiadores e apoiar a interpretação dos resultados obtidos em campo.

a) Correlação entre Potência de Recepção e MER

A Figura 174 apresenta a relação entre a potência de recepção e a MER nos pontos medidos. Observa-se uma tendência positiva bem definida: à medida que a potência de recepção aumenta (valores menos negativos), a MER também melhora. Para níveis de potência próximos a -45 dBm, os valores de MER atingem aproximadamente 38 dB, indicando excelente qualidade de sinal. Já em potências mais baixas, próximas a -70 dBm, a MER cai para valores entre 14 e 20 dB, refletindo uma degradação significativa na qualidade. Essa correlação evidencia que, em geral, maiores níveis de potência de recepção resultam em melhor qualidade do sinal, o que está de acordo com o comportamento esperado. Além disso, a dispersão moderada dos pontos indica que fatores adicionais, como condições do canal e ambiente de propagação, também influenciam a qualidade do sinal.

Figura 174. Análise da Correlação entre Potência de Recepção e MER

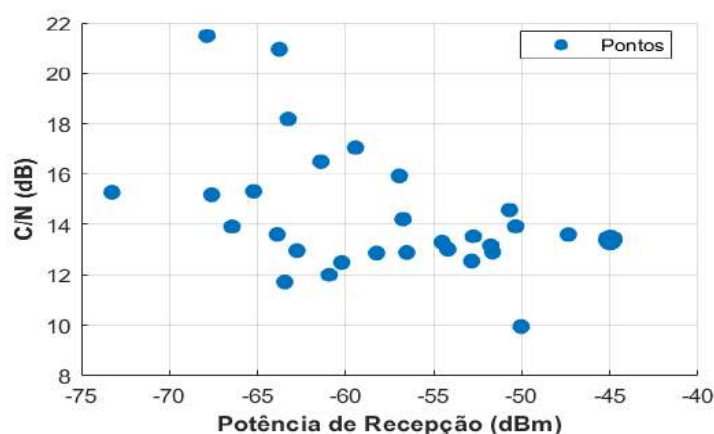


Fonte: Autor.

b) Correlação entre Potência de Recepção e C/N

A Figura 175 apresenta a relação entre a potência de recepção e a relação C/N nos pontos medidos. Observa-se que não há uma correlação direta forte entre essas duas variáveis. Embora exista uma leve tendência de C/N mais estáveis na faixa de potência entre aproximadamente -60 dBm e -50 dBm, valores elevados de C/N também aparecem em potências mais baixas, e vice-versa. Essa dispersão indica que a relação C/N não depende exclusivamente do nível de potência recebida, sendo fortemente influenciado por fatores adicionais do canal, como interferências locais, multipercurso e condições de propagação específicas de cada ponto. Em resumo, mesmo com variações significativas na potência de recepção, a relação C/N permanece distribuída em uma faixa relativamente ampla, destacando que a qualidade do sinal está sujeita a variáveis do ambiente que vão além do simples nível de potência recebida.

Figura 175. Análise da Correlação entre Potência de Recepção e C/N

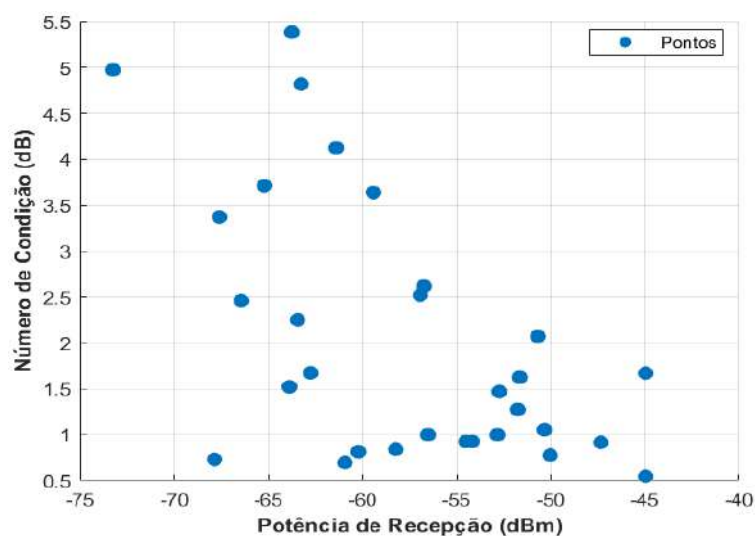


Fonte: Autor.

c) Correlação entre Potência de Recepção e Número de Condição

A Figura 176 apresenta a relação entre a potência de recepção e o número de condição para os pontos analisados. Observa-se que não existe uma correlação direta evidente entre essas variáveis: valores elevados de número de condição aparecem tanto em potências mais baixas (próximas de -70 dBm) quanto intermediárias, enquanto regiões com maior potência de recepção (acima de -55 dBm) tendem a concentrar valores menores de número de condição. Essa distribuição indica que o número de condição, associado à ortogonalidade entre os canais e ao desempenho da equalização MIMO, não depende apenas do nível de potência recebida. Ambientes com boa potência de recepção podem apresentar baixo número de condição (cenário favorável para detecção MIMO), enquanto regiões com potência moderada podem ainda sofrer com canal mal condicionado, possivelmente devido a efeitos de multipercurso severo, baixa diversidade espacial ou obstruções no ambiente. Embora a potência de recepção seja importante para o desempenho do sistema, o número de condição é fortemente influenciado pelas características espaciais e pela propagação do canal, reforçando a necessidade de análise conjunta de métricas físicas e espaciais em sistemas MIMO.

Figura 176. Análise da Correlação entre Potência de Recepção e Número de Condição



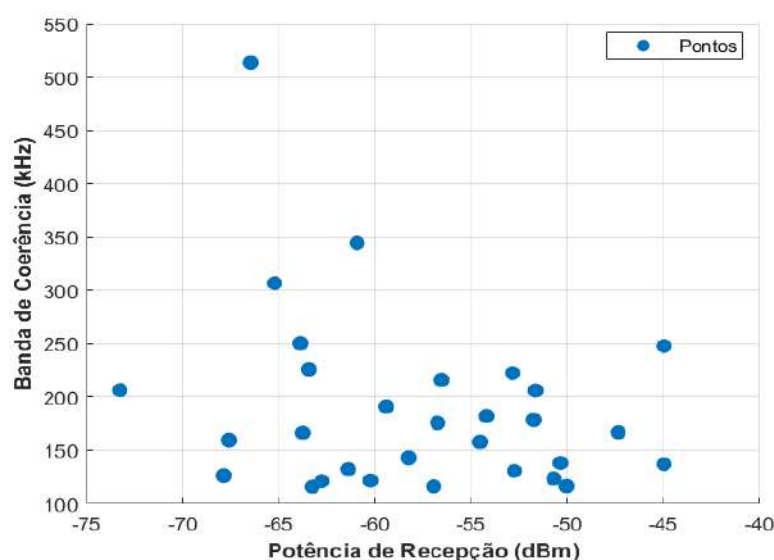
Fonte: Autor.

d) Correlação entre Potência de Recepção e Banda de Coerência

A Figura 177 apresenta a relação entre a potência de recepção e a banda de coerência nos pontos medidos. Observa-se que não há uma correlação direta evidente entre

as duas variáveis. Embora valores de potência mais baixos (próximos de -70 dBm) apresentem casos com bandas de coerência elevadas, acima de 300 kHz e chegando próximo a 520 kHz, a maior parte dos pontos, independentemente da potência, se concentra entre aproximadamente 120 kHz e 220 kHz. Esse comportamento indica que a banda de coerência, depende predominantemente das características físicas do ambiente (como multipercurso e obstruções) e não apenas do nível de potência recebida. Dessa forma, a potência de recepção não é um indicador suficiente para caracterizar o comportamento seletivo em frequência do canal, reforçando a necessidade de métricas complementares para análise da qualidade do canal em sistemas MIMO.

Figura 177. Análise da Correlação entre Potência de Recepção e Banda de Coerência

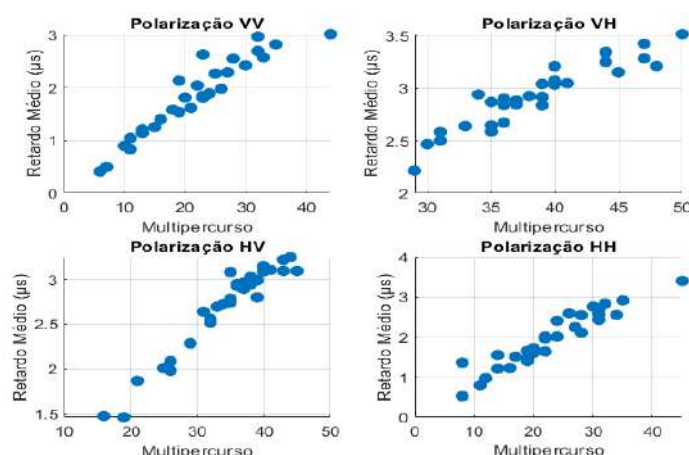


Fonte: Autor.

e) Correlação entre Multipercurso e Retardo Médio

A Figura 178 mostra que o aumento da quantidade de multipercurso está fortemente associado ao aumento do retardo médio em todas as polarizações analisadas. Nas polarizações copolares, essa relação é bastante linear, indicando que, à medida que mais trajetórias chegam ao receptor, o atraso médio se eleva de forma consistente. Nas polarizações cruzadas a tendência também é positiva, embora apresente maior dispersão dos pontos, refletindo maior variabilidade do canal. No conjunto, observa-se que ambientes com maior densidade de trajetórias refletidas ou difratadas tendem a produzir retardo médio mais elevados, evidenciando a influência direta da complexidade do multipercurso na dispersão temporal do canal.

Figura 178. Análise da Correlação entre Multipercurso e Retardo Médio

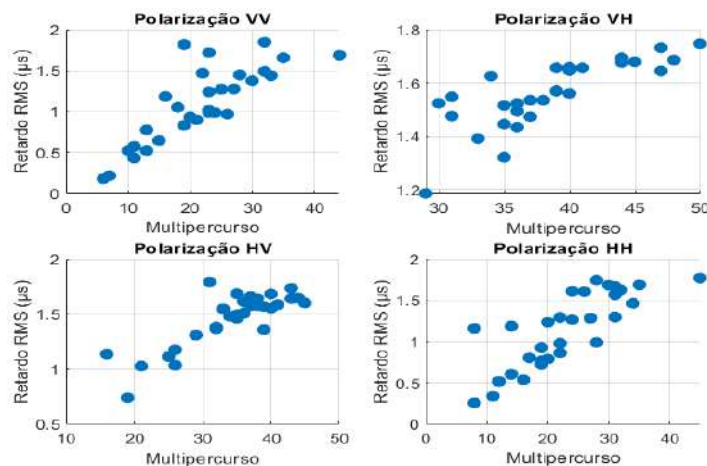


Fonte: Autor.

f) Correlação entre Multipercurso e Retardo RMS

A Figura 179 mostra que existe uma relação clara entre o nível de multipercurso e o aumento do retardo RMS em todas as polarizações analisadas. Nos enlaces copolares, observa-se uma tendência mais marcada: quanto maior o número de trajetórias refletidas, maior o espalhamento temporal do canal, indicando ambientes mais seletivos em frequência. Nos enlaces cruzados, embora a dispersão dos pontos seja maior, ainda há um comportamento crescente do retardo RMS conforme o multipercurso aumenta, evidenciando que a presença de componentes refletidas afeta de maneira consistente. De forma geral, os resultados confirmam que o multipercurso atua como um fator determinante no aumento do retardo RMS, reforçando a coerência física entre a complexidade do ambiente e a dispersão temporal observada no canal.

Figura 179. Análise da Correlação entre Multipercurso e Retardo RMS

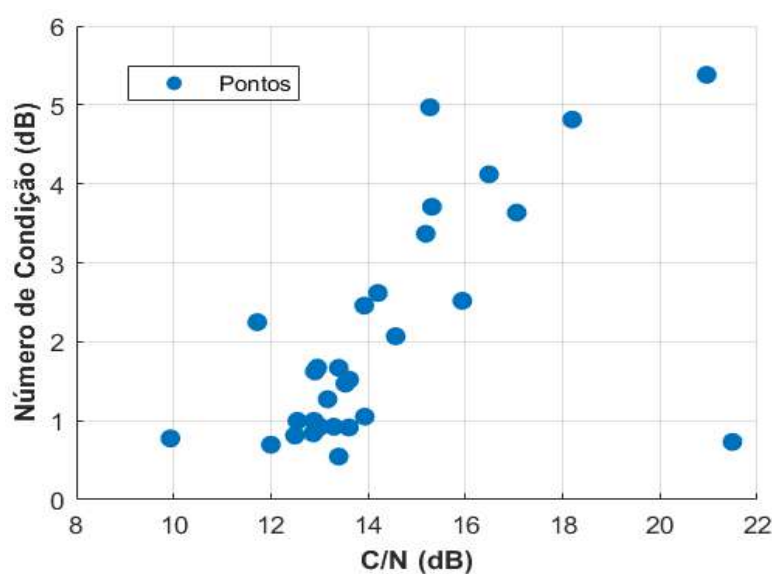


Fonte: Autor.

g) Correlação entre C/N e Número de Condição

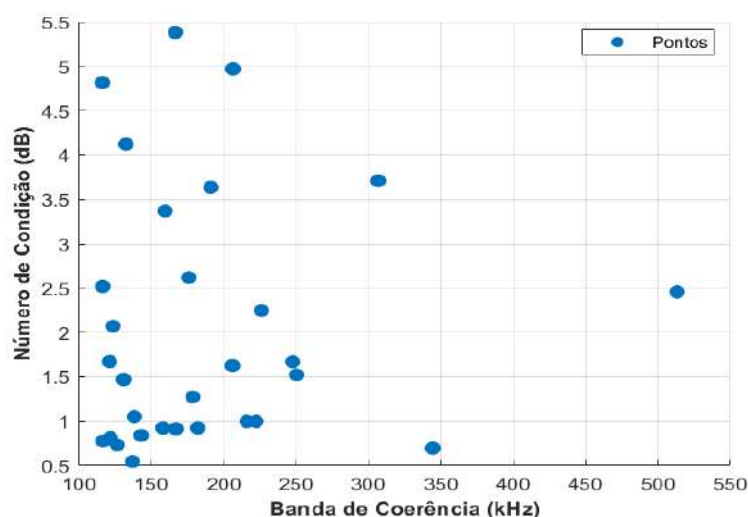
A Figura 180 apresenta a relação C/N, considerando a inserção de ruído no sistema, e o Número de Condição para os pontos analisados. Observa-se uma tendência de crescimento do número de condição à medida que a relação C/N aumenta, especialmente a partir de aproximadamente 14 dB de C/N, onde os valores do número de condição passam a variar de forma mais acentuada, alcançando até aproximadamente 5,5 dB. Esse comportamento indica que, em cenários com melhor C/N, o canal MIMO tende a apresentar maior desequilíbrio entre seus autovalores, o que se reflete em números de condição mais elevados. Isso indica menor ortogonalidade entre os canais espaciais. Por outro lado, nos pontos com C/N abaixo de 13 dB, o número de condição permanece predominantemente baixo (entre 0,5 e 2 dB), indicando canal mais balanceado e com melhor condição de inversão na equalização. Dessa forma, fica evidente uma correlação positiva entre a relação C/N e o número de condição, o que reforça a importância de considerar ambas as métricas na avaliação conjunta do desempenho e estabilidade do canal MIMO.

Figura 180. Análise da Correlação entre C/N e Número de Condição



pontos, o número de condição manteve-se baixo, sugerindo boa ortogonalidade entre os canais e, portanto, melhor desempenho na separação espacial dos fluxos transmitidos. Entretanto, também é possível identificar alguns pontos isolados em que, mesmo com banda de coerência reduzida, o número de condição foi elevado (acima de 4 dB). Esses casos representam canais mal condicionados, possivelmente devido a reflexões intensas, ou baixa correlação espacial entre as antenas, fatores que degradam a eficiência do sistema MIMO. Dessa forma, a presença desses poucos pontos fora da tendência geral reforça que, embora exista certa relação entre a banda de coerência e o número de condição, outros fatores do ambiente de propagação também influenciam o comportamento do canal e a estabilidade do sistema.

Figura 181. Análise da Correlação entre Número de Condição e Banda de Coerência



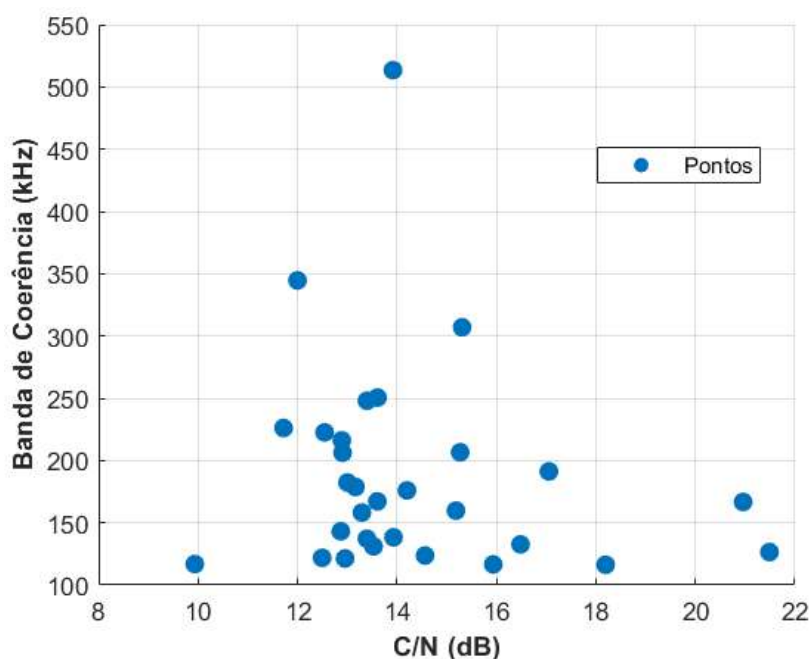
Fonte: Autor.

i) Correlação entre C/N e Banda de Coerência

A Figura 182 apresenta a relação C/N e a Banda de Coerência para os pontos medidos. De modo geral, observa-se que não há uma correlação linear evidente entre essas duas variáveis, mas é possível identificar algumas tendências comportamentais relevantes. A maioria dos pontos está concentrada na faixa de C/N entre 12 e 16 dB, onde a banda de coerência varia entre aproximadamente 100 kHz e 530 kHz. Por outro lado, valores baixos de banda de coerência (próximos de 100 kHz) aparecem distribuídos em diferentes níveis de C/N, o que reforça a influência de condições locais de propagação

(como obstáculos e reflexões) sobre essa métrica. Dessa forma, fica evidente que a relação C/N não é o único fator determinante dessa variabilidade, sendo o comportamento do canal fortemente dependente das condições de multipercurso.

Figura 182. Análise da Correlação entre C/N e Banda de Coerência

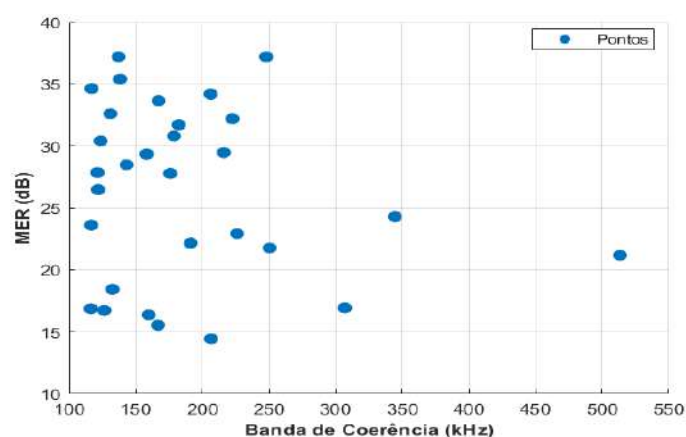


Fonte: Autor.

j) Correlação entre Banda de Coerência e MER

A Figura 183 apresenta a relação entre a banda de coerência do canal e os valores de MER obtidos nos pontos de medição. Observa-se que a maioria dos valores de MER elevados (acima de 25 dB) está concentrada em bandas de coerência menores, tipicamente entre 100 kHz e 250 kHz. À medida que a banda de coerência aumenta, os valores de MER tendem a se dispersar e, em geral, apresentam desempenho inferior, com várias medições abaixo de 25 dB. Esse comportamento indica que canais com menor banda de coerência, associados a menor variação espectral, favorecem uma maior qualidade de sinal, refletida em valores de MER mais altos. Em contrapartida, canais com maior banda de coerência, as vezes resultam em degradação de MER. Contudo, a dispersão dos pontos mostra que a banda de coerência, isoladamente, não determina totalmente o desempenho, sendo influenciada por outros fatores ambientais e características do canal.

Figura 183. Análise da Correlação entre Banda de Coerência e MER

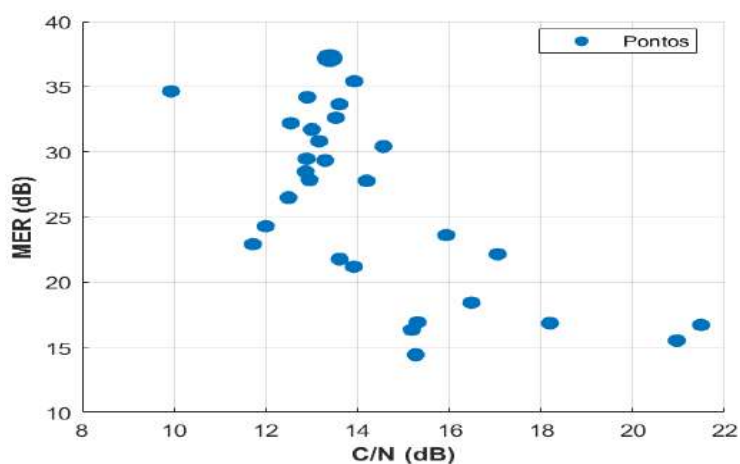


Fonte: Autor.

k) Correlação entre Relação C/N e MER

A Figura 184 apresenta a relação entre C/N e a MER nos diferentes pontos medidos. Observa-se que valores mais elevados de MER nem sempre estão associados a maiores valores de C/N. A região com maior concentração de pontos de MER elevada (acima de 30 dB) ocorre predominantemente para valores de C/N entre 10 e 14 dB. Por outro lado, valores de MER mais baixos (entre 14 e 20 dB) se espalham ao longo de um intervalo mais amplo da relação C/N, chegando até aproximadamente 22 dB. Esse comportamento indica que a relação C/N, isoladamente, não é um indicador direto da qualidade MER em cenários reais de recepção. A dispersão significativa dos pontos indica a influência de outros fatores, como condições de canal, multipercurso e variações ambientais, que afetam o desempenho do sistema.

Figura 184. Análise da Correlação entre C/N e MER

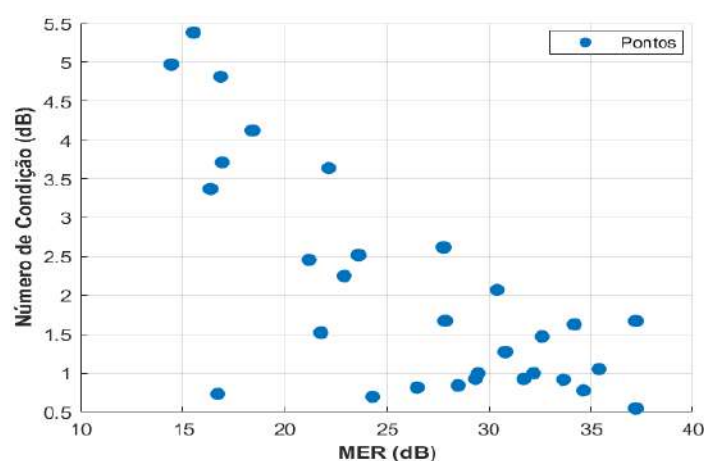


Fonte: Autor.

l) Correlação entre Número de Condição e MER

A Figura 185 apresenta a relação entre o número de condição do canal e MER nos pontos avaliados. Observa-se uma tendência predominante bem definida: valores mais baixos de MER geralmente estão associados a números de condição mais elevados (acima de 3 dB), indicando canais mal condicionados e maior dificuldade de equalização. Por outro lado, quando o número de condição é reduzido (próximo ou abaixo de 3 dB), na maioria dos casos os valores de MER tendem a ser significativamente superior, frequentemente acima de 21 dB. Apesar dessa tendência dominante, nota-se a presença de poucas exceções entre os pontos analisados, nas quais a relação direta entre número de condição e MER não se manifesta de forma estrita, possivelmente em função de características específicas ou de incertezas associadas às medições. De forma geral, esse comportamento evidencia a forte correlação entre a qualidade do canal MIMO e o desempenho do sistema: canais bem condicionados, com melhor ortogonalidade entre as antenas e menor sensibilidade ao ruído e interferência, favorecem a recuperação eficiente do sinal e resultam em maior MER. Já canais mal condicionados impõem maior esforço de equalização e amplificam o impacto de ruídos e erros, degradando a qualidade do sinal.

Figura 185. Análise da Correlação entre Número de Condição e MER



Fonte: Autor.

7.4 Discussão dos Resultados

Nesta seção, discutem-se os resultados obtidos nos 30 pontos avaliados, buscando interpretar o comportamento das métricas de desempenho em diferentes cenários de recepção MIMO 2x2 no padrão ISDB-T avançado, considerando a utilização do equalizador MMSE.

De modo geral, os pontos de medição 1, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 27 e 28 apresentaram desempenho excelente, indicando canais bem condicionados. Esses locais, em sua maioria, apresentaram condições favoráveis de propagação, mesmo em presença de obstruções ou de multipercurso, o que demonstra a robustez do sistema MIMO frente às variações do ambiente.

Os pontos 5, 7, 16, 21 e 24 apresentaram desempenho considerado bom, refletindo canais mais desafiadores. Nesses casos, verificou-se maior influência de reflexões e seletividade em frequência. Por outro lado, os pontos 2, 3, 13, 18, 29 e 30 registraram desempenho significativamente inferior, com degradação expressiva de MER e elevação acentuada do número de condição, evidenciando forte desbalanceamento do canal MIMO e condições de propagação mais severas.

A análise conjunta das métricas revelou que o número de condição exerce papel importante na avaliação de desempenho do sistema MIMO, apresentando correlação com a MER. De modo geral, em pontos com número de condição reduzido, obtiveram maiores valores de MER, o que confirma que canais bem condicionados favorecem o processo de equalização. Em contrapartida, números de condição elevados estiveram na maioria dos casos associados à redução de MER, mesmo quando o C/N apresentava níveis adequados, evidenciando que o desempenho não depende exclusivamente da relação C/N, mas também da estabilidade e da correlação entre os canais MIMO.

A análise da banda de coerência mostrou-se coerente com a variabilidade do canal: pontos com menor banda de coerência apresentaram maior seletividade em frequência, reforçando o impacto do ambiente de propagação sobre o desempenho. Observou-se ainda que, na maioria dos pontos, a redução da banda de coerência esteve associada a baixos valores de número de condição, indicando que o sistema MIMO manteve bom desempenho mesmo em ambientes com multipercurso.

Esses resultados indicam que, em aplicações reais utilizando MIMO, a avaliação do número de condição pode ser um parâmetro importante para o planejamento de cobertura e para o dimensionamento de técnicas de equalização adequadas. A integração das métricas analisadas também permite identificar previamente regiões críticas à recepção MIMO, possibilitando estratégias mais eficientes de otimização da rede de transmissão e de posicionamento das antenas transmissoras e receptoras.

Os resultados demonstram que o desempenho MIMO está fortemente relacionado ao condicionamento do canal. Isso ocorre porque a recepção em cada antena está relacionada à influência do sinal propagado pelas antenas transmissoras. Portanto, as métricas

avaliadas isoladamente não são suficientes para caracterizar completamente o comportamento do sistema. A banda de coerência complementa essa análise ao indicar o grau de seletividade em frequência e refletir as condições locais de propagação. Tais observações reforçam a importância de uma abordagem multifatorial para a caracterização e o entendimento do desempenho de sistemas MIMO em ambientes reais de transmissão.

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

8.1 Resumo das Contribuições do Estudo

Este trabalho apresenta uma análise abrangente do desempenho MIMO 2x2 em cenários urbanos complexos, a partir de medições realizadas em 30 pontos distintos na cidade do Rio de Janeiro. As principais contribuições podem ser sintetizadas nos seguintes aspectos:

1. A avaliação empírica de métricas fundamentais como relação C/N, potência de recepção, banda de coerência, número de condição e MER, permitiu caracterizar com maior profundidade o comportamento do sistema em ambientes de propagação reais.
2. A utilização do número de condição como parâmetro complementar para análise de canais MIMO, evidencia sua relevância na avaliação da eficiência de técnicas de equalização e na robustez da recepção.
3. A confirmação da robustez do ISDB-T Avançado em diferentes cenários, mesmo em condições adversas, com destaque para ambientes com forte multipercurso.
4. O desenvolvimento e aplicação de um código em MATLAB para processar os dados coletados, viabilizou a análise e a correlação de métricas, oferecendo uma ferramenta de apoio para análises futuras em pesquisas relacionadas à TV Digital.

8.2 Implicações Práticas dos Resultados

Os resultados obtidos possuem implicações diretas para a evolução da TV Digital no Brasil e em outros países:

1. Qualidade da recepção: verificou-se que, em grande parte dos pontos analisados, a MER manteve-se acima do limiar mínimo necessário para recepção estável, reforçando a adequação do sistema para ambientes urbanos complexos.

2. **Robustez do MIMO:** de modo geral, os cenários com número de condição baixo (próximo de 1) apresentaram correlação reduzida entre os canais, resultando em desempenho superior, enquanto valores elevados (>3) estiveram associados a quedas de MER e maior vulnerabilidade à interferência.
3. **Eficiência espectral:** os resultados indicam que o uso do MIMO 2x2 contribui efetivamente para aumentar a eficiência espectral, permitindo maior aproveitamento da banda disponível.
4. **Subsídios para a TV 3.0:** os achados oferecem informações técnicas relevantes para a adaptação do ATSC 3.0 ao cenário brasileiro, indicando parâmetros críticos de recepção que devem ser considerados na definição dos requisitos de desempenho.

8.3 Limitações do Estudo

Apesar da relevância dos resultados, algumas limitações devem ser destacadas:

1. A campanha de medições foi restrita a 30 pontos em uma única cidade (Rio de Janeiro), o que pode limitar a generalização dos resultados para outros contextos urbanos, suburbanos ou rurais.
2. A análise foi concentrada no sistema MIMO 2x2, não abrangendo outras configurações MIMO que poderiam apresentar comportamentos e desempenhos diferenciados.
3. Algumas variáveis ambientais, como condições climáticas e presença de interferências externas, não foram sistematicamente controladas, podendo impactar em certos resultados.
4. O estudo concentrou-se na camada física, não abordando métricas de camada superior, que poderiam enriquecer a avaliação do impacto na experiência final do usuário.

8.4 Recomendações para Trabalhos Futuros

Com base nas análises e limitações encontradas, sugerem-se os seguintes direcionamentos para pesquisas futuras:

1. Aplicação de técnicas de Inteligência Artificial para modelar, prever e classificar o desempenho do canal MIMO em diferentes cenários de propagação.

2. Expansão da campanha de medições para diferentes regiões geográficas do Brasil, a fim de ampliar a representatividade dos resultados e gerar bases de dados ainda mais robustas para treinar modelos de Inteligência Artificial.
3. Análise temporal de variabilidade do canal, considerando medições em diferentes horários, condições climáticas e variações sazonais.
4. Desenvolvimento de simuladores híbridos, unindo simulações computacionais e modelos baseados em Inteligência Artificial treinados com dados reais, possibilitando prever o comportamento do sistema em larga escala, com maior precisão e menor custo experimental.

9 REFERÊNCIAS

- [1] GONSIOROSKI, Leonardo Henrique et al. Evaluation of the field-test results of advanced ISDB-T system with low-rate LDPC codes. *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 69, n. 3, p. 675-690, 2023. DOI: 10.1109/TBC.2023.3280672.
- [2] NAKAMURA, Madoka et al. A Study on the Transmission System of an Advanced ISDB-T. In: 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). IEEE, 2019. p. 1-5. DOI: 10.1109/BMSB47279.2019.8971915.
- [3] SHITOMI, T. et al. Fixed Reception Performance of FDM-based Transmission System for Advanced ISDB-T. *SET INTERNATIONAL JOURNAL OF BROADCAST ENGINEERING*, v. 2020, n. 6, p. 9–20, 1 ago. 2020. DOI: 10.18580/setijbe.2020.1.
- [4] KAMBARA, K. System Verification of Advanced ISDB-T Gateway. *SET INTERNATIONAL JOURNAL OF BROADCAST ENGINEERING*, v. 2023, n. 1, 1 dez. 2023. DOI: 10.18580/setijbe.2023.8.
- [5] BRASIL. Decreto nº 11.484, de 6 de abril de 2023. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 6 abr. 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/D11484.htm. Acesso em: 16 maio 2025.
- [6] BRAZILIAN DIGITAL TERRESTRIAL TV SYSTEM FORUM. TV 3.0 Project – Phase 3 - Over-the-air Physical Layer Field Tests, 2024. Disponível em: https://forumsbtvd.org.br/wp-content/uploads/2024/07/SBTVD-TV_3_0-P3-PL-Field-Report.pdf. Acesso em: 9 maio 2025.
- [7] ASSOCIATION OF RADIO INDUSTRIES AND BUSINESSES (ARIB). Transmission system for digital terrestrial television broadcasting: ARIB STD-B31, version 2.2. Tokyo, 2014.
- [8] SERIES, B. T. Error-correction, data framing, modulation and emission methods for digital terrestrial television broadcasting. International Telecommunication Union, v. 2011, 2011.
- [9] SHIRAI, LNoriyuki et al. Laboratory experiments and large-scale field trials for evaluating the advanced ISDB-T. In: 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). IEEE, 2019. p. 1-5. DOI: 10.1109/BMSB47279.2019.8971852.

- [10] ASAKURA, S.; SATO, A.; KAMBARA, K. A Study on Channel Bonding for Advanced ISDB-T. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, v. 12, n. 1, p. 100–109, 2024.
- [11] ASAKURA, S. et al. End-to-end Verification of the Advanced Broadcasting System. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, v. 11, n. 3, p. 113–122, 2023.
- [12] MIYASAKA, Hiroaki et al. A study on the scattered pilot pattern of mobile reception for an advanced ISDB-T. In: 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). IEEE, 2020. p. 1-4. DOI: 10.1109/ICCE46568.2020.9043119.
- [13] FIGUEIREDO, R. S. DE. A DEFINIÇÃO DO PADRÃO DE TV DIGITAL NO BRASIL: UM ESTUDO SOBRE A CONSTRUÇÃO SOCIAL DE UM PADRÃO TECNOLÓGICO. Dissertação—São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 2009.
- [14] FISHER, W. *Digital Video and Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide*. Thirs Edition ed. Springer, 2010.
- [15] CASTRO, M. DA S. *TV Digital: do Estado da Arte aos Desafios da Implantação*. Dissertação—Brasília: Universidade de Brasília, 2006.
- [16] BRASIL. Ministério das Comunicações. Ministério das Comunicações encerra a transmissão analógica de TV em 2.933 cidades. Governo Federal, Brasília, DF, jan. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcom/pt-br/noticias/2024/janeiro/ministerio-das-comunicacoes-encerra-a-transmissao-analogica-de-tv-em-2933-cidades>. Acesso em: 3 mar. 2025.
- [17] PEREIRA, L. C. DE A. *INTERATIVIDADE E PERSPECTIVAS NO TELEJORNALISMO DA TV DIGITAL*. Dissertação—João Pessoa: UFPB, 2010.
- [18] DIONÍSIO, V.; AKAMINE, C. Comparison of Terrestrial DTV Systems: ISDB-TB and ATSC 3.0. *SET International Journal of Broadcast Engineering*, v. 2017, n. 3, p. 9–14, 1 nov. 2017. DOI: 10.18580/setijbe.2017.1.
- [19] FISCHER, W. *Digital Video and Broadcasting Technology*. v. 3, 2010.
- [20] GONSIOROSKI, L. H. et al. Advanced ISDB-T—Next Generation Digital TV System: Performance in Field Tests in Brazil. *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 69, n. 2, p. 538–551, jun. 2023. DOI: 10.1109/TBC.2022.3226657.

- [21] IJIGUCHI, Tomoya et al. Performance evaluation of coded SFN for an advanced ISDB-T. In: 2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). IEEE, 2020. p. 1-6. DOI: 10.1109/BMSB49480.2020.9379607.
- [22] HENRIQUE GONSIOROSKI FURTADO DA SILVA, L. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL DE PROPAGAÇÃO BANDA LARGA E MODELAGEM DA PERDA E TRANSMISSÃO ATRAVÉS DE EDIFICAÇÕES EM REGIÕES URBANIZADAS NA FAIXA DE 2.5 GHZ. Rio de Janeiro, Brazil: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 16 set. 2013. DOI: 10.17771/PUCRio.acad.34490.
- [23] FOSCHINI, G. J.; GANS, M. J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, v. 6, p. 311–335, 1998.
- [24] BIGLIERI, E. et al. *MIMO Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [25] DE MELLO JUNIOR, Harold Dias et al. *Caracterização de Canais Rádio-Móvel em Ambientes Exteriores: uma Abordagem utilizando Filtros Digitais*. São Carlos, SP, 2004.
- [26] DAMMANN, A.; RAULEFS, R.; PLASS, S. Performance of Cyclic Delay Diversity in Ricean Channels. Em: *Multi-Carrier Spread Spectrum 2007*. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 217–226. DOI: 10.1007/978-1-4020-6129-5_22.
- [27] NOGUEIRA, S. E. F. APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS NA IDENTIFICAÇÃO DE MULTIPERCURSOS PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE DISPERSÃO TEMPORAL. Dissertação—São Luis: UEMA, 2019.
- [28] PARSONS, John David; PARSONS, Prof J. David. *The mobile radio propagation channel*. 1992.
- [29] RAPPAPORT, T. S. *WIRELESS COMMUNICATIONS*. 2. ed. Prentice Hall PTR, 2009.
- [30] EL AZHARI, M. et al. Characterization of an Off-Body Channel at 2.45 GHz in an Underground Mine Environment. *Progress In Electromagnetics Research M*, v. 43, p. 91–100, 2015.

- [31] SESEÑA-OSORIO, Jorge A. et al. Analysis and experimental evaluation of the frequency response of an indoor radiating cable in the UHF band. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2015, n. 1, p. 24, 2015. DOI: 10.1186/s13638-015-0245-1.
- [32] NGUYEN, VanDuc et al. Channel impulse response length and noise variance estimation for OFDM systems with adaptive guard interval. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2007, n. 1, p. 024342, 2007. DOI: 10.1155/2007/24342.
- [33] SOBRON, Iker; MENDICUTE, Mikel; ALTUNA, Jon. Full-rate full-diversity space-frequency block coding for digital TV broadcasting. In: 2010 18th European Signal Processing Conference. IEEE, 2010. p. 1514-1518.
- [34] ASLAM, Mohammed Zahid et al. Massive MIMO channel performance analysis considering separation of simultaneous users. In: WSA 2018; 22nd International ITG Workshop on Smart Antennas. VDE, 2018. p. 1-6.
- [35] RABAÇA, Ricardo Seriacopi; AKAMINE, Cristiano. Estudo comparativo sobre os métodos de diversidade para sistemas de TV digital. In: *Brazilian Technology Symposium (BTSym)*, 2016.
- [36] SHITOMI, Takuya et al. Performance evaluation of MIMO broadcast systems for advanced digital terrestrial TV. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2021, n. 1, p. 89, 2021. DOI: 10.1186/s13638-021-01972-w.
- [37] MARZETTA, Thomas L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE transactions on wireless communications*, v. 9, n. 11, p. 3590-3600, 2010. DOI: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [38] KITA, N. et al. Measurement of Demmel condition number for 2×2 MIMO-OFDM broadband channels. 2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference. VTC 2004-Spring (IEEE Cat. No.04CH37514). DOI: 10.1109/VETECS.2004.1387961.
- [39] ABBASI, Qammer H. et al. Condition number variability of ultra wideband MIMO on body channels. In: 2016 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). IEEE, 2016. p. 167-169. DOI: 10.1109/IWAT.2016.7434833.
- [40] ZHANG, Xinying; KUNG, Sun-Yuan. Capacity analysis for parallel and sequential MIMO equalizers. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 51, n. 11, p. 2989-3002, 2003. DOI: 10.1109/TSP.2003.818151.

- [41] CHAUDHARI, M. U.; WAKHOURE, P.; SHAIKH, K. Zero-Forcing Equilization Technique for MIMO System. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, v. 7, n. 4, 2018.
- [42] TRIMECHE, Abdessalem; SAKLY, Anis; MTIBAA, Abdellatif. FPGA implementation of ML, ZF and MMSE equalizers for MIMO systems. *Procedia Computer Science*, v. 73, p. 226-233, 2015. DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.022.
- [43] SANCHES, J. M. Solutions for New Terrestrial Broadcasting Systems Offering Simultaneously Stationary and Mobile Services. Tese de Doutorado— Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, 2014.
- [44] NGO, Hien Quoc; LARSSON, Erik G.; MARZETTA, Thomas L. Aspects of favorable propagation in massive MIMO. In: 2014 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO). IEEE, 2014. p. 76-80.
- [45] SAMPATH, Hemanth et al. A fourth-generation MIMO-OFDM broadband wireless system: design, performance, and field trial results. *IEEE Communications Magazine*, v. 40, n. 9, p. 143-149, 2002. DOI: 10.1109/MCOM.2002.1031841.
- [46] GONSIOROSKI, LEONARDO HENRIQUE et al. Reuse Field Tests with Advanced ISDB-T System with Two Layers and MIMO 2x2. *SET INTERNATIONAL JOURNAL OF BROADCAST ENGINEERING*, v. 10, 2024. DOI: 10.18580/setijbe.2024.2.
- [47] SAITO, Susumu et al. 8K terrestrial transmission field tests using dual-polarized MIMO and higher-order modulation OFDM. *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 62, n. 1, p. 306-315, 2015. DOI: 10.1109/TBC.2015.2494853.
- [48] DO AMARAL, Roberto Dimas Ribeiro. Viabilização da Televisão Digital Terrestre em pequenos e médios broadcasters utilizando o datacasting. 2013. Tese de Doutorado. ISCTE-Instituto Universitario de Lisboa (Portugal).
- [49] HAYKIN, S. *COMMUNICATION SYSTEMS*. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [50] RAIZER, A.; TOCCOLIN, K.; FONSECA, M. Transport Stream Files Assembling and Analysis of BER Performance into ISDB-Tb Standard. *SET International Journal of Broadcast Engineering*, v. 2017, n. 3, p. 16–21, 1 nov. 2017. DOI: 10.18580/setijbe.2017.2.
- [51] COVER, T. M. *ELEMENTS OF INFORMATION THEORY*. 2. ed. Canada: John Wiley & Sons, 2006.

- [52] ANGUEIRA, P. et al. DTV Reception Quality Field Tests for Portable Outdoor Reception in a Single Frequency Network. *IEEE Transactions on Broadcas-ting*, v. 50, n. 1, p. 42–48, mar. 2004. DOI: 10.1109/TBC.2003.822988.
- [53] RAPPAPORT, T. S. *WIRELESS COMMUNICATIONS*. 2. ed. Prentice HaD PTR, 2002.
- [54] ALMEIDA, M. P. C. et al. Experimental analysis of the signal-to-noise ratio of digital ISDB-TB TV receivers and multipath in the VHF-high band. In: 2015 7th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). IEEE, 2015. p. 1-5. DOI: 10.1109/LATINCOM.2015.7430134.
- [55] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-R BT.2036-1: Characteristics of a reference receiving system for frequency planning of digital terrestrial television systems*. Geneva, 2016. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.2036-1-201607-I/en>>. Acesso em: 4 abr. 2025.
- [56] GONSIOROSKI, L. H.; SANTOS, A. B. C. dos; FERNANDES, N.; MELLO, L. da S. Testes de campo com sistema 5G Broadcast no Brasil. In: Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2023. DOI: 10.14209/sbrt.2023.1570923871.
- [57] MALARIĆ, Krešimir; SUĆ, Ivan; BAČIĆ, Iva. Measurement of DVB-S and DVB-S2 parameters. In: 2015 23rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). IEEE, 2015. p. 160-164.
- [58] POLAK, Ladislav; KALLER, Ondrej; KRATOCHVIL, Tomas. SISO/MISO performances in DVB-T2 and fixed TV channels. In: 2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). IEEE, 2015. p. 768-771. DOI: 10.1109/TSP.2015.7296369.
- [59] STORI, N.; REHME, J. Influence of MER vs. Coverage Area. NAB BEC Proceedings. 2015.
- [60] OMI, Julio et al. Performance analysis of tv 3.0 over-the-air physical layer protocols. In: 2022 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). IEEE, 2022. p. 1-5.
- [61] SANTOS, Amanda Beatriz Cunha dos. Análise de Desempenho de Camada Física Over-The-Air do Padrão ISDB-T Avançado para Definição do Novo Padrão de TV Digital Brasileiro. 2025, 166 f. Tese (doutorado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, 2025.

ANEXO A - Código Desenvolvido em MATLAB

```

%%
% Programa elaborado para análises, correlações e Caracterização
do Canal

% Nome do arquivo Excel
arquivo = 'sinal-limiar-recepcao.xlsx';

% Leitura dos dados - ajuste o nome da aba se necessário
% Supondo que os dados estão a partir da célula A1, com cabeçalho na
linha 1
dados = readtable(arquivo);

% Extração dos dados para cada polarização
% Extração dos dados
pontos = 1:30;
pot_V = dados(:, 2);
pot_H = dados(:, 3);
lim_V = dados(:, 4);
lim_H = dados(:, 5);
pontos = dados.pontos;

% --- Gráfico Polarização V ---
figure('Name','Polarização V - Potência vs Limiar','Number-
Title','off','Color','w');
hold on; grid on; box on;

h1 = stem(pontos, pot_V, 'g-', 'LineWidth',1.5, 'MarkerFaceColor', 'g',
'DisplayName', 'Potência Recebida');
h2 = stem(pontos, lim_V, 'b--', 'LineWidth',1.5, 'MarkerFaceColor',
'none', 'MarkerEdgeColor', 'b', 'DisplayName', 'Limiar de Recepção');
set(h2, 'Marker', 'o');

for i = 1:30
    diff_db = pot_V(i) - lim_V(i);
    y_pos = max(pot_V(i), lim_V(i)) + 3;
    text(pontos(i), y_pos, sprintf('%.1f dB', diff_db), ...
        'HorizontalAlignment', 'center', ...
        'FontSize', 9, ...
        'FontWeight', 'bold', ...
        'BackgroundColor', 'w', ...
        'EdgeColor', 'k', ...
        'Margin', 1);
end

xlabel('Ponto de Medição', 'FontSize', 12);
ylabel('Nível (dBm)', 'FontSize', 12);
title('Polarização V - Potência vs Limiar', 'FontSize', 14,
'FontWeight', 'bold');
legend('Location', 'best');
xlim([0 max(pontos)+1]);
ylim([min([lim_V; pot_V]) - 5, max([lim_V; pot_V]) + 10]);

hold off;

% --- Gráfico Polarização H ---

```

```

figure('Name','Polarização H - Potência vs Limiar','Number-
Title','off','Color','w');
hold on; grid on; box on;

h1 = stem(pontos, pot_H, 'g-', 'LineWidth',1.5, 'MarkerFaceColor', 'g',
'DisplayName', 'Potência Recebida');
h2 = stem(pontos, lim_H, 'b--', 'LineWidth',1.5, 'MarkerFaceColor',
'none', 'MarkerEdgeColor', 'b', 'DisplayName', 'Limiar de Recepção');
set(h2, 'Marker', 'o');

for i = 1:30
    diff_db = pot_H(i) - lim_H(i);
    y_pos = max(pot_H(i), lim_H(i)) + 3;
    text(pontos(i), y_pos, sprintf('%.1f dB', diff_db), ...
        'HorizontalAlignment', 'center', ...
        'FontSize', 9, ...
        'FontWeight', 'bold', ...
        'BackgroundColor', 'w', ...
        'EdgeColor', 'k', ...
        'Margin', 1);
end

xlabel('Ponto de Medição', 'FontSize', 12);
ylabel('Nível (dBm)', 'FontSize', 12);
title('Polarização H - Potência vs Limiar', 'FontSize', 14,
'FontWeight', 'bold');
legend('Location', 'best');
xlim([0 max(pontos)+1]);
ylim([min([lim_H; pot_H]) - 5, max([lim_H; pot_H]) + 10]);

hold off;

% Nome do arquivo Excel
arquivo = 'retardoMedioRms.xlsx'; % Altere se necessário

% Leitura dos dados
dados = readtable(arquivo);

% Vetores de retardo médio
mvv = dados.retardoMVV;
mvh = dados.retardoMVH;
mhv = dados.retardoMHV;
mhh = dados.retardoMHH;

% Vetores de retardo RMS
rms_vv = dados.retardoRMSVV;
rms_vh = dados.retardoRMSVH;
rms_hv = dados.retardoRMSHV;
rms_hh = dados.retardoRMSHH;

pontos = 1:height(dados);

%% Gráfico 1: Retardo Médio (todas polarizações)
figure('Name','Retardo Médio - Todas Polarizações','Number-
Title','off','Color','w');
hold on; grid on; box on;
bar(pontos, [mhh mhv mvh mvv], 'grouped');
xlabel('Ponto de Medição');
ylabel('Retardo Médio (μs)');

```

```

title('Retardo Médio por Polarização');
legend({'H-H', 'H-V', 'V-H', 'V-V'}, 'Location', 'northwest');
hold off;

% Gráfico 2: Retardo RMS (todas polarizações)
figure('Name', 'Retardo RMS - Todas Polarizações', 'Number-
Title', 'off', 'Color', 'w');
hold on; grid on; box on;
bar(pontos, [rms_hh rms_hv rms_vh rms_vv], 'grouped');
xlabel('Ponto de Medição');
ylabel('Retardo RMS (μs)');
title('Retardo RMS por Polarização');
legend({'H-H', 'H-V', 'V-H', 'V-V'}, 'Location', 'northwest');
hold off;

% Função auxiliar para regressão e scatter
polarizacoes = {'H-H', 'H-V', 'V-H', 'V-V'};
medios = {mhh, mhhv, mvh, mvv};
rms = {rms_hh, rms_hv, rms_vh, rms_vv};

for i = 1:4
    x = medios{i};
    y = rms{i};

    % Regressão linear
    p = polyfit(x, y, 1);
    yfit = polyval(p, x);
    R = corrcoef(x, y);
    R2 = R(1,2)^2;

    % Gráfico scatter
    figure('Name', ['Correlação - ', polarizacoes{i}], 'Number-
Title', 'off', 'Color', 'w');
    scatter(x, y, 50, 'filled');
    hold on;
    plot(x, yfit, 'r-', 'LineWidth', 2);
    grid on; box on;
    xlabel('Retardo Médio (μs)');
    ylabel('Retardo RMS (μs)');
    title(['Correlação Retardo Médio x Retardo RMS - ', polariza-
coes{i}]);
    legend('Dados', ['Ajuste Linear (R^2 = ', num2str(R2,2), ')'], 'Lo-
cation', 'best');
    hold off;
end

% Nome do arquivo Excel
arquivo = 'retardoMedioRms.xlsx'; % Altere para o nome do seu arquivo

% Leitura da tabela
dados = readtable(arquivo);

% Número de pontos
pontos = 1:height(dados);

% Extração dos dados
multiV = dados.multipercorsoV;
multiH = dados.multipercorsoH;

```

```

multiHV = dados.multipercursoHV;
multiHH = dados.multipercursoHH;

retardoMVV = dados.retardoMVV;
retardoMVH = dados.retardoMVH;
retardoMHV = dados.retardoMHV;
retardoMHH = dados.retardoMHH;

retardoRMSVV = dados.retardoRMSVV;
retardoRMSVH = dados.retardoRMSVH;
retardoRMSHV = dados.retardoRMSHV;
retardoRMSHH = dados.retardoRMSHH;

% === Gráfico de barras - Quantidade de Multipercurso ===
figure('Name','Multipercurso por Polarização','Color','w');
bar(pontos, [multiVV, multiVH, multiHV, multiHH], 'grouped');
legend({'VV', 'VH', 'HV', 'HH'}, 'Location', 'northwest');
xlabel('Ponto de Medição'); ylabel('Nº de Caminhos');
title('Quantidade de Multipercurso por Polarização');
grid on;

% === Correlação Multipercurso x Retardo Médio ===
polarizacoes = {'VV','VH','HV','HH'};
multi = {multiVV, multiVH, multiHV, multiHH};
retM = {retardoMVV, retardoMVH, retardoMHV, retardoMHH};

figure('Name','Correlação Multipercurso x Retardo Médio','Color','w');
for i = 1:4
    subplot(2,2,i)
    scatter(multi{i}, retM{i}, 50, 'filled');
    %lsline; % linha de tendência
    %[r,~] = corrcoef(multi{i}, retM{i});
    %r2 = r(1,2)^2;
    xlabel('Multipercurso');
    ylabel('Retardo Médio (µs)');
    title(sprintf('Polarização %s', polarizacoes{i}, r2));
    grid on;
end

% === Correlação Multipercurso x Retardo RMS ===
retRMS = {retardoRMSVV, retardoRMSVH, retardoRMSHV, retardoRMSHH};

figure('Name','Correlação Multipercurso x Retardo RMS','Color','w');
for i = 1:4
    subplot(2,2,i)
    scatter(multi{i}, retRMS{i}, 50, 'filled');
    %lsline;
    %[r,~] = corrcoef(multi{i}, retRMS{i});
    %r2 = r(1,2)^2;
    xlabel('Multipercurso');
    ylabel('Retardo RMS (µs)');
    title(sprintf('Polarização %s', polarizacoes{i}, r2));
    grid on;
end

% Nome do arquivo Excel
arquivo = 'sinal-limiar-recepcao.xlsx';

```

```

% Leitura dos dados
dados = readtable(arquivo);

% Extração dos dados
pontos = dados.pontos;
pot_V = dados{:, 2};
pot_H = dados{:, 3};
lim_V = dados{:, 4};
lim_H = dados{:, 5};

%% --- Gráfico Polarização V ---
figure('Name','Polarização V - Potência vs Limiar','Number-
Title','off','Color','w');
hold on; grid on; box on;

% Plotagem dos marcadores de potência e limiar (sem linha vertical)
h1 = plot(pontos, pot_V, 'g^', 'MarkerSize', 7, 'MarkerFaceColor', 'g',
'DisplayName', 'Potência Recebida');
h2 = plot(pontos, lim_V, 'bo', 'MarkerSize', 7, 'MarkerFaceColor', 'no-
ne', 'DisplayName', 'Limiar de Recepção');

% Adiciona uma linha "falsa" só para legenda da diferença em dB
plot(NaN, NaN, '-', 'Color', 'y', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Dife-
rença (dB)');
% Linhas amarelas entre potência e limiar + anotações
for i = 1:30
    % Linha vertical amarela entre potência e limiar
    line([pontos(i), pontos(i)], [pot_V(i), lim_V(i)], 'Color', 'y',
'LineWidth', 2, 'HandleVisibility', 'off');

    % Texto com a diferença
    diff_db = pot_V(i) - lim_V(i);
    y_pos = max(pot_V(i), lim_V(i)) + 2;
    text(pontos(i), y_pos, sprintf('%.1f dB', diff_db), ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'FontSize', 9, ...
'FontWeight', 'bold', ...
'BackgroundColor', 'w', ...
'EdgeColor', 'k', ...
'Margin', 1);
end

xlabel('Ponto de Medição', 'FontSize', 12);
ylabel('Nível (dBm)', 'FontSize', 12);
title('Potência em Relação ao Limiar - Polarização V', 'FontSize', 14,
'FontWeight', 'bold');
legend('Location', 'best');
xlim([0 max(pontos)+1]);
ylim([min([lim_V; pot_V]) - 5, max([lim_V; pot_V]) + 10]);
xticks(pontos);
hold off;

%% --- Gráfico Polarização H ---
figure('Name','Polarização H - Potência vs Limiar','Number-
Title','off','Color','w');
hold on; grid on; box on;

% Plotagem dos marcadores de potência e limiar (sem linha vertical)

```

```

h1 = plot(pontos, pot_H, 'g^', 'MarkerSize', 7, 'MarkerFaceColor', 'g',
'DisplayName', 'Potência Recebida');
h2 = plot(pontos, lim_H, 'bo', 'MarkerSize', 7, 'MarkerFaceColor', 'none',
'DisplayName', 'Limiar de Recepção');

% Adiciona uma linha "falsa" só para legenda da diferença em dB
plot(NaN, NaN, '-', 'Color', 'y', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Diferença (dB)');
% Linhas amarelas entre potência e limiar + anotações
for i = 1:30
    line([pontos(i), pontos(i)], [pot_H(i), lim_H(i)], 'Color', 'y',
'LineWidth', 2, 'HandleVisibility', 'off');
    diff_db = pot_H(i) - lim_H(i);
    y_pos = max(pot_H(i), lim_H(i)) + 2;
    text(pontos(i), y_pos, sprintf('%.1f dB', diff_db), ...
        'HorizontalAlignment', 'center', ...
        'FontSize', 9, ...
        'FontWeight', 'bold', ...
        'BackgroundColor', 'w', ...
        'EdgeColor', 'k', ...
        'Margin', 1);
end

xlabel('Ponto de Medição', 'FontSize', 12);
ylabel('Nível (dBm)', 'FontSize', 12);
title('Potência em Relação ao Limiar - Polarização H', 'FontSize', 14,
'FontWeight', 'bold');
legend('Location', 'best');
xlim([0 max(pontos)+1]);
ylim([min([lim_H; pot_H]) - 5, max([lim_H; pot_H]) + 10]);
xticks(pontos);
hold off;

% === Leitura dos dados do Excel ===
filename = 'sinal-limiar-recepcao.xlsx';
dados = readtable(filename);

pontos = dados.pontos;
pot_V = dados.sinalV;
pot_H = dados.sinalH;
limiar_V = dados.limiarSinalV;
limiar_H = dados.limiarSinalH;

% === Gráfico 1: Potência de Recepção ===
figure;
plot(pontos, pot_V, '-o', 'LineWidth', 1.5, 'Color', [0 0.447 0.741],
'DisplayName', 'Potência V');
hold on;
plot(pontos, pot_H, '-s', 'LineWidth', 1.5, 'Color', [0.850 0.325
0.098], 'DisplayName', 'Potência H');
grid on;
xlabel('Ponto de Medição');
ylabel('Potência de Recepção (dBm)');
title('Potência de Recepção por Polarização');
legend('Location', 'best');
ylim([-80 -40]);
set(gcf, 'Color', 'w'); % Fundo branco da figura
set(gca, 'Color', 'w'); % Fundo branco do gráfico (eixos)

```



```

% === Gráfico 2: Limiar de Recepção ===
figure;
plot(pontos, limiar_V, '-o', 'LineWidth', 1.5, 'Color', [0.466 0.674
0.188], 'DisplayName', 'Limiar V');
hold on;
plot(pontos, limiar_H, '-s', 'LineWidth', 1.5, 'Color', [0.494 0.184
0.556], 'DisplayName', 'Limiar H');
grid on;
xlabel('Ponto de Medição');
ylabel('Limiar de Recepção (dBm)');
title('Limiar de Recepção por Polarização');
legend('Location', 'best');
ylim([-95 -80]);

% Estética adicional
set(findall(gcf, '-property', 'FontSize'), 'FontSize', 12)
set(gcf, 'Color', 'w'); % Fundo branco da figura
set(gca, 'Color', 'w'); % Fundo branco do gráfico (eixos)

% Leitura da planilha
arquivo = 'sinalRuidoMER.xlsx'; % Substitua pelo nome real do arquivo
dados = readtable(arquivo);

% Extração dos dados
pontos = dados.ponto;
limiarCNV = dados.limiarCNV;
limiarCNH = dados.limiarCNH;
merV = dados.merV;
merH = dados.merH;

% ----- Gráfico 1: Limiar C/N -----
figure('Name', 'C/N - V e H', 'Color', 'w');
plot(pontos, limiarCNV, '-o', 'LineWidth', 1.5, 'Color', 'b', 'Display-
Name', 'C/N V'); hold on;
plot(pontos, limiarCNH, '-s', 'LineWidth', 1.5, 'Color', 'g', 'Dis-
playName', 'C/N H');
grid on; box on;
xlabel('Ponto de Medição', 'FontSize', 12);
ylabel('C/N (dB)', 'FontSize', 12);
title('C/N por Ponto de Medição', 'FontWeight', 'bold');
legend('Location', 'best');

% ----- Gráfico 2: MER -----
figure('Name', 'MER - V e H', 'Color', 'w');
plot(pontos, merV, '-o', 'LineWidth', 1.5, 'Color', 'b', 'DisplayName',
'MER V'); hold on;
plot(pontos, merH, '-s', 'LineWidth', 1.5, 'Color', 'g', 'DisplayName',
'MER H');
grid on; box on;
xlabel('Ponto de Medição', 'FontSize', 12);
ylabel('MER (dB)', 'FontSize', 12);
title('MER por Ponto de Medição', 'FontWeight', 'bold');
legend('Location', 'best');

% ----- Gráfico 3: Limiar C/N x MER - Polarização V -----
figure('Name', 'C/N vs MER - Polarização V', 'Color', 'w');
scatter(limiarCNV, merV, 60, 'b', 'filled'); hold on;
grid on; box on;

```

```

% Ajuste linear
pV = polyfit(limiarCNV, merV, 1);
xV = linspace(min(limiarCNV), max(limiarCNV), 100);
yV = polyval(pV, xV);
plot(xV, yV, 'r-', 'LineWidth', 2);

% Correlação de Pearson
[rV, ~] = corr(limiarCNV, merV);
R2V = rV^2;

legend('Dados', sprintf('Ajuste Linear (R^2 = %.2f)', R2V), 'Location',
'best');
xlabel('Limiar C/N (dB)', 'FontSize', 12);
ylabel('MER (dB)', 'FontSize', 12);
title('Polarização V - C/N × MER', 'FontWeight', 'bold');

% ----- Gráfico 4: Limiar C/N × MER - Polarização H -----
figure('Name', 'C/N vs MER - Polarização H', 'Color', 'w');
scatter(limiarCNH, merH, 60, 'g', 'filled'); hold on;
grid on; box on;

% Ajuste linear
pH = polyfit(limiarCNH, merH, 1);
xH = linspace(min(limiarCNH), max(limiarCNH), 100);
yH = polyval(pH, xH);
plot(xH, yH, 'r-', 'LineWidth', 2);

% Correlação de Pearson
[rH, ~] = corr(limiarCNH, merH);
R2H = rH^2;

legend('Dados', sprintf('Ajuste Linear (R^2 = %.2f)', R2H), 'Location',
'best');
xlabel('Limiar C/N (dB)', 'FontSize', 12);
ylabel('MER (dB)', 'FontSize', 12);
title('Polarização H - C/N × MER', 'FontWeight', 'bold');

% =====
% Análise estatística dos dados de campo - Dissertação
% =====
clc; clear; close all;
% Carregar dados da planilha
% Substituir pelo nome correto do arquivo
data = readtable('DadosGeralMedicao.xlsx');

% Colunas relevantes
MER_V = data.merV;
MER_H = data.merH;
CN_V = data.limiarCNV;
CN_H = data.limiarCNH;
NC = data.NUMERODECONDICAO_MEDIA;
Pot_V = data.POTENCIADERECEPCOV;
Pot_H = data.POTENCIADERECEPCOH;

%% =====
% Estatísticas descritivas
% =====

```

```

stats = @(x) [mean(x), median(x), std(x), min(x), max(x),
(std(x)/mean(x))*100];

estatisticas = table(...
    stats(MER_V)', stats(MER_H)', stats(CN_V)', stats(CN_H)',
stats(NC)', ...
    'VariableNames', {'MER_V','MER_H','CN_V','CN_H','NC'}, ...
    'RowNames', {'Média','Mediana','Desvio','Mínimo','Máximo','CV_per-
cent'}));

disp('===== Estatísticas descritivas =====')
disp(estatisticas)

%% =====
% Distribuição em faixas
% =====
% Faixas para MER
faixasMER = [0 20 25 30 100];
labelsMER = {'<20','20-25','25-30','>30'};

[NmerV,~,binsV] = histcounts(MER_V,faixasMER);
[NmerH,~,binsH] = histcounts(MER_H,faixasMER);

percMER_V = NmerV/sum(NmerV)*100;
percMER_H = NmerH/sum(NmerH)*100;

TpercMER = table(labelsMER', percMER_V', percMER_H', ...
    'VariableNames', {'Faixa','MER_V_%','MER_H_%'});

disp('===== Distribuição percentual MER =====')
disp(TpercMER)

% Faixas para Número de Condição
faixasNC = [0 1.5 3 10];
labelsNC = {'≤1.5','1.5-3','>3'};

[Nnc,~,binsNC] = histcounts(NC,faixasNC);
percNC = Nnc/sum(Nnc)*100;

TpercNC = table(labelsNC', percNC', ...
    'VariableNames', {'Faixa','Percentual'});

disp('===== Distribuição percentual Número de Condição =====')
disp(TpercNC)

%% =====
% Correlações
% =====
[R_mer_cn, p1] = corr(MER_V, CN_V, 'Type','Pearson');
[R_mer_nc, p2] = corr(MER_V, NC, 'Type','Pearson');

disp('===== Correlações =====')
fprintf('Correlação MER x CN (V): %.2f\n', R_mer_cn);
fprintf('Correlação MER x Nº Condição: %.2f\n', R_mer_nc);

%% =====
% Gráficos
% =====

```

```

% Distribuição MER
figure;
bar(categorical(labelsMER), [percMER_V; percMER_H])
legend('MER V', 'MER H')
ylabel('% de pontos')
title('Distribuição do MER por faixas')

% Distribuição NC
figure;
bar(categorical(labelsNC), percNC)
ylabel('% de pontos')
title('Distribuição do Número de Condição')

% Boxplots
figure;
subplot(1,2,1)
boxplot([MER_V, MER_H], 'Labels', {'MER V', 'MER H'})
title('Boxplot MER')

subplot(1,2,2)
boxplot(NC)
title('Boxplot Número de Condição')

% Heatmap de correlação
mat = corr([MER_V, CN_V, NC], 'Type', 'Pearson');
figure;
heatmap({'MER', 'CN', 'NC'}, {'MER', 'CN', 'NC'}, mat)
title('Matriz de Correlação (Pearson)')

% =====
% Código MATLAB para análise dos dados de recepção
% =====

clc; clear; close all;

% ---- Leitura dos dados do Excel ----
% Altere 'dados.xlsx' para o nome do seu arquivo
filename = 'DadosGeralMedicao.xlsx';
data = readtable(filename);

% ---- Extração das colunas de interesse ----
% Ajuste os nomes das variáveis conforme aparecem no Excel
MER_V = data.merV;
MER_H = data.merH;
MER_med = (MER_V + MER_H)/2; % média entre polarizações

CN_V = data.limiarCNV;
CN_H = data.limiarCNH;
CN_med = (CN_V + CN_H)/2;

Pot_V = data.POTENCIADERECEPCOV;
Pot_H = data.POTENCIADERECEPCOH;
Pot_med = (Pot_V + Pot_H)/2;

Banda_VV = data.BANDADecoerenciaKHzVV;
Banda_VH = data.BANDADecoerenciaKHzVH;
Banda_HV = data.BANDADecoerenciaKHzHV;
Banda_HH = data.BANDADecoerenciaKHzHH;
Banda_med = (Banda_VV + Banda_VH + Banda_HV + Banda_HH)/4;

```

```

NumCond = data.NUMERODECONDICAO_MEDIA;

% ---- Lista de combinações de correlação ----
pares = {
    MER_med, NumCond, 'MER (dB)', 'Número de Condição (dB)';
    Banda_med, MER_med, 'Banda de Coerência (kHz)', 'MER (dB)';
    CN_med, MER_med, 'C/N (dB)', 'MER (dB)';
    Pot_med, MER_med, 'Potência de Recepção (dBm)', 'MER (dB)';
    Pot_med, CN_med, 'Potência de Recepção (dBm)', 'C/N (dB)';
    Pot_med, NumCond, 'Potência de Recepção (dBm)', 'Número de Condição
(dB)';
    Pot_med, Banda_med, 'Potência de Recepção (dBm)', 'Banda de Coerên-
cia (kHz)';
    CN_med, NumCond, 'C/N (dB)', 'Número de Condição (dB)';
    CN_med, Banda_med, 'C/N (dB)', 'Banda de Coerência (kHz)';
    Banda_med, NumCond, 'Banda de Coerência (kHz)', 'Número de Condição
(dB)';
};

% ---- Geração dos gráficos ----
for i = 1:size(pares,1)
    x = pares{i,1};
    y = pares{i,2};
    xlabeltxt = pares{i,3};
    ylabeltxt = pares{i,4};

    figure;

    %scatter(x, y, 60, 'filled');
    [unique_points, ~, idx] = unique([x y], 'rows');
    counts = histcounts(idx, 1:max(idx)+1);
    scatter(unique_points(:,1), unique_points(:,2), 60*counts, 'fil-
led')

    grid on;
    xlabel(xlabeltxt, 'FontWeight','bold');
    ylabel(ylabeltxt, 'FontWeight','bold');
    title([ylabeltxt ' vs ' xlabeltxt]);

    % Ajuste linear de tendência
    %hold on;
    %p = polyfit(x, y, 1);
    %yfit = polyval(p, x);
    %plot(x, yfit, 'r-', 'LineWidth',1.5);

    legend('Pontos','Location','best');

    set(gca, 'Color', [1 1 1]); % fundo do gráfico
    set(gcf, 'Color', [1 1 1]); % fundo da figura
end

% === CONFIGURAÇÕES ===
arquivo_excel = 'retardoMedioRms.xlsx'; % <- Substitua pelo nome real
do seu arquivo
nome_coluna = 'numeroCondicao'; % Nome da coluna no Excel

```

```

% === LEITURA DOS DADOS ===
dados = readtable(arquivo_excel);
numeroCondicao = dados.(nome_coluna);

% === EIXO X: Pontos de Medição ===
pontos = 1:length(numeroCondicao);

% === PLOT ===
figure;
plot(pontos, numeroCondicao, '-o', ...
     'LineWidth', 2, ...
     'MarkerSize', 6, ...
     'MarkerFaceColor', [0.2 0.6 1], ...
     'Color', [0 0.4 0.8]);

% === ESTILO E ESTÉTICA ===
title('Número de Condição Médio por Ponto de Medição', 'FontSize', 14,
      'FontWeight', 'bold');
xlabel('Ponto de Medição', 'FontSize', 12);
ylabel('Número de Condição (dB)', 'FontSize', 12);
grid on;
xlim([1 length(pontos)]);
ylim([floor(min(numeroCondicao))-1 ceil(max(numeroCondicao))+1]);

set(gca, 'FontSize', 11);
set(gcf, 'Color', 'w'); % Fundo branco da figura
set(gca, 'Color', 'w'); % Fundo branco dos eixos

% === OPCIONAL: Salvar figura ===
% saveas(gcf, 'grafico_numero_condicao.png');

% Leitura da planilha
dados = readtable('DadosBandaDeCoerencia.xlsx');

% Largura de banda do sinal (em kHz)
bs = 167; % ajuste se necessário (kHz)

% Extração dos dados por ponto (não assume 30 pontos fixos)
pontos = dados.Ponto;

% Somente enlaces co-polarizados
bc_VV = dados.Bc_H11; % V-V
bc_HH = dados.Bc_H22; % H-H

% Verifica tamanho
N = numel(pontos);

% Inicializa vetor de cores
cores = zeros(N,3);

% Critério: se QUALQUER um dos co-polarizados for seletivo (bc < bs) ->
seletivo
% Seletivo (vermelho) : bc_VV < bs OR bc_HH < bs
% Plano (azul)       : bc_VV >= bs AND bc_HH >= bs

% Lida com NaN: se um dos dois for NaN, usa o outro (se também NaN ->
marca cinza)
for i = 1:N

```

```

v = bc_VV(i);
h = bc_HH(i);

if isnan(v) && isnan(h)
    % ambos NaN -> marca cinza (indeterminado)
    cores(i,:) = [0.5 0.5 0.5];
else
    % se um for NaN, trata o outro normalmente
    if isnan(v), v = inf; end % se v desconhecido, não faz o
ponto seletivo por v
    if isnan(h), h = inf; end % se h desconhecido, não faz o
ponto seletivo por h

    isSeletivo = (v < bs) || (h < bs);
    if isSeletivo
        cores(i,:) = [1 0 0]; % vermelho = seletivo
    else
        cores(i,:) = [0 0 1]; % azul = plano
    end
end
end

% Para plot, usa bc_plot como o valor representativo para cada ponto.
% Aqui podemos usar o MIN entre VV e HH para evidenciar o "pior" caso
(mais conservador)
bc_plot = min([bc_VV, bc_HH], [], 2);

% Gráfico
figure;
scatter(pontos, bc_plot, 60, cores, 'filled', 'HandleVisibility',
'off');
xlabel('Ponto de Medição');
ylabel('Banda de Coerência (kHz)');
title('Classificação do Tipo de Desvanecimento (V-V e H-H)');
grid on;
hold on;

% Linha indicativa da largura de banda do sinal
yline(bs, '--k', 'DisplayName', sprintf('Largura de Banda (%.0f kHz)',
bs));

% Legenda
scatter(NaN, NaN, 60, 'b', 'filled', 'DisplayName', 'Plano em Frequên-
cia');
scatter(NaN, NaN, 60, 'r', 'filled', 'DisplayName', 'Seletivo em Fre-
quência');
%scatter(NaN, NaN, 60, [0.5 0.5 0.5], 'filled', 'DisplayName', 'Inde-
terminado (NaN)');
legend('Location', 'best');

set(gcf, 'Color', 'w');
set(gca, 'Color', 'w');

% Leitura da planilha (ajuste o nome do arquivo e das colunas se neces-
sário)
dados = readtable('DadosBandaDeCoerencia.xlsx');

% Largura de banda do sinal

```

```

%Bs = 5.83e6; % 5,83 MHz
bs = 167;

% Extração dos dados por fluxo
pontos = dados.Ponto;
bc_H11 = dados.Bc_H11;
bc_H12 = dados.Bc_H12;
bc_H21 = dados.Bc_H21;
bc_H22 = dados.Bc_H22;

bc_all = [bc_H11, bc_H12, bc_H21, bc_H22];

% Bc mínimo por ponto (análise conservadora)
%bc_min = min([bc_H11, bc_H12, bc_H21, bc_H22]);
bc_max = max(bc_all, [], 2);

bc_max = bc_max; % conversão de kHz para MHz

% Definir cores por ponto (azul = plano, vermelho = seletivo)
cores = zeros(30, 3);
for i = 1:30
    if bc_max(i) > bs
        cores(i, :) = [0 0 1]; % azul
    else
        cores(i, :) = [1 0 0]; % vermelho
    end
end

% Gráfico de dispersão com cores codificadas
figure;
scatter(pontos, bc_max, 60, cores, 'filled', 'HandleVisibility',
'off');
xlabel('Ponto de Medição');
ylabel('Banda de Coerência (KHz)');
title('Classificação do Tipo de Desvanecimento');
grid on;
hold on;

% Adiciona linha pontilhada indicando a largura de banda
%ylines(bs, '--k', sprintf('B_s = %.3f MHz', bs), ...
% 'LabelHorizontalAlignment', 'left', 'LabelVerticalAlignment',
% 'bottom');
% Linha pontilhada com legenda correta
ylines(bs, '--k', 'DisplayName', 'Largura de Banda (167 KHz)');
% Legenda personalizada
scatter(NaN, NaN, 60, 'b', 'filled', 'DisplayName', 'Plano em Frequên-
cia');
scatter(NaN, NaN, 60, 'r', 'filled', 'DisplayName', 'Seletivo em Fre-
quência');
legend('Location', 'best');
set(gcf, 'Color', 'w'); % Fundo branco da figura
set(gca, 'Color', 'w'); % Fundo branco do gráfico (eixos)

%% Limpeza inicial
clear
clc
close all

```



```

%% =====
% SELEÇÃO DO PONTO DE MEDIÇÃO
% Altere o valor abaixo para escolher o ponto (1 a 30)
%% =====
pontoSelecionado = '5';

%% =====
% DEFINIÇÃO DO DIRETÓRIO BASE
% Cada ponto possui arquivos distintos dentro da pasta Database
%% =====
baseDir = ['G:\Meu Drive\MESTRADO-UEMA-ANDERSON' pontoSelecionado];
listaArquivos = dir(baseDir);
numArquivos = length(listaArquivos);

arquivoMER = listaArquivos(15).name;
fprintf('Arquivo de MER selecionado: %s\n', arquivoMER);

%% =====
% ANÁLISE DE MER
%% =====
dadosMER = importlog([baseDir '\\' arquivoMER]);
dadosMER = table2array(dadosMER);

MER_H = dadosMER(3);      % MER no canal H
MER_V = dadosMER(4);      % MER no canal V

%% =====
% PARÂMETROS PARA A ANÁLISE DO PERFIL DE RETARDO
%% =====
tempo = linspace(0, 300, 2400);      % vetor de tempo (amostras)
ajusteThreshold = 30;                % ajuste adicional (offset)
corteAmostras = 50;                  % limite de busca de multipercurso

%% =====
% IMPORTAÇÃO DO PERFIL DE RETARDO (CIR)
%% =====
arquivoCIR = listaArquivos(11).name;
cirData = import_perfil([baseDir '\\' arquivoCIR]);
cirData = abs(table2array(cirData)).^2; % módulo ao quadrado

%% -----
% Função auxiliar: cálculo de retardo médio, RMS e banda de coerência
%% -----
calculaParametrosCIR = @(perfil_dB, t, L) ...
    local_calculo_parametros(perfil_dB, t, L); % função definida ao
final do código

%% =====
% PROCESSAMENTO PARA CADA ENLACE MIMO
% Ordem: V→H, V→V, H→H, H→V
%% =====

%% ----- Enlace V → H -----
cir_vh = cirData(:,2);
perfil_vh = 10*log10(cir_vh);
posPico = find(perfil_vh == 0);
perfilRecortado_vh = 10*log10(cir_vh(posPico(1):posPico(1)+2399));

```

```

[RetMed_vh, RetRMS_vh, BC90_vh, limiar_vh] = calculaParametrosCIR(per-
filRecortado_vh, tempo, ajusteThreshold);

%% ----- Enlace V → V -----
cir_vv = cirData(:,4);
perfil_vv = 10*log10(cir_vv);
posPico = find(perfil_vv == 0);
perfilRecortado_vv = 10*log10(cir_vv(posPico(1):posPico(1)+2399));

[RetMed_vv, RetRMS_vv, BC90_vv, limiar_vv] = calculaParametrosCIR(per-
filRecortado_vv, tempo, ajusteThreshold);

%% ----- Enlace H → H -----
cir_hh = cirData(:,1);
perfil_hh = 10*log10(cir_hh);
posPico = find(perfil_hh == 0);
perfilRecortado_hh = 10*log10(cir_hh(posPico(1):posPico(1)+2399));

[RetMed_hh, RetRMS_hh, BC90_hh, limiar_hh] = calculaParametrosCIR(per-
filRecortado_hh, tempo, ajusteThreshold);

%% ----- Enlace H → V -----
cir_hv = cirData(:,3);
perfil_hv = 10*log10(cir_hv);
posPico = find(perfil_hv == 0);
perfilRecortado_hv = 10*log10(cir_hv(posPico(1):posPico(1)+2399));

[RetMed_hv, RetRMS_hv, BC90_hv, limiar_hv] = calculaParametrosCIR(per-
filRecortado_hv, tempo, ajusteThreshold);

%% =====
% PLOTAGEM DO PERFIL DE RETARDO
%% =====
grafico_perfil(tempo, ...
               [perfilRecortado_vh limiar_vh'], ...
               [perfilRecortado_vv limiar_vv'], ...
               [perfilRecortado_hh limiar_hh'], ...
               [perfilRecortado_hv limiar_hv']);

%% =====
% ANÁLISE DO CONDITION NUMBER
%% =====
arquivoCN = listaArquivos(5).name;
condData = import_cnumber([baseDir '\ ' arquivoCN]);
condData = smooth(10*log10(table2array(condData)), 500);

CN_media = mean(condData);
CN_mediana = median(condData);
CN_desvio = std(condData);

freqCN = linspace(-5.834/2, 5.834/2, length(condData));
grafico_cnumber(freqCN, condData);

%% =====

```

```

% ANÁLISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (CFR)
%% =====
arquivoCFR = listaArquivos(14).name;
cfr = table2array(import_cfr([baseDir '\ ' arquivoCFR]));

cfr_vh = cfr(:,1) + 1i*cfr(:,2);
cfr_vv = cfr(:,3) + 1i*cfr(:,4);
cfr_hh = cfr(:,5) + 1i*cfr(:,6);
cfr_hv = cfr(:,7) + 1i*cfr(:,8);

cfr_vh_dB = smooth(10*log10(abs(cfr_vh)), 300);
cfr_vv_dB = smooth(10*log10(abs(cfr_vv)), 300);
cfr_hh_dB = smooth(10*log10(abs(cfr_hh)), 300);
cfr_hv_dB = smooth(10*log10(abs(cfr_hv)), 300);

matrizCFR = [cfr_hh_dB cfr_vv_dB cfr_hv_dB cfr_vh_dB];
freqCFR = linspace(-5.834/2, 5.834/2, length(cfr_hh));

grafico_cfr(freqCFR, matrizCFR);

%% =====
% ANÁLISE DA CONSTELAÇÃO
%% =====
arquivoConst = listaArquivos(9).name;
fprintf('Arquivo da constelação: %s\n', arquivoConst);

dadosConst = table2array(import_const([baseDir '\ ' arquivoConst]));

const_H = dadosConst(:,1) + 1i*dadosConst(:,2);
const_V = dadosConst(:,3) + 1i*dadosConst(:,4);

moduladorQPSK = comm.QPSKModulator;
constRef = constellation(moduladorQPSK);

grafico_const(real(const_H), imag(const_H), real(constRef), imag(constRef), real(const_V), imag(const_V));

%%
=====
% FUNÇÃO LOCAL PARA CÁLCULO DO RETARDO MÉDIO, RETARDO RMS E BANDA COERÊNCIA
%%
=====
function [RetMedio, RetRMS, BC90, limiar] = local_calculo_parametros(perfil, tempo, ajuste)

    % Cálculo do limiar (threshold) automático
    med = median(perfil);
    desvio = std(perfil);
    valorMax = max(perfil);

    limiar_dB = valorMax + med + desvio + ajuste;
    limiar = ones(1,2400) * limiar_dB;

    % Identificação dos componentes acima do limiar
    k = 1;
    num = []; den = [];

    for i = 1:50

```

```

        if perfil(i) > limiar_dB
            num(k) = perfil(i) * tempo(i);
            den(k) = perfil(i);
            k = k + 1;
        end
    end

    % Retardo Médio
    RetMedio = sum(num) / sum(den);

    % Retardo RMS
    k = 1;
    num = []; den = [];
    for i = 1:50
        if perfil(i) > limiar_dB
            num(k) = ((tempo(i) - RetMedio)^2) * perfil(i);
            den(k) = perfil(i);
            k = k + 1;
        end
    end

    RetRMS = sqrt(sum(num) / sum(den));

    % Banda de coerência 90%
    BC90 = (1 / (5 * RetRMS)) * 1000;
end

```