

# Resultados Preliminares dos Estudos do Uso de Polarização Slant em ISDB-T Avançado com NUC

Sidi Mane, Amanda Santos, Paulo Bayma Filho, Wesley Assis, Rogério Silva, Leonardo Gonsioroski

**Resumo**— Este trabalho avalia o desempenho do ISDB-T Avançado com constelações não-uniformes (NUC) e polarização *slant* ( $\pm 45^\circ$ ) em ambientes urbanos, visando atender aos requisitos da TV 3.0. Utilizando 16QAM com LDPC de baixa taxa (2/16), os testes mostraram que o uso de NUC reduziu os limiares de recepção em até 120% em relação à constelação uniforme, com ganhos médios de 2 a 4 dB. A comparação entre polarizações H/V e *slant* indicou desempenho equivalente. Os resultados confirmam a viabilidade técnica dessas soluções, especialmente quando o objetivo for trabalhar com baixos valores de relação C/N.

**Palavras-Chave**— *Constelações Não Uniformes (NUC), Polarização Slant, ISDB-T Avançado.*

**Abstract**— This study evaluates the performance of Advanced ISDB-T using non-uniform constellations (NUC) and slant polarization ( $\pm 45^\circ$ ) in urban environments, aiming to meet the requirements of TV 3.0. Employing 16QAM modulation with low-rate LDPC coding (2/16), the tests showed that the use of NUC reduced reception thresholds by up to 120% compared to uniform constellations, with average gains ranging from 2 to 4 dB. The comparison between H/V and slant polarizations indicated equivalent performance. The results confirm the technical feasibility of these solutions, particularly when the goal is to operate under low signal-to-noise ratio (C/N) conditions.

**Keywords**— Non-Uniform Constellations (NUC), Slant Polarization, Advanced ISDB-T

## I. INTRODUÇÃO

A televisão digital terrestre brasileira teve seus primeiros passos no ano de 2007 adotando o padrão japonês ISDB-T. Esse padrão foi customizado para aplicação no Brasil, passando a se chamar ISDB-Tb (TV 2.0) e trazendo sinal de alta definição, áudio multicanal e recepção móvel [1].

Desde então, o cenário tecnológico evoluiu muito, motivando o Fórum SBTVD a lançar os projetos TV 2.5 e TV 3.0 para estender a vida útil do sistema atual e estudar a próxima geração. Em particular, o Projeto TV 3.0 buscou inovar na camada física para permitir novos serviços, incluindo segmentação geográfica de conteúdo, isto é, emitir sinais diferentes em áreas adjacentes usando a mesma frequência. Para viabilizar isso, uma das estratégias consideradas foi o reuso-1, em que todas as células usam o mesmo canal de RF. Esse modo de operação exige que o sistema seja capaz de receber e demodular o sinal sem erros com relações sinal/ruído (C/N) muito baixas, próximas a 0 dB, especialmente no limite das células, para evitar interferências mútuas. Para reduzir o requisito de C/N e manter enlaces robustos em reuso-1, adotam-se técnicas avançadas.

O sistema ISDB-T Avançado permite modulações de QPSK até 4096-QAM e já incorpora Constelações Não-Uniformes (NUC) para melhorar a robustez [2].

Na prática, usar NUC adequadamente projetadas pode aproximar a eficiência espectral do limite de Shannon, proporcionando ganho em sistemas BICM (*Bit-Interleaved Coded Modulation*). Além disso, a divisão de sinal em dois feixes polarizados em  $\pm 45^\circ$  (polarização *slant*) juntamente com arquitetura MIMO  $2 \times 2$  oferece ganho espacial. Estudos internacionais mostraram que sistemas MIMO  $2 \times 2$  com polarização horizontal/vertical ou  $\pm 45^\circ$  podem dobrar a capacidade de transmissão [2].

Em resumo, a aplicação de NUC com polarização *slant* pode reduzir significativamente os limiares de recepção e aumentar a robustez do sinal transmitido, em especial se for utilizado modulações de baixa ordem e códigos de erro de baixas taxas. Este trabalho amplia os estudos experimentais já realizados no Brasil que avaliaram o sistema ISDB-T Avançado usando diversas combinações de modulações e codificações (MODCOD) conservadoras para o uso de polarização dual MIMO  $2 \times 2$  vertical e horizontal [3], [4].

Neste estudo foi realizada a transmissão MIMO  $2 \times 2$  nas polarizações  $\pm 45^\circ$  com a combinação de modulação 16QAM e taxa de código 2/16, para analisar a operação do sistema ISDB-T Avançado com a menor relação C/N possível, preferencialmente menor ou igual a zero para a viabilização de segmentação geográfica de conteúdo com uso da técnica de reuso-1. Os testes de campo em múltiplos pontos de recepção na região do Rio de Janeiro investigam o limiar de relação C/N e o limiar de recepção com o uso de polarização MIMO  $2 \times 2$  dual  $\pm 45^\circ$  e NUC.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos estudos vêm sendo realizados para explorar e otimizar Constelações Não Uniformes (NUC) em aplicações de radiodifusão digital. Mouhouche et al. [5] analisaram NUCs de alta ordem (até 4096-QAM) para transmissões *over-the-air* de altíssima taxa, como UHDTV, observando ganhos superiores a 1 dB em modulações acima de 256-QAM e até 2 dB em 4K-QAM em relação às constelações uniformes. Muela [6] investigou o impacto das NUCs em sistemas BICM-ID com diferentes esquemas de FEC, verificando melhorias adicionais de até 0,2 dB. No padrão ATSC 3.0, Hong et al. [7] propuseram algoritmos de desmapeamento com baixa complexidade para NUCs bidimensionais (2D-NUC), voltados a códigos de baixa/média taxa, mantendo compatibilidade com sistemas legados.

Embora esses avanços estejam concentrados em modulações de alta ordem, são ainda limitados os estudos que abordam o uso de NUC com modulações de baixa ordem em condições reais de

Sidi Mane, Amanda Santos, Paulo Bayma Filho, Wesley Assis, Rogério Silva, Leonardo Gonsioroski, Departamento de Engenharia da Computação, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís-MA, e-mail: gonsioroski@uema.br

propagação. Asakura et al. [8] avaliaram o ISDB-T Avançado com 16QAM e NUC, mas com FEC de alta taxa (7/16) e recepção em apenas quatro locais, sendo dois locais com recepção indoor e dois outros pontos de medição em linha de visada.

Este trabalho propõe uma abordagem complementar, aplicando 16QAM com FEC de baixa taxa (2/16) em ambientes urbanos adversos, possibilitando uma análise mais completa dos ganhos de desempenho do NUC em cenários práticos.

Simultaneamente, a aplicação de MIMO  $2 \times 2$  com polarização  $+45^\circ/-45^\circ$  tem ganhado destaque como solução eficaz para aumentar a robustez e a eficiência espectral em sistemas de TV digital terrestre. Shitomi et al. [9] realizaram testes com o ISDB-T Avançado usando polarizações ortogonais ( $+45^\circ/-45^\circ$ ), demonstrando que essa configuração pode melhorar em mais de 7 dB o desempenho do sistema ou dobrar a taxa de transmissão com impacto mínimo. Estudos da BBC com DVB-T2 e DVB-NGH também confirmaram os ganhos obtidos com MIMO polarizado em ambientes urbanos densos [10].

Esses trabalhos reforçam a importância de avaliar conjuntamente o uso de NUC e polarização *slant* como tecnologias complementares para atender aos requisitos da TV 3.0 no Brasil, em especial considerando os ambientes de propagação típicos do país, sendo para isso necessário realizar medições de campo em pontos com diferentes características urbanas.

### III. CONSTELAÇÕES NÃO-UNIFORMES (NUC) NA RADIODIFUSÃO

Uma constelação não-uniforme é um mapeamento de bits em símbolos (por exemplo QAM) cujos pontos não estão uniformemente espaçados, ao contrário dos QAM tradicionais. Essa geometria diferenciada visa concentrar pontos em regiões de alta probabilidade, melhorando o desempenho do sistema. Em radiodifusão, as NUCs foram introduzidas para cobrir a lacuna remanescente entre a capacidade efetiva do canal e o limite teórico de Shannon [6]. Os principais sistemas de radiodifusão de próxima geração adotam NUC. Nos padrões DVB-NGH e ATSC 3.0, NUCs foram adotadas como parte da camada física para melhorar o desempenho em canais ruidosos e permitir operação em níveis mais baixos de C/N, especialmente quando combinadas com codificação BICM e modulações de alta ordem [11].

Especificamente, o padrão ISDB-T Avançado admite NUC em todas as modulações para melhorar o limiar de recepção, combinando com codificadores de erro. A codificação típica é o esquema BICM, onde cada camada de serviço passa por um codificador externo BCH e um interno LDPC, depois por entrelaçamento de bits e mapeamento em QAM [12]. O uso de códigos LDPC de comprimento longo torna possível operar com taxa de código muito baixa e, conseqüentemente, exigir até 10 dB a menos de C/N que o sistema atual, conforme demonstrado em estudos de ISDB-T avançado [9]. Assim, NUC atua em conjunto com os codificadores para manter baixas taxas de erro em canais ruidosos. Além disso, demapeadores adaptados e estratégias de rotação de constelação têm sido pesquisados para simplificar a recepção de NUC e extrair ganhos adicionais, sobretudo em modulações de baixa ordem, conforme estudos teóricos recentes [11].

### IV. POLARIZAÇÃO *SLANT* E MIMO EM TV DIGITAL

A polarização *slant* refere-se à orientação linear da antena transmitindo sinais inclinados em  $+45^\circ$  ou  $-45^\circ$  em relação ao horizonte. Em sistemas de TV, isso cria dois canais ortogonais ( $\pm 45^\circ$ ) que podem ser vistos como camadas distintas. Quando se utilizam simultaneamente duas antenas transmitindo em polarização cruzada (*slant*), forma-se uma configuração MIMO polarizada  $2 \times 2$ . Nessa arquitetura, cada antena transmite um fluxo diferente; em recepção, o receptor MIMO combina os dois sinais para aumentar capacidade ou diversidade.

Experimentos de campo com transmissões VHF/UHF conduzidos pela BBC e pela NHK introduziram antenas cruzadas (horizontal e vertical, ou  $\pm 45^\circ$ ) e comprovaram que o uso de MIMO espacial permitia dobrar a capacidade de transmissão ou melhorar em vários dB a robustez da recepção [9], [13]. O padrão DVB-NGH foi o primeiro a incorporar oficialmente MIMO  $2 \times 2$  na especificação de TV terrestre digital, com ênfase em aplicações móveis [14]. Posteriormente, o ATSC 3.0 também passou a incluir suporte para MIMO com polarização cruzada, visando ambientes urbanos com alto índice de multipercurso [15]. No contexto do ISDB-T Avançado, também são previstas configurações de MIMO  $2 \times 2$  com polarização *slant*, incluindo testes experimentais em campo que demonstraram a viabilidade da técnica para cenários fixos e móveis [8]. Na prática, a polarização *slant* pode ser empregada tanto como diversidade espacial, aumentando a robustez contra desvanecimento seletivo, quanto para multiplexação espacial, elevando significativamente o *throughput* do sistema sem exigir espectro adicional [8].

### V. TESTES DE CAMPO

Para realizar a investigação das melhorias oferecidas pelo uso de NUC ao desempenho do sistema ISDB-T Avançado em modulações de baixa ordem, configuramos os parâmetros de transmissão para trabalhar com 16QAM e taxa de código de 2/16. Nessa configuração o sistema operava com taxa de transmissão de 4.85 Mbps. Nessa configuração fizemos três campanhas de medição. A primeira utilizando MIMO  $2 \times 2$  com polarização H/V e Constelação Uniforme (UC), a segunda utilizando MIMO  $2 \times 2$  com polarização  $+45^\circ/-45^\circ$  e Constelação Uniforme (UC) e a terceira com MIMO  $2 \times 2$  com polarização  $+45^\circ/-45^\circ$  e Constelação Não Uniforme de duas dimensões (2D-NUC). As demais configurações de transmissão do sistema ISDB-T Avançado podem ser vistas na Tabela I.

#### A. Ambiente de Medições

As medições foram conduzidas na cidade do Rio de Janeiro, abrangendo 12 pontos distintos com diferentes características de urbanização, com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema sob variadas condições de propagação. A Figura 1 apresenta a localização geográfica de cada ponto de medição.

É importante destacar que este estudo dá continuidade a investigações anteriores já publicadas em [3], [4]. Por essa razão, a numeração dos pontos de medição não segue uma ordem sequencial de 1 a 12. Optou-se por manter a identificação utilizada nos trabalhos anteriores, tanto para garantir a consistência metodológica quanto para permitir a comparação direta entre os resultados obtidos nas diferentes fases experimentais. Além disso, neste experimento utilizou-se um subconjunto dos pontos previamente avaliados, o que reforça a

necessidade de manter a numeração original adotada nos estudos de referência.

**B. Setup de Transmissão**

O transmissor ISDB-T Avançado foi instalado na estação do Sumaré, na cidade de Rio de Janeiro. A antena transmissora MIMO dual polarizada com +45°/-45° foi instalada com a uma altura de 80 metros, correspondente aos 800 metros acima do nível do mar. As perdas totais no cabo e nos conectores são aproximadamente de 3.8 dB. Os equipamentos utilizados na transmissão foram um multiplexador Eiden, um excitador da NEC, um modulador ISDB-T, dois controladores de TX e 2 amplificadores de alta potência NEC modelo DLP-240/200w.

**C. Setup de Recepção**

Os equipamentos para a recepção foram instalados em um laboratório móvel de telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. A antena receptora MIMO dual polarizada com +45°/-45° foi colocada a 10 metros de altura. Dentro do laboratório móvel foram instalados um analisador de sinais ANRITSU usado na função de analisador de espectro, um gerador de sinais Dektec modelo DTU-315 com software StreamXpress, um capturar e analisador de RF Eiden, modelo 4422A, um demodulador ISDB-T Avançado, um analisador de BER, dois minicircuitos de casamento de impedância 50Ω/75Ω, dois filtros passa-banda, uma antena GPS e dois laptops.

Para a medição do limiar de relação C/N e do limiar de recepção do sistema ISDB-T foram utilizados atenuadores variáveis divisores e combinadores de sinal montados de forma estratégica numa bancada dentro do laboratório móvel que foi denominada de Caixa de RF. A Caixa de RF ainda possuía LNA para compensar as perdas de sinal nos cabos, conectores e outros componentes. A caixa de RF utilizada entra a antena e o demodulador foi devidamente caracterizada apresentando um ganho de potência de 9.5 dB em cada um dos ramos de recepção (horizontal e vertical). A estrutura da Caixa de RF está mostrada na Figura 2.

**D. Metodologia das Medições**

Para que o sistema de TV Digital opere com reuso-1 o sistema de que ser capaz de trabalhar com baixos valores de C/N. Assim um dos objetivos deste trabalho é a verificação do menor valor de relação C/N que o sistema é capaz de operar (Limiar C/N) e comparar esse resultado utilizando dois tipos diferentes de polarização dual (H/V e +45°/-45°) e utilizando modulação com constelações uniformes e não uniformes (UC e NUC). Adicionalmente são registrados os valores e Potência de Recepção e de Limiar de Recepção (sensibilidade do Receptor).

Para a medição da potência do sinal recebido os atenuadores foram desligados assim como o gerador de ruído, dessa forma a Caixa de RF deixava passar apenas o sinal recebido pela antena MIMO dual polarizada em +45°/-45°. Em cada ponto de medição o analisador de espectro foi configurado para operar em função *Channel Power* de forma a registrar a intensidade do sinal nas polarizações horizontal e vertical separadamente, conforme mostra a Figura 2.

Para a medição do Limiar C/N, o gerador de sinais Dektec foi ligado fornecendo um sinal OFDM de 8 MHz de largura de banda, para simular um sinal interferente (ruído) no sinal

recebido. A potência do ruído era então atenuada pelos atenuadores variáveis até que a taxa de erro de pacotes menor fosse que 10<sup>-4</sup>. Essa condição foi definida pelo Fórum do Sistema Brasileiro de TV Digital terrestre (SBTVD) como critério de Quase Livre de Erros (QEF). Para garantia estatística de que o resultado medido estava correto, a medição era realizada durante o intervalo de 2 minutos, atendendo a norma BT.2035-2 (2008), da ITU-R. A relação C/N encontrada nesta condição era registrada como Limiar C/N, ou seja, menor valor de relação C/N possível de forma a garantir a operação do sistema sem erros de recepção.

Para a medição do limiar de recepção, o gerador de sinais era novamente desligado e os atenuadores presentes no ramo do sinal recebido eram então ligados e suas atenuações eram aumentadas até que o sistema apresentasse taxa de erro de pacotes superior a 10<sup>-4</sup>. Uma vez encontrado essa condição, atenuação era levemente reduzida até o sistema operar sem erros durante o intervalo de 2 (dois) minutos. Nesse momento registrava-se o limiar de recepção do sistema.

TABELA I. PARÂMETROS DE TRANSMISSÃO.

Largura de Banda	6 MHz	
Largura de Banda Ocupada	5.83 MHz (normal mode)	
Padrão de Transmissão	MIMO 2x2	
Código Corretor de Erro	LDPC + BCH (long code, code length 69120)	
Modulação e Taxa de Código	16QAM	2/16
Tipo de Constelação	UC e NUC	
Tamanho da FFT	16K (16384)	
Intervalo de Guarda	800/16384 (126.56 μs)	
Padrão Portadora Piloto	Dx = 6 and Dy=2	
Time Interleave :	I=3	
Camada e Número de Segmentos	Layer A, 35 segments	



Fig. 1. Pontos de medições dos sinais transmitidos.

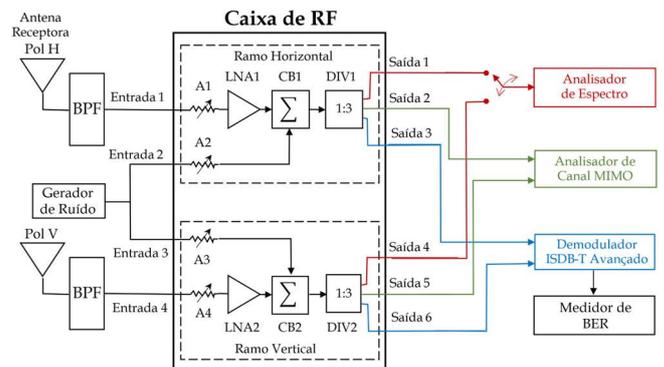


Fig. 2. Estrutura de Recepção e Caixa de RF

VI. RESULTADOS

Durante as campanhas de medição, foram registrados os valores de potência recebida, limiares de relação C/N (Limiar C/N) e limiar de recepção do sistema em cada ponto de medição para as modulações 16QAM-UC (em polarizações H/V e +45°/-45°) e 16QAM-NUC (em polarização +45°/-45°). Os resultados estão apresentados nas Tabelas II e III.

A Figura 3 resume graficamente o valor de potência recebida em cada ponto de medição na polarização *slant*. Conforme pode-se observar os valores de potência recebida do sinal com 16QAM-UC e 16QAM-NUC foram muito próximos, o que estabelece que mesmo tendo sido medidos em dias diferentes a condição do canal de propagação em cada ponto foi muito semelhante nas duas campanhas de medição, não interferindo, portanto, nos resultados de Limiar C/N. Em relação as polarizações +45° e -45° observou-se que apenas em 10% dos casos o sinal com polarização +45° chega no receptor com potência maior que o sinal com polarização -45°.

A Figura 4 apresenta os valores de limiar de recepção da relação C/N obtidos separadamente para as polarizações +45° e -45°, bem como os valores combinados no modo MIMO 2x2. A análise dos resultados revela que, em diversos pontos de medição, o desempenho do sistema ISDB-T Avançado utilizando constelação não-uniforme (NUC) foi significativamente superior ao obtido com constelação uniforme (UC). A Figura 5 complementa essa análise ao apresentar a diferença percentual entre os limiares de C/N em MIMO obtidos com NUC e UC. Já a Figura 6 consolida os valores absolutos dos limiares de recepção medidos em campo para cada configuração.

Os dados confirmam de forma consistente que o uso de NUC proporcionou ganhos significativos, permitindo ao sistema ISDB-T Avançado alcançar operações mais estáveis e resilientes em condições de propagação adversas.

TABELA II. RESULTADOS DE COMPARAÇÃO UC E NUC EM POLARIZAÇÃO SLANT

Ponto	Pol	16QAM - UC			Limiar C/N MIMO (dB)	16QAM - NUC			Limiar C/N MIMO (dB)
		Potência Recebida (dBm)	Limiar de Recepção (dBm)	Limiar C/N por Pol (dB)		Potência Recebida (dBm)	Limiar de Recepção (dBm)	Limiar C/N por Pol (dB)	
3	+45°	-83.42	-91.13	1.56	1.35	-83.96	-91.22	1.04	1.14
	-45°	-83.31	-91.17	1.16		-83.43	-91.19	1.23	
4	+45°	-84.43	-90.9	1.87	2.45	-83.71	-92.47	-0.19	0.64
	-45°	-83.54	-90.84	2.99		-81.55	-92.23	1.23	
7	+45°	-84.67	-88.51	5.65	6.28	-86.43	-90.44	3.64	4.93
	-45°	-83.46	-87.31	6.83		-84.05	-89.39	5.9	
8	+45°	-72.72	-91.04	3.57	4.17	-72.33	-91.12	1.51	2.69
	-45°	-71.9	-90.93	4.74		-69.94	-90.86	3.56	
11	+45°	-77.77	-90.66	4.32	3.56	-81.31	-91.2	-0.04	0.53
	-45°	-79.18	-91.17	2.68		-79.56	-91.05	0.96	
12	+45°	-62.85	-90.99	1.15	1.31	-65.72	-91.2	-0.77	1.91
	-45°	-63.18	-91.03	1.48		-61.47	-90.94	3.6	
16	+45°	-65.89	-91.06	0.51	1.86	-66.68	-91.24	-0.29	1.85
	-45°	-64.38	-91.02	3.15		-63.3	-90.97	3.36	
18	+45°	-82.28	-91.07	5.56	3.77	-82.88	-90.97	2.88	3.24
	-45°	-84.25	-91.17	1.91		-82.16	-90.96	3.58	
19	+45°	-68.62	-91.15	1.35	2.28	-70.84	-91.25	-0.52	2.02
	-45°	-66.92	-91.11	3.04		-66.84	-91.04	3.67	
21	+45°	-79.44	-90.99	3.23	2.37	-83.46	-91.14	0.95	1.79
	-45°	-80.14	-91.04	1.54		-81.81	-91.06	2.48	
22	+45°	-69.54	-90.98	2.22	2.90	-71.36	-91.27	0.39	2.15
	-45°	-68.29	-90.05	3.5		-68.47	-91.03	3.44	
24	+45°	-66	-91.11	3.96	3.45	-71.03	-91.24	0.18	1.35
	-45°	-65.38	-90.98	3.05		-68.76	-91.04	2.22	

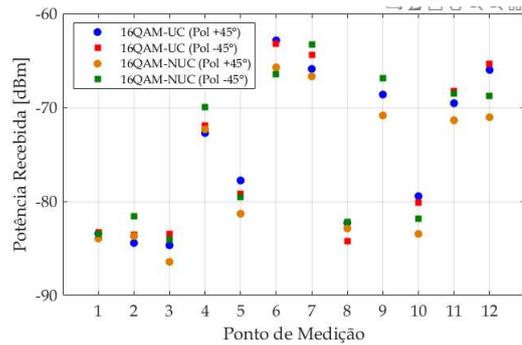


Fig. 3. Potência recebida nas polarizações +45°/-45° das modulações 16QAM-NUC e 16QAM-UC.

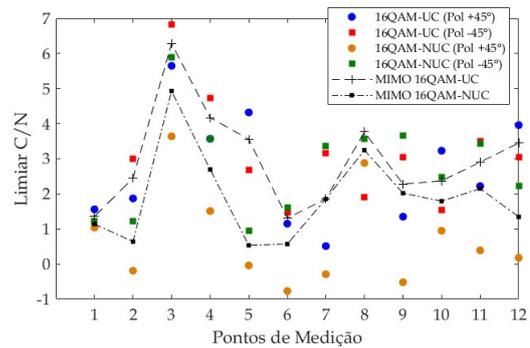


Fig. 4. Limiar C/N registrado nas polarizações +45°/-45° e MIMO das modulações 16QAM-NUC e 16QAM-UC.

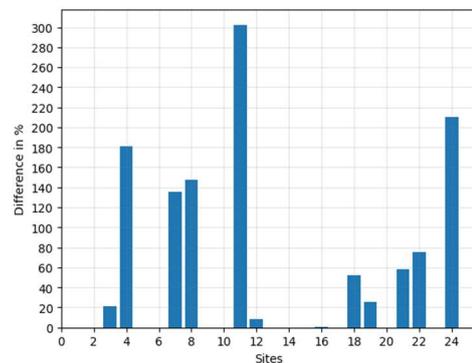


Fig. 5. Diferenças do limiar da relação C/N MIMO da modulação NUC em relação a UC.

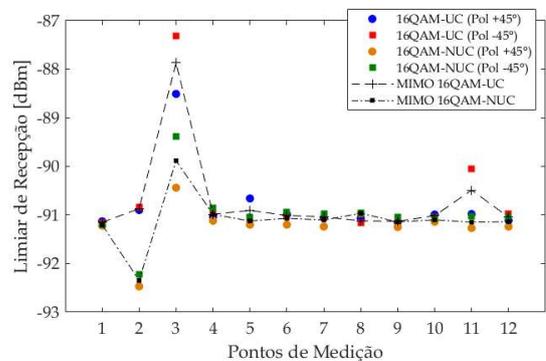


Fig. 6. Limiar de Recepção registrado nas polarizações +45°/-45° e MIMO das modulações 16QAM-NUC e 16QAM-UC.

TABELA III. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM POLARIZAÇÃO DUAL MIMO H/V E +45°/-45°

Ponto	Polarização H/V									Polarização +45°/-45°									Menor valor de Limiar C/N
	Potência Recebida (dBm)			Limiar de Recepção (dBm)			Limiar C/N (dB)			Potência Recebida (dBm)			Limiar de Recepção (dBm)			Limiar C/N (dB)			
	H	V	MIMO	H	V	MIMO	H	V	MIMO	+45°	-45°	MIMO	+45°	-45°	MIMO	+45°	-45°	MIMO	
3	-89.22	-87.94	-88.53	-91.01	-90.42	-90.70	1.36	2.35	1.90	-83.42	-83.31	-83.36	-91.13	-91.17	-91.15	1.56	1.16	1.35	+45°/-45° Pol
4	-82.99	-82.98	-82.98	-91.13	-91.09	-91.11	2.47	0.74	1.52	-84.43	-83.54	-83.96	-90.90	-90.84	-90.87	1.87	2.99	2.45	H/V Pol
7	-88.79	-86.89	-87.74	-91.12	-90.88	-91.00	0.47	1.85	1.26	-84.67	-83.46	-84.02	-88.51	-87.31	-87.87	5.65	6.83	6.28	H/V Pol
8	-84.66	-79.45	-81.32	-91.16	-90.77	-90.96	-0.70	3.52	2.12	-72.72	-71.90	-72.29	-91.04	-90.93	-90.98	3.57	4.74	4.17	H/V Pol
11	-87.61	-83.84	-85.33	-91.18	-89.68	-90.37	1.07	3.96	2.52	-77.77	-79.18	-78.42	-90.66	-91.17	-90.91	4.32	2.68	3.56	H/V Pol
12	-78.05	-81.32	-79.38	-90.57	-90.84	-90.70	7.54	2.68	5.34	-62.85	-63.18	-63.01	-90.99	-91.03	-91.01	1.15	1.48	1.31	+45°/-45° Pol
16	-61.33	-61.25	-61.29	-90.98	-90.73	-90.85	3.76	3.23	3.48	-65.89	-64.38	-65.07	-91.06	-91.02	-91.04	0.51	3.15	1.86	+45°/-45° Pol
18	-64.89	-63.77	-64.29	-91.03	-90.82	-90.92	3.86	2.81	3.24	-82.28	-84.25	-83.15	-91.07	-91.17	-91.12	5.56	1.91	3.77	H/V Pol
19	-78.10	-82.33	-79.72	-90.50	-90.97	-90.73	8.20	3.53	6.36	-68.62	-66.92	-67.69	-91.15	-91.11	-91.13	1.35	3.04	2.28	+45°/-45° Pol
21	-65.09	-65.70	-65.38	-90.91	-90.97	-90.94	4.49	3.00	3.73	-79.44	-80.14	-79.78	-90.99	-91.04	-91.01	3.23	1.54	2.37	+45°/-45° Pol
22	-78.59	-76.66	-77.52	-90.95	-90.85	-90.90	1.31	2.39	1.94	-69.54	-68.29	-68.87	-90.98	-90.05	-90.49	2.22	3.50	2.90	H/V Pol
24	-70.82	-68.80	-69.69	-90.74	-90.77	-90.75	2.97	3.95	3.55	-66.00	-65.38	-65.68	-91.11	-90.98	-91.04	3.96	3.05	3.45	+45°/-45° Pol

A Tabela III apresenta uma comparação entre os resultados obtidos com polarização dual horizontal/vertical (H/V) e polarização inclinada +45°/-45° (*slant*). Observa-se que, em aproximadamente 50% dos casos, o limiar de recepção C/N foi ligeiramente inferior na configuração H/V em comparação à polarização *slant*. Isso indica que, sob as condições experimentais avaliadas, não foi possível identificar uma superioridade consistente de desempenho entre os dois tipos de polarização, sugerindo que ambos oferecem comportamentos similares em termos de robustez de recepção nos cenários testados.

### VII. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo investigar, de forma experimental, os benefícios da utilização de constelações não-uniformes (NUC) e da polarização dual *slant* (+45°/-45°) no desempenho do sistema ISDB-T Avançado, especialmente em ambientes urbanos com características típicas do Brasil. Os testes utilizaram modulação 16QAM com códigos LDPC de baixa taxa (2/16), a fim de explorar o limite inferior de C/N operacional, alinhando-se ao perfil de recepção exigido para a TV 3.0.

Os resultados obtidos demonstraram que, de maneira consistente, o uso de NUC proporciona uma redução significativa nos limiares de recepção. Em determinados pontos de medição, o sistema foi capaz de operar com até 120% de redução no limiar de C/N, como evidenciado no Ponto 4, em que a recepção foi possível com C/N negativo (-0.2 dB), um cenário impraticável com constelação uniforme (UC). Em média, observou-se uma melhoria de 2 a 4 dB no desempenho do enlace com NUC.

Quanto à análise da polarização, a comparação entre os esquemas horizontal/vertical (H/V) e *slant* (+45°/-45°) indicou desempenhos semelhantes. Nenhum dos arranjos apresentou superioridade consistente nos limiares medidos, sugerindo viabilidade técnica de ambos conforme o planejamento da rede.

Embora os resultados obtidos sejam promissores, recomenda-se a realização de novos testes, com um número ampliado de pontos de medição e em cenários diversos, para consolidar as conclusões e avaliar o impacto dessas técnicas em grande escala.

### REFERÊNCIAS

- [1] SBTVD Forum – Project: Summary of Call for Proposals – TV 3.0, 2020.
- [2] D. Shitomi et al., “Performance evaluation of MIMO broadcast systems for advanced digital terrestrial TV,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2021, Art. 89, 2021.
- [3] L. H. Gonsioroski et al., “Advanced ISDB-T—Next Generation Digital TV System: Performance in Field Tests in Brazil,” in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 69, no. 2, pp. 538-551, June 2023,
- [4] L. H. Gonsioroski, et al., “Evaluation of the Field-Test Results of Advanced ISDB-T System With Low-Rate LDPC Codes,” in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 69, no. 3, pp. 675-690, Sept. 2023.
- [5] B. Mouhouche, D. Anzorregui and A. Mourad, “High Order Non-Uniform Constellations for UHD TV Broadcasting,” in *Proc. IEEE WCNC, Istanbul, Turkey, 2014*, pp. 6952116.
- [6] M. F. Muela, “Non-Uniform Constellations for Next-Generation Digital Terrestrial Broadcast Systems,” Ph.D. dissertation, Univ. Politècnica de València, Spain, 2017.
- [7] H. Hong, Y. Xu, Y. Wu, D. He, N. Gao, and W. Zhang, “Backward Compatible Low-Complexity Demapping Algorithms for Two-Dimensional Non-Uniform Constellations in ATSC 3.0,” *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 67, no. 1, pp. 46–55, Mar. 2021.
- [8] S. Asakura, H. Nagata, R. Kabutomori, M. Onishi, K. Kambara, K. Otsuki, and K. Tsuchida, “End-to-End Verification of the Advanced Broadcasting System,” *ITE Trans. Media Technol. Appl.*, vol. 11, no. 3, pp. 113–122, Jul. 2023.
- [9] D. Shitomi, H. Nagata, M. Onishi, R. Kabutomori, and T. Mori, “Performance Evaluation of MIMO Broadcast Systems for Advanced Digital Terrestrial TV,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2021, no. 1, pp. 1–14, 2021.
- [10] P. Thompson and D. Gomez-Barquero, “MIMO Broadcasting in the UHF Band Using DVB-NHG,” *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 59, no. 1, pp. 91–100, Mar. 2013.
- [11] H. Hong, Y. Xu, Y. Wu, D. He, N. Gao, and W. Zhang, “Backward Compatible Low-Complexity Demapping Algorithms for Two-Dimensional Non-Uniform Constellations in ATSC 3.0,” *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 67, no. 1, pp. 46–55, Mar. 2021.
- [12] D. Gómez-Barquero, J. J. Gimenez, J. Cardona, and N. Garcia, “Bit-Interleaved Coded Modulation (BICM) for ATSC 3.0,” *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 181–188, Mar. 2016.
- [13] P. Thompson and D. Gómez-Barquero, “MIMO Broadcasting in the UHF Band Using DVB-NHG,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 59, no. 1, pp. 91–100, Mar. 2013.
- [14] J. L. Gómez, D. Vargas, and D. Gómez-Barquero, “DVB-NHG: The Next Generation of Mobile TV Broadcasting,” in *Proc. IEEE BMSB, Nara, Japan, 2012*, pp. 1–5.
- [15] H. Nguyen, J. Kim, and J. Lee, “A Study on MIMO Application for ATSC 3.0 Physical Layer,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 64, no. 2, pp. 372–380, Jun. 2018.