

# Impact Analysis of the Digital Radio Transmission Using the DRM+ Standard: A Case Study

A. V. Silva, Z. M. A. Peixoto, *Member, IEEE*, and F. M. F. Ferreira, *Member, IEEE*

**Abstract**—Considering the perspective of the digitalization of radio transmission in Brazil, this work aims at the evaluation of the coverage areas of the analog and digital signals, with emphasis on the DRM+ standard. After presenting the fundamental concepts of the DRM+ standard, comparative analyses are carried out looking for solutions for the maintenance of the current coverage areas as well as the coexistence of analog and digital transmission modes. In this sense, this paper presents a case study based on the Radio UFMG FM - 104.5 MHz, located in Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, under three different scenarios which consist of hybrid mode, combined radiant system and extended FM. Considering the limitations identified in the hybrid and combined radiant system scenarios and with a glance at the future deployment of the extended FM, this work presents studies on the feasibility of DRM+ transmission simultaneously to the analog transmission, using the maximum available power and suitable frequency separation to eliminate mutual interference. In addition to the technical subsidies presented for decision making on digital radio, this work proved the possibility of joint digital and analog radio transmissions with satisfactory quality of reception and the provision of interactive services of the DRM+ standard, among others.

**Index Terms**—Digital Modulation, Digital Radio, DRM+, FM, Telecommunications, Wireless Communication.

## I. INTRODUÇÃO

ESTE trabalho trata do processo de digitalização do Rádio Brasileiro com destaque para os aspectos técnicos do padrão DRM+ (*Digital Radio Mondiale*). Serão realizadas simulações de três cenários da área de cobertura do sinal da Rádio UFMG Educativa (UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais), Classe A1 e Potência de Transmissão 2.5 kW. No primeiro cenário é avaliada a área de cobertura do sinal analógico operando com potência igual a 1.5 kW. No segundo cenário, considera-se a área de cobertura do sinal digital operando em 0.07 kW e, no terceiro cenário, é avaliado o alcance do sinal digital para a operação em 2.5 kW, potência total disponível na Classe A1, com a portadora alocada no modo FM Estendido (FM - Frequência Modulada) [1-3]. Os resultados das simulações são comparados com os resultados apresentados em [4], [5].

A. V. Silva, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil (e-mail: vittor2163@gmail.com)

Z. M. A. Peixoto, PPGEE, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil (e-mail: assiszm@pucminas.br)

F. M. F. Ferreira, PPGEE, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, (e-mail: flaviomagfreitas@gmail.com)

Atualmente, encontram-se disponíveis 04 tipos de padrões de transmissão para o rádio digital: DRM+ (*Digital Radio Mondiale*), HD Radio (*High Definition Radio*), DAB (*Digital Audio Broadcasting*) e ISDB-TSB (*Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial Segmented Band*) [5].

Por determinação do Ministério das Comunicações do Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) realizou testes na Rádio UFMG Educativa em 104.5 MHz, utilizando o padrão europeu DRM+ visando mensurar a área de cobertura móvel e estática [5], [6].

Um dos fatores que dificulta a implantação da modulação digital no rádio seja em FM ou AM (AM - Amplitude Modulada), deve-se à redução de 30% da área de abrangência do sinal ao se inserir a modulação digital [4], [5]. Para que essa redução seja efetivamente mensurada, simulações em laboratórios e trabalhos em campo tornam-se necessários de forma a identificar qual padrão de rádio digital causará a menor redução da área de abrangência [7].

O sistema de rádio digital DRM+ utiliza a modulação do tipo M-QAM (*M-ary Quadrature Amplitude Modulation*), onde o valor de  $M$  representa o número de combinações de amplitude e deslocamentos de fase aplicados à portadora, que pode assumir os valores 4 ou 16, visando atingir uma alta eficiência espectral na largura de faixa de transmissão disponível [8].

Por meio de simulações realizadas utilizando-se o software Projeto de Instalação de Radiodifusão<sup>®</sup> [8], [9]. Este trabalho apresenta uma solução técnica para a manutenção da área de cobertura de uma emissora de rádio após a conversão para o padrão DRM+, verificando suas áreas de cobertura móvel e estática. Nesse contexto, deverá abordar o processo de modulação e demodulação, as funções matemáticas envolvidas e a parametrização de seus componentes de forma a maximizar o modo de operação da técnica de modulação M-QAM, utilizada pelo padrão DRM+.

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

A Seção II apresenta os conceitos fundamentais das modulações digitais com ênfase na modulação M-QAM, o sistema DRM+ e, posteriormente, a interligação da modulação digital e as probabilidades de erro de símbolo e bit. A Seção III apresenta um estudo de caso com base na Rádio UFMG Educativa, em ambiente de simulação, para validar a solução técnica proposta neste trabalho, ou seja, a viabilidade de manutenção da área de cobertura da emissora após a implantação do sinal digital. Nessa seção, são realizadas análises comparativas com os resultados mostrados em [4], [5]. Finalmente, são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho trata da modulação digital, mais especificamente, da modulação M-QAM [10]. Nas modulações digitais, tais como a ASK (*Amplitude Shift Keying*), PSK (*Phase Shift Keying*) e FSK (*Frequency Shift Keying*), respectivamente, a amplitude, a fase ou a frequência de uma portadora senoidal variam de acordo com a sequência moduladora discreta. Diferentemente, na técnica M-QAM a amplitude e a fase variam e a frequência permanece constante. Esse tipo de modulação é conhecido pelas suas altas taxas de transmissão e suas constelações retangulares ou circulares.

A. Modulação M-QAM

A Fig. 1 ilustra a distribuição dos pontos da constelação da modulação 16-QAM. A modulação M-QAM possui uma constelação de  $M$  pontos e suas coordenadas são definidas como:  $S_i = [S_{i1}, S_{i2}]^T$  associadas a grupos de  $k$  bits, em que  $M = 2^k$ . A constelação será quadrada se  $M$  for um quadrado perfeito como 4, 16 ou 64 [11].

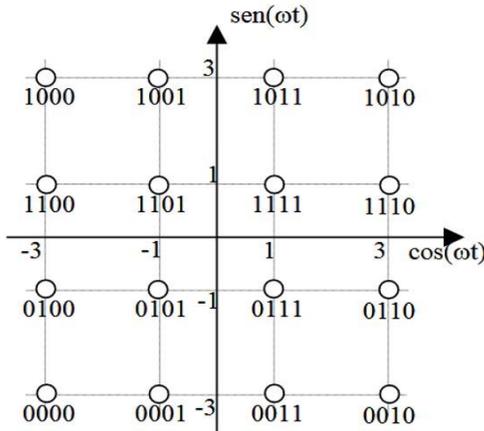


Fig. 1. Constelação retangular 16-QAM mapeada com código Gray [11].

De um símbolo para seu adjacente tem-se a mudança de apenas um bit, favorecendo a decodificação do sinal no receptor pois diminui a probabilidade de símbolo errado. O mapeamento utilizado, nesta constelação, foi feita com base no código Gray.

Genericamente, a forma de onda é expressa como:

$$S_i = \sqrt{\frac{2E_0}{T}} a_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_0}{T}} b_i \sin(2\pi f_c t) = \underbrace{a_i \sqrt{E_0}}_{S_{i1}} \Psi_1(t) + \underbrace{b_i \sqrt{E_0}}_{S_{i2}} \Psi_2(t), 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

onde  $T$  é o tempo de duração de cada símbolo,  $E_0$  é metade da energia do ponto da constelação mais próxima da origem dos eixos,  $f_c$  é a frequência da portadora,  $a_i$  e  $b_i$  têm valores independentes tais como  $\pm 1, \pm 2, \dots, \pm(\sqrt{M}-1)$ . As funções base  $\Psi_1(t)$  e  $\Psi_2(t)$  do espaço de sinal bidimensional são senóides de período  $T_s$ , frequência  $f_c$  e energia unitária, calculadas da forma:

$$\Psi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t), \forall 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

$$\Psi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_c t), \forall 0 \leq t \leq T \quad (3)$$

De acordo com a equação (1), os pontos de uma constelação quadrada têm as seguintes coordenadas:

$$S_i = \begin{bmatrix} a_i \sqrt{E_0} \\ b_i \sqrt{E_0} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

A distância mínima entre pontos adjacentes é  $d_{min} = 2\sqrt{E_0}$ . A energia média das constelações quadradas, com símbolos equiprováveis em função de  $E_0$  ou  $d_{min}$ , é calculada como:

$$\langle E \rangle = \frac{4}{M} \left[ 2 \frac{\sqrt{M}}{2} \sum_{i=1}^{\frac{\sqrt{M}}{2}} (2i-1)^2 E_0 \right] = \frac{2(M-1)E_0}{3} \quad (5)$$

$$\langle E \rangle = \frac{M-1}{6} d_{min}^2 \quad (6)$$

onde o termo  $\langle E \rangle$  representa a energia total de um quadrante da constelação. O modulador M-QAM é formado por dois moduladores PAM (*Pulse Amplitude Modulation*), responsáveis pela geração dos sinais  $I$  e  $Q$  os quais, na saída do M-QAM, são os vetores de localização dos símbolos da constelação e seus dados de amplitude e quadratura.

Em  $\sqrt{M} - PAM$ , uma constelação unidimensional de  $\sqrt{M}$  pontos igualmente espaçados entre si de  $d_{min}$ , a energia média é calculada como:

$$\langle E_{med} \rangle = \frac{2E_0}{\sqrt{M}} \cdot \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} (2i-1)^2 = \frac{(M-1)E_0}{2} \quad (7)$$

ou seja, a metade da energia média de M-QAM.

A Tabela I mostra como a relação entre  $\langle E \rangle / E_0$ , em M-QAM quadrada, aumenta com o número de pontos  $M$ .

TABELA I RELAÇÃO GRAU M VERSUS ENERGIA	
$M$	$\langle E \rangle / E_0$
4	2
16	10
64	42

Nas opções de modulação disponíveis no DRM+, 4-QAM e 16-QAM para o modo E, a quantidade de energia chega a ser 5 vezes maior quando se comuta de 4-QAM para 16-QAM, necessitando-se de taxas BER (*Bit Error Rate*) e MER (*Modulation Error Ratio*) mais elevadas.

### B. Digital Radio Mondiale (DRM+)

Na faixa de frequência 30 a 174 MHz, o sistema DRM+ fornece uma ampla variedade de configurações para o sinal digital, incluindo o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) - modo E [12].

Conforme definido em [13], o padrão DRM+ opera na faixa de VHF (*Very High Frequency*) com uma largura de banda de 100 KHz para substituir o sinal analógico. O DRM+ tem 03 canais lógicos, o FAC (*Fast Access Channel*), o SDC (*Service Description Channel*) e o MSC (*Main Service Channel*). Esses canais lógicos são as opções que o DRM+ oferece para adequar o sinal ao tipo de modulação utilizada [14].

A Tabela II destaca os dois tipos de modulação MSC-QAM (*Main Service Channel - QAM*) no modo E: 4-QAM, que proporciona uma alta taxa de proteção para o sinal e uma taxa de dados de 74,5 Kbit/s e a modulação 16-QAM que apresenta baixa proteção do sinal para uma alta taxa de dados, da ordem de 186,4 Kbit/s [13], [15].

TABELA II  
MODO DE TRANSMISSÃO DRM+

Modo	MSC-QAM	Faixa de Frequência	Aplicação	DRM
E	4, 16	100 KHz	VHF II	+

Essas opções permitem à emissora adequar o sinal de transmissão às condições de propagação, que podem variar com o tempo, com a frequência e com o ambiente rural ou urbano. A flexibilidade quanto à escolha de parâmetros permite a melhoria da robustez do sinal transmitido e da relação sinal-ruído bem como diminuir as interferências de outros sinais e corrigir ou reduzir a degradação do sinal por ação de múltiplos percursos. No entanto, o aumento da robustez do sinal implica em uma menor taxa de bits [16].

Com a digitalização do sinal das emissoras de FM, no padrão DRM+, um dos maiores ganhos será a redução da largura de banda BW (*Bandwidth*) de 200 KHz para 100 KHz [17], [18] e, em consequência, a possibilidade de se alocar um número maior de emissoras na mesma faixa de frequência [19].

Assim como ocorre com a TV Digital, é necessário definir as configurações de transmissão e recepção. Como o modulador é parametrizável, os valores de parametrização irão influenciar na agressividade desse sinal, por exemplo, para tornar o sinal mais robusto será necessário que a BW seja maior ou, ao contrário, um sinal menos robusto irá demandar uma BW menor [20].

Devido às características técnicas dos padrões digitais, a digitalização do rádio poderá oferecer canais físicos e canais virtuais. O canal físico é a frequência de operação da emissora enquanto os canais virtuais são as *streams* de dados dentro do canal físico.

Uma transmissão DRM+ fornece de 1 a 4 serviços em seus canais virtuais. Os ouvintes selecionam um serviço usando o rótulo fornecido na SDC (*Service Descriptor Channel*) e o

receptor usa as informações de configuração do SDC para selecionar os dados corretos que são fluxos do MSC. Um fluxo MSC (*Main Service Channel*) pode conter uma componente de áudio, incluindo mensagens de texto DRM+, que são opcionais, uma componente de dados em modo de fluxo síncrono ou até 4 componentes de dados no modo pacote. A capacidade MSC disponível, dependendo dos parâmetros de modulação escolhidos, pode ser atribuída, de forma flexível, ao número necessário de fluxos MSC e as mudanças podem ser feitas usando o processo de reconfiguração dinâmico.

A emissora após a digitalização, no padrão DRM+, poderá oferecer até 4 programações distintas no mesmo canal físico [13], [21]. Esse sistema opera com largura de faixa de 100 KHz e possibilita sua instalação utilizando a mesma infraestrutura de transmissão do sinal analógico. Mesmo operando nessa mesma infraestrutura, as frequências de transmissão são distintas e, assim, o sinal digital e analógico pode coexistir na frequência de radiodifusão sonora, sem interferências entre si.

A Fig. 2 mostra o compromisso entre a potência irradiada e a distância necessária entre as frequências ( $\Delta f$ ) para a coexistência do sistema DRM+ e da transmissão em FM [22].

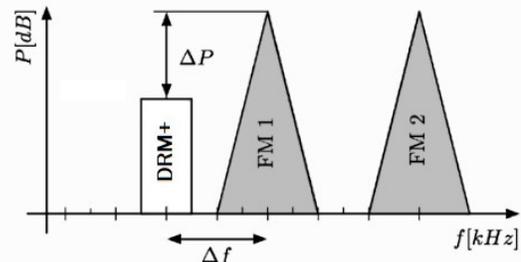


Fig. 2. Relação de Proteção entre Potência de RF e Frequência em KHz [22].

Quanto maior a distância entre as portadoras, a emissora poderá empregar uma potência de RF maior. Respeitada essa condição, os sinais não irão sofrer interferências destrutivas entre si [23].

Para um  $\Delta f < 150$  kHz, é recomendável uma relação de proteção maior que 20 dB. No entanto, para  $\Delta f \geq 200$  kHz, a relação de proteção pode ser reduzida para 0 dB [24].

Dentre os principais parâmetros do padrão DRM+ que determinam a melhoria da demodulação, destacam-se:

- Intensidade do campo elétrico ( $\text{dB}\mu\text{V/m}$ );
- Razão Sinal-Ruído (SNR - *Signal Noise Rate*);
- Taxa de erro de modulação MER [25];
- Taxa de frames de áudio recebidos corretamente (AQ-*Audio Quality*): A recepção do áudio é considerada de qualidade, quando no mínimo 98% dos frames são recebidos corretamente, condição em que o ouvinte não identifica queda na continuidade do áudio [5].

### C. Modulador QAM

O modulador M-QAM, mostrado na Fig. 3, é constituído pelos blocos Mapeador e Modulador [10], [26].

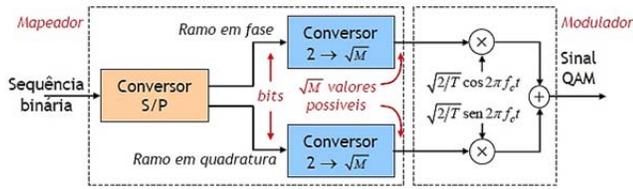


Fig. 3. Modulador M-QAM utilizado no processo de construção do sinal em Amplitude e Quadratura [26].

No bloco Mapeador após a chegada da sequência de bits, dois conjuntos de bits são direcionados ao ramo em fase e dois conjuntos de bits ao ramo em quadratura, pelo conversor S/P. Esta divisão da sequência de bits é necessária para enviar esta nova sequência para os dois moduladores PAM. Em resumo, o conversor S/P secciona a sequência binária recebida em grupos de K bits e reparte cada grupo em dois subgrupos de comprimento K/2 e os entrega aos conversores  $2 \rightarrow \sqrt{M}$  dos ramos em fase e em quadratura.

O bloco Modulador transfere o sinal modulado, que está em banda-base, para a banda de canal centrada na frequência da portadora da emissora, sendo T o tempo de símbolo e  $f_c$  a frequência da portadora [27].

D. Demodulador QAM

O correspondente demodulador padrão é apresentado na Fig.4 [26].

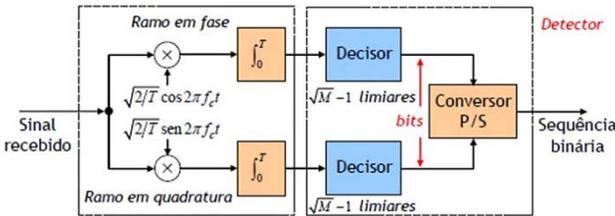


Fig. 4. Demodulador genérico para M-QAM [26].

Cada ramo está relacionado com um dos dois eixos do espaço de sinal, o ramo em fase I e o ramo em quadratura Q. Após a atuação dos integradores, o decisor do ramo em fase produz a estimativa da abscissa do ponto recebido enquanto que o decisor do ramo em quadratura produz a estimativa da ordenada, restaurando o mapeamento prévio do ponto da constelação para a obtenção do grupo de k bits enviados pelo modulador. Como exemplo, para o caso 16-QAM, a abscissa da ordenada do ponto recebido é comparada, respectivamente, nos decisores em fase com  $\sqrt{M} - 1 = 3$  e, em quadratura, com 3 limiares. Cada decisor entrega ao conversor paralelo-série P/S um grupo de dois bits, que serão concatenados em um grupo de K = 4 bits.

Devido à presença de ruídos e interferências, os decisores podem se enganar na tomada de decisões. Nesse contexto, a probabilidade de erros considera os erros de bit e símbolo. Ambos implicarão em erros no áudio que serão percebidos pelo ouvinte, principalmente, à medida que o mesmo se desloca em relação à torre de transmissão [28].

E. Probabilidade de Erro de Símbolo

Para o estudo da probabilidade de símbolo errado, supõe-se a presença de um ruído gaussiano de densidade espectral de potência  $S_w(f) = \frac{N_0}{2}$ , onde  $N_0 = kT_e$  e é expresso em função da Constante de Boltzmann ( $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ ) e  $T_e$  ( $^\circ\text{K}$ ), a temperatura equivalente do ruído no receptor [29]. Considerando a variância ( $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$ ) à entrada dos decisores, um ponto da constelação será corretamente selecionado se a abscissa e a ordenada forem ambas corretamente estimadas para que o símbolo possa ser identificado [10].

A probabilidade de erro da abscissa ou ordenada é definida da mesma forma que em moduladores PAM (Pulse Amplitude Modulation) de  $\sqrt{M}$  níveis. Considerando que os níveis estejam espaçados de  $d_{min} = 2\sqrt{E_0}$ , a probabilidade de erro é calculada como [26].

$$P_{ePAM} = 2 \left( \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} \right) Q \left( \frac{d_{min}}{\sqrt{2N_0}} \right) \tag{8}$$

$$P_{ePAM} = 2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left( \sqrt{\frac{2E_0}{N_0}} \right) \tag{9}$$

onde a função Q(x) representa a área abaixo e à direita da função densidade de probabilidade gaussiana normalizada de x. Desde que  $P_{ePAM}$  é a probabilidade de erro, então a probabilidade de decisão correta segundo cada eixo será dada por  $1 - P_{ePAM}$ .

Como as componentes em fase e quadratura são independentes, a probabilidade global de detecção correta em M-QAM pode ser descrita como o produto das probabilidades de detecção correta segundo cada eixo, consideradas de iguais valores, ou seja:

$$P_c = (1 - P_{ePAM})^2 \tag{10}$$

A probabilidade de símbolo errado é, então, calculada por:

$$P_e = 1 - P_c$$

$$P_e = 1 - (1 - P_{ePAM})^2$$

$$P_e = 2P_{ePAM} - P_{ePAM}^2 \tag{11}$$

A Fig. 5 destaca que, se  $P_e < 2P_{ePAM}$ , esses valores estarão tanto mais próximos quanto menor for  $P_{ePAM}^2$ . Se  $P_{ePAM} \ll 1$  ou se  $\frac{E_0}{N_0} \gg 1$ , o valor  $2P_{ePAM}$  será próximo do valor exato  $P_e$ , ou seja [26]:

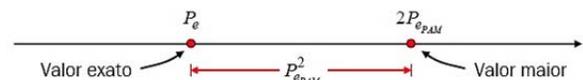


Fig. 5. Valores de decisão [26].

$$P_e \approx 2P_{ePAM}, \text{ se } \frac{E_0}{N_0} \gg 1 \quad (12)$$

Substituindo-se (9) em (11) e (8) em (11), obtém-se a probabilidade de símbolo errado em função da energia  $E_0$  e da distância mínima  $d_{min}$ :

$$P_e \approx 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{2E_0}{N_0}}\right) \quad (13)$$

$$P_e \approx 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\frac{d_{min}}{\sqrt{2N_0}}\right) \quad (14)$$

O valor a maior de  $P_e \leq (M-1)Q(d_{min}/\sqrt{2N_0})$  aplicado às constelações quadradas é diferente do valor exato procurado, como pode ser constatado na Tabela III.

TABELA III  
COEFICIENTES DE VALOR A MAIOR DE  $P_e$  EM QAM.

M	$4(1-1/\sqrt{M})$	M-1
4	2	3
16	3	15
64	3.5	63

#### F. Probabilidade de Erro de Bit

A probabilidade de bit errado ( $P_b$ ) está delimitada por  $P_e$  e  $P_e/k$  tal que  $P_e/k \leq P_b \leq P_e$ . O seu real valor vai depender do mapeamento, dos grupos de  $k$  bits da sequência binária e dos  $M$  símbolos da constelação.

O objetivo é que  $P_b$  tenha o menor valor possível. Para isso, utiliza-se o mapeamento de Gray, onde cada ponto da constelação tem como variação apenas um bit, e  $E_0/N_0 \gg 1$ , levando a  $P_b \approx P_e/k$ . No M-QAM,  $\langle E \rangle = kE_b$ , sendo  $E_b$  a energia média de bit, a probabilidade de bit errado pode ser expressa pelas seguintes aproximações [30]:

$$P_e \approx \frac{4}{k} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \cdot Q \left(\sqrt{\frac{2E_0}{N_0}}\right) \quad (15)$$

$$P_b \approx \frac{4}{k} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \cdot Q \left(\sqrt{\frac{3k}{M-1} \cdot \frac{E_b}{E_0}}\right) \quad (16)$$

A Fig. 6 apresenta as curvas de probabilidade de erro dos símbolos e de bits [11].

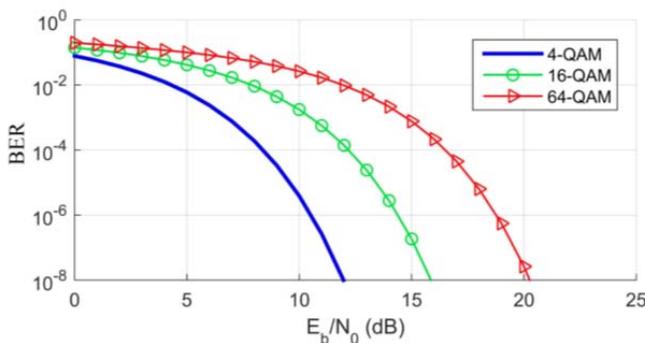


Fig. 6. BER versus  $(E_b/N_0)$  dB.

Com base na Fig.6, observa-se que para maiores taxas de modulação é necessária uma maior relação sinal-ruído ou BER, que levará à redução da probabilidade de bit e símbolo errados. A decodificação correta dos símbolos depende de seus deslocamentos em relação às coordenadas de tal forma que, quanto maior a intensidade do sinal no local de recepção, menor o erro de posicionamento do símbolo na constelação. O DRM+ trabalha com valores BER (MER) em torno de  $10^{-4}$ .

### III. ESTUDO DE CASO

Nesta seção serão apresentados os resultados de simulação das coberturas do sinal analógico modulado em FM e digital com o padrão DRM+, utilizando-se o software Projeto de Instalação de Radiodifusão® da GT Telecomunicações, por meio de um estudo de caso com base na Rádio UFMG Educativa FM - 104.5 MHz, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

A Rádio UFMG FM - 104.5 MHz pertence à Empresa Brasil de Comunicação (EBC) e a detentora da concessão de radiodifusão (registrado no Ministério das Comunicações como ZYX 414) é a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), situada nesta mesma cidade. As simulações foram realizadas utilizando-se as Normas da FCC (*Federal Communications Commission*), ITU-R P.1546. Os dados técnicos da emissora UFMG FM - 104.5 MHz foram coletados do site da ANATEL, disponível em <http://sistemas.anatel.gov.br/se/public/view/b/form.php?id=57dbac1fdff3&state=FM-C3>.

Os 3 cenários analisados nas simulações incluem as áreas de cobertura dos sinais analógico, operando em 104.5 MHz, com potência reduzida, digital híbrido operando em 104.7 MHz com sistema irradiante combinado e sinal digital no FM Estendido em 87.5 MHz; indicados como A, B e C, respectivamente. As especificações técnicas adotadas nas simulações estão indicadas na Tabela IV.

Para a realização das simulações, utilizaram-se vários dados técnicos, os quais foram inseridos no software para gerar os gráficos de cobertura de sinal. Estes dados estão distribuídos na Tabela IV. Nesta observa as variações de potência efetiva irradiada, o conjunto de antenas utilizadas considerando-se aqui a altura de instalação do conjunto na torre de transmissão.

A ANATEL define três contornos de área de cobertura para os sinais das emissoras em FM, a saber [4]:

- Área de Serviço Primária (Contorno 1): limitada pelo contorno de  $74 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  - (5 mV/m);
- Área de Serviço Urbana (Contorno 2): limitada pelo contorno de  $66 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  - (2 mV/m);
- Área de Serviço Rural (Contorno 3): compreendida entre o contorno 2 e o contorno de  $54 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  - (0,5 mV/m).

No desenvolver das simulações, através dos gráficos gerados, observa-se a apresentação destes contornos, para elucidar a área de cobertura primária e urbana para cada nível de potência transmitido.

TABELA IV  
DADOS TÉCNICOS ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES.

Cenários	A	B	C
<b>Dados do Transmissor</b>			
Tipo de Sinal	Analogico	Digital	Digital estendido
Frequência	104.5 MHz	104.7 MHz	87.5 MHz
Classe da Emissora	A1	A1	A1
Potência de RF	1.5 kW	0.07 kW	2.5 kW
<b>Dados da Antena</b>			
Bandwidth	88 a 108 MHz	88 a 108 MHz	76 a 90 MHz
Ganho da Antena	0.02 dB	-3.07 dB	0.02 dB
Azimute	120°	148°	120°
Polarização	Circular	Circular	Circular
Padrão de Irradiação	Omnidirecional	Omnidirecional	Omnidirecional
Altura da Torre	25 metros	19.1 metros	25 metros
<b>Dados da Linha de Transmissão</b>			
Atenuação da Linha	0.56 dB	0.38 dB	0.56 dB
Comprimento da Linha	45 metros	30 metros	45 metros
Z da Linha	50Ω	50Ω	50Ω
At. dos Conectores/ Filtros	1.5 dB	0.50 dB	1.5 dB
SWR	<1:1:1	<1:1:1	<1:2:1

Para a avaliação da área de cobertura das transmissões, o local de referência utilizado neste trabalho foi a Praça 7 de Setembro, localizada no centro de Belo Horizonte, que é considerada como a região de maior poluição radioelétrica do Estado de Minas Gerais. É uma área de grande geração de ruídos eletromagnéticos devido aos diversos equipamentos localizados no entorno, provenientes de sistemas como telefonia celular, câmeras de segurança via Wi-Fi (802.11 a/b/g/n/ac), sistemas de sinalização via ondas de rádio, dentre outros equipamentos geradores de RF [31].

#### A. Região de Cobertura do Sinal Analógico no Modo Híbrido com potência reduzida.

A Fig. 7 mostra o cenário de transmissão híbrida. Nessa condição, tanto o sinal analógico FM como o sinal digital DRM+ estão presentes no espectro radioelétrico na faixa de 88 a 108 MHz, separados entre si por 200 kHz, conforme proposto em [5], e que a relação de proteção está definida

em 13,4 dB. O sinal em FM está com *Bandwidth* de 200 kHz e o Digital com 100 kHz, e ambas as portadoras estão afastadas de 200 KHz em relação a frequência central.

Essas condições possibilitaram operar com a portadora analógica em 104.5 MHz e potência de rádio frequência (RF) de 1,5 kW e a portadora digital em 104.7 MHz com potência RF de 0,07 kW. Na Tabela IV, as colunas A e B mostram a parametrização utilizada para esta simulação.

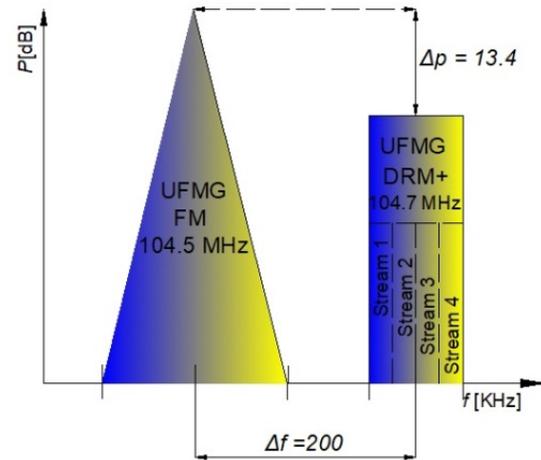


Fig. 7. Configuração das portadoras para o Cenário Híbrido FM Convencional.

Na transmissão estereofônica de sinal FM em 104.5 MHz, a existência de dois canais de áudio representa um avanço se comparado à transmissão AM, onde tem-se apenas um canal de áudio. Já na Fig.7, observa-se que a transmissão digital, disponibiliza além do canal físico, que é o canal de transmissão da emissora operando em 104.7 MHz, as *streams* de áudio. O padrão DMR+ permite que uma emissora tenha até 4 canais virtuais de áudio. Estes fluxos de dados são canais virtuais oriundos da digitalização. Dessa forma, uma emissora que opere em rede nacional pode, por exemplo, transmitir a programação da rede no *stream 1*, a programação local no *stream 2*, música no *stream 3* e notícias no *stream 4*. Nesse contexto, cada emissora analógica equivaleria a 4 novas emissoras, permitindo um avanço significativo para as emissoras quanto à diversificação de seu público alvo.

Após parametrizar o software Projeto de Instalação de Radiodifusão® da GT Telecomunicações utilizando os dados das colunas A da Tabela IV, obtém-se o gráfico da Fig.8 que mostra o diagrama de irradiação da antena TTM3Ae, utilizada na emissão do sinal analógico.

Observa-se no plano horizontal que a antena, apesar de ter diagrama de irradiação omnidirecional, apresenta um ganho maior nas coordenadas próximas a 50°. A emissora utiliza um conjunto de dois elementos, resultando em um ganho total de 0,02 dB, conforme catálogo do fabricante. Para um ganho maior com relação ao conjunto de antenas, a emissora poderia usar até a configuração TTFM3A-6, conforme Tabela V, desta forma tendo um ganho resultante de 3.27 dB em relação à antena dipolo omnidirecional.

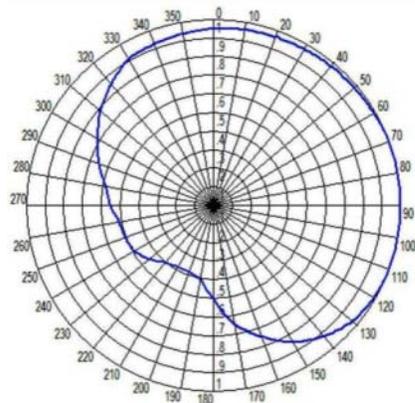


Fig. 8. Diagrama de irradiação da antena TTM3Ae.

A Tabela V mostra que, para outras configurações, pode-se aumentar a ERP transmitida sem a necessidade de aumentar a potência do transmissor. Apenas aumentando-se o conjunto de antenas irradiantes, obtém-se um ganho maior em relação ao conjunto atualmente utilizado na emissora. O limite de aumento da ERP é o enquadramento de classe da emissora, no caso da Rádio UFMG Educativa FM, Classe A1 com limite de 2.5 kW.

TABELA V  
GANHO *VERSUS* MODELO.

Modelo	Ganho x dipolo	dBd
TTFM3A-1	0.46	-3.34
TTFM3A-2	1.0	0.02
TTFM3A-3	1.58	1.98
TTFM3A-4	2.1	3.23
TTFM3A-5	2.68	4.29
TTFM3A-6	3.27	5.14

A Fig. 9 apresenta a área de cobertura do sinal analógico no modo híbrido, com potência de transmissão de 1,5 KW. Destaca-se o local de referência, a Praça 7 de Setembro, inserida dentro da curva de intensidade de campo de  $74 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ . Conforme as normas aplicáveis, esta intensidade de campo é a intensidade coerente para regiões urbanas. O contorno protegido para as emissoras comunitárias é de 1 km de raio em torno da torre de transmissão. Com intensidade de campo de  $91 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  para modo FM. Já para o DRM+ os valores alcançados foram de 52 a  $55 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  no modo 4-QAM e 53 a  $56 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  para 16-QAM [4].

Observa-se que para o sinal analógico, mesmo operando com potência de 1,5 kW a região de interesse está dentro da curva de intensidade de campo de  $74 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ . Dessa forma, o sinal da emissora será recebido corretamente por ambos os receptores estáticos e móveis. Mesmo com a redução da potência de 2.5 kW para 1.5 kW o sinal analógico conseguiu cobrir de forma satisfatória os contornos de trabalho da emissora. De forma análoga, o resultado alcançado é semelhante ao apresentado no trabalho [5].



Fig. 9. Área de cobertura do sinal analógico.

Mesmo com a redução de 2.5 kW para 1.5 kW na potência de transmissão do sinal analógico, a região de interesse está dentro da curva de intensidade de campo de  $74 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ . Com este valor de intensidade de campo, o sinal será corretamente decodificado tanto pelos receptores estáticos quanto para os receptores que estão em deslocamento. Para a correta demodulação do sinal, as curvas do FCC determinam que a intensidade de campo esteja entre 66 a  $74 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ . O resultado obtido nessa simulação é análogo ao resultado alcançado em [5].

#### B. Região de Cobertura do Sinal Digital para o Modo Híbrido.

Esta simulação considerou a transmissão de sinais DRM+, na frequência de 104.7 MHz, potência RF de 0.07 kW e antena de polarização circular. Os parâmetros utilizados estão mostrados na Tabela IV, coluna B. As antenas do sinal analógico e do sinal digital foram consideradas instaladas na mesma torre de transmissão, assim como apresentado em [4].

A área de cobertura do sinal digital no modo híbrido é muito reduzida, conforme pode ser visto na Fig. 10. Vale destacar que esses resultados das simulações estão coerentes com os testes em campo realizados pelo INMETRO [5]. Essa redução ocorre, pois o padrão DRM+, no modo de 16-QAM, solicita uma intensidade de campo, no mínimo, de  $40 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e  $E_{med}$  de 14dB, não alcançadas em ambos os testes realizados, seja nas simulações ou medições em campo conforme apresentado em [5].

Como mostra a Fig. 10, a principal área de interesse da emissora, a Praça 7 de Setembro, está situada numa região além da curva de  $66 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , muito próxima da região delimitada pelo contorno de  $54 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  intensidade de campo para cobertura rural. A linha definida como contorno protegido é a região onde se encontra o limiar de interferências co-canal, definida pelas normas técnicas da ANATEL. Além dessa curva, a emissora não tem direito à proteção co-canal. Para uma cobertura urbana, a intensidade de campo solicitada pelas curvas das Normas 47 CFR 73.207 do FCC é de  $74 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ . Ou seja, o sinal da emissora não chegará à área urbana da cidade Belo Horizonte no modo 16-QAM de forma satisfatória.



Fig. 10. Área de cobertura do sinal digital.

### C. Região de Cobertura do Sinal Digital em FM estendido.

A próxima simulação pressupõe a emissora alocada no FM Estendido em 87,5 MHz. Nessa frequência, a separação entre a portadora digital e analógica é de 17 MHz. A análise da área de cobertura do sinal digital, no modo 16-QAM, pode ser realizada ajustando-se os parâmetros MSC *code rate*, SDC *code rate* e do *Bit rate*, no software de codificação *Spark DRM+ Signal Generator*<sup>®</sup>.

A coluna C da Tabela IV mostra os dados de parametrização do sinal digital para  $\Delta f \gg 50 \text{ KHz}$  entre as frequências das portadoras analógica e digital. Quando a emissora opera o canal analógico com espaçamento entre frequências maior do que 300 KHz em relação ao canal digital, torna-se possível transmitir o sinal de RF digital com potência mais elevada e com proteção da ordem de -8 dB [13].

A proposta deste trabalho é aumentar o distanciamento entre as portadoras visando proporcionar os requisitos técnicos necessários para que a portadora digital possa ser alocada no FM Estendido e operar com toda a potência da classe da emissora, ou seja, Classe A1.

O FM Estendido deverá ser implantado após o desligamento da TV analógica que resultará no aumento da disponibilidade de canais no espectro radioelétrico. A nova faixa de frequência para o FM comercial será de 76 a 108 MHz, viabilizando uma separação maior entre as portadoras analógica e digital pelo aumento da oferta da quantidade de canais.

A faixa de frequências de 76.1 a 87.5 MHz está alocada na banda de VHF (*Very High Frequency*), bem distante da faixa ocupada pelas emissoras de TV Digitais (UHF) que compreende as frequências de 470 MHz a 806 MHz, destinada aos canais de 14 a 69. Mas após o leilão de parte desta faixa de frequências para o 4G da telefonia celular, as emissoras de TV Digital irão operar apenas entre os canais de 14 ao 51, ficando reservada a faixa de frequência de 698 a 806 MHz para a implantação do LTE (*Long Term Evolution*) [32].

A Fig. 11 mostra as portadoras digital e analógica nas frequências de 87.5 MHz e 104.5 MHz, respectivamente.

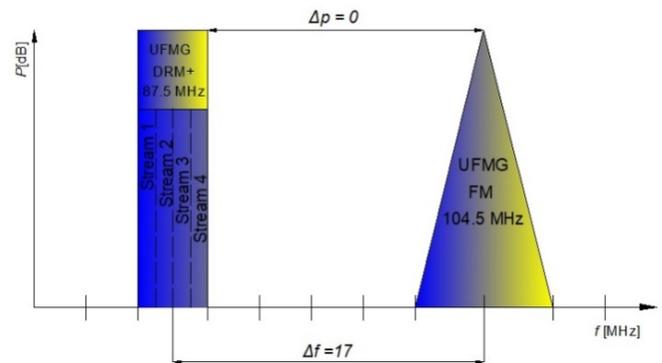


Fig. 11. Áreas de cobertura para o FM estendido

Ambos os sinais operam com 2,5 kW de potência mantendo a mesma área de cobertura para o sinal digital e analógico. Pode-se observar que é possível a manutenção das áreas de cobertura das emissoras digital e analógica a partir dos aumentos das potências de RF das emissoras digital e analógica ou alterando-se a densidade de modulação. Caso a área de cobertura da emissora fique reduzida no modo DRM+ operando com modulação 16-QAM, a emissora poderá alterar a modulação para 4-QAM. Permitindo uma recepção tanto no modo estático como móvel com maior probabilidade de decodificação correta dos sinais.

A Fig. 12 mostra que a emissora, operando com 2,5 kW e na frequência de 87.5 MHz, conseguiu cobrir a região de interesse, ou seja, a Praça 7 de Setembro. Observa-se que esta região está situada dentro da curva de 74 dB $\mu$ V/m, onde não ocorrem interferências prejudiciais à adequada recepção do sinal. Ainda, nessa frequência não há interferências mútuas, uma vez que a proposta é que no FM Estendido fiquem apenas alocadas as emissoras digitais.

Na Fig.12 observa-se que a região de interesse está dentro da referida curva, atendendo às normas FCC §74.1204.

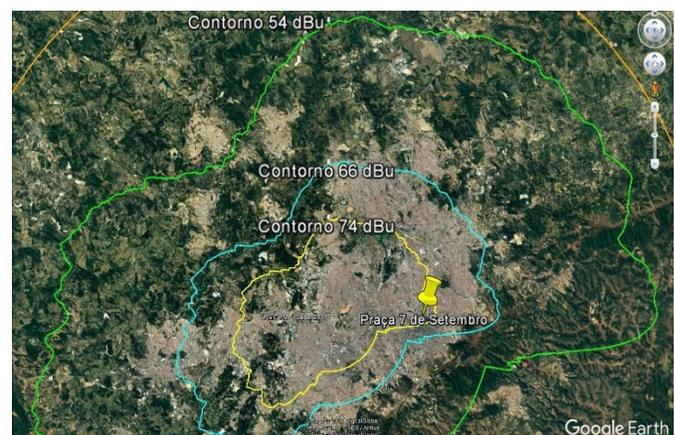


Fig. 12. Área de cobertura UFMG Digital em FM estendido.

## IV. CONCLUSÕES

Diante das perspectivas da digitalização da rádio transmissão no Brasil, este trabalho desenvolveu análises voltadas ao padrão DRM+ que, na atualidade, se destaca como uma das principais opções a ser adotada. Foram abordadas as suas características fundamentais no que

concerne à modulação e demodulação dos sinais, principalmente no modo M-QAM, características técnicas de operação, parâmetros configuráveis e de avaliação, tais como as taxas de erros de símbolos e bits.

A partir daí o trabalho apresentou um estudo de caso, com base na Rádio UFMG FM Educativa - 104.5 MHz, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Foram avaliadas as coberturas do sinal analógico modulado em FM e sinal digital com o padrão DRM+ em três diferentes cenários compreendendo o modo híbrido, o sistema irradiante combinado e o sinal digital no FM Estendido. Utilizando o software Projeto de Instalação de Radiodifusão® da GT Telecomunicações.

As simulações foram realizadas utilizando-se o software Projeto de Instalação de Radiodifusão® da GT Telecomunicações, em conformidade com as Normas FCC e dados técnicos reais da emissora UFMG FM - 104.5 MHz coletados do site da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações).

Nos cenários do modo híbrido, pôde-se constatar uma drástica redução da área de cobertura do sinal digital DRM+ em relação à cobertura atual do sinal analógico. As alternativas disponíveis para a solução desse problema envolvem o ajuste dos parâmetros de configuração do DRM+, a saber, *MSC Modulation*, *SDC Modulation*, *MSC Code Rate*, *SDC Code Rate*, *FAC* e *Bit rate* associados ao aumento da intensidade do sinal na área de recepção.

Visando à futura implantação do FM Estendido com maior disponibilidade de canais e distanciamento das portadoras analógica e digital, pôde-se mostrar a viabilidade da transmissão DRM+ simultaneamente à transmissão analógica com máxima potência disponível e separação maior que 200 kHz, sem interferências mútuas.

Como contribuição deste trabalho, além dos subsídios técnicos apresentados para a tomada de decisão sobre rádio digital, demonstrou-se a possibilidade da rádio transmissão conjunta analógica e digital, mantendo-se uma qualidade satisfatória de recepção e a provisão de serviços interativos próprios do padrão DRM+, como mensagens de texto, informações de interesse público, dentre outros.

Trabalhos futuros poderão investigar a influência dos parâmetros do padrão DRM+ sobre as áreas de cobertura e qualidade de recepção, bem como abordar a implantação de emissoras repetidoras, sincronizadas via satélite, de forma a reforçar o sinal em regiões de sombra ou ausência completa de sinal.

#### AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro Emanuel Zucarini, Gerente de Projetos da Empresa Brasil de Comunicação (EBC) e ex-diretor do Minicom da ANATEL, pelo acesso e apoio quanto à utilização do software Projeto de Instalação de Radiodifusão® da GT Telecomunicações.

#### REFERÊNCIAS

[1] G. Bedicks et al., "Results of the ISDB-T system tests, as part of digital TV study carried out in Brazil," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 52, no. 1, pp. 38-44, 2006, DOI. 10.1109/TBC.2005.856729.

[2] D. Bodson, "Digital Audio Around the World," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 24-30, 2010, DOI. 10.1109/MVT.2010.939105.

[3] Y. Chen, C. Pan and Y. Zhang. "Bandwidth analysis of FM multiplex broadcasting, in Microwave and Millimeter Wave Technology, 2000" *2<sup>nd</sup> International Conference on ICT*, pp. 412-415, 2000.

[4] J.M. Matias et al., "Static Reception Results on DRM+ Field Trials in VHF Band II in Brazil," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 59, no. 3, pp. 422-431, 2013, DOI. 10.1109/TBC.2013.2273992.

[5] Inmetro, "Medições de Campo do Sistema DRM+ (Digital Radio Mondiale) na Faixa de FM em Belo Horizonte om a Rádio UFMG Educativa," pp. 1-55, 2012.

[6] J.M. Matias et al., "DRM Reception Results in Long-Range Short Wave Broadcasting," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 1, pp. 65-71, jan. 2016, DOI. 10.1109/TLA.2016.7430062.

[7] A. Steil et al. "Digitising VHF FM sound broadcasting with DRM+ (DRM mode E)," *Broadband Multimedia System and Broadcasting, BMSB'09. IEEE International Symposium*, pp. 1-6, 2009, DOI. 10.1109/ISBMSB.2009.5133727.

[8] K.J. Friederichs and R. Dauscha, "Codificação Adaptada à Modulação em Sistemas Rádio Digitais," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 69-77, dez, 1990, DOI. 10.14209/JCIS.1990.10.

[9] M. Boudineau et al. "Sampling schemes and parameter estimation for nonlinear Bernoulli-Gaussian sparse models," *IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP)*, pp. 1-5, ago, 2016, DOI. 10.1109/SSP.2016.7551706.

[10] E.N. Farag, "16-QAM modulator and method of 16-QAM modulation," *US Patent, Google Patents*, no. 7,078,981 B2, jul, 20016.

[11] W.T.A. Lopes, F. Madeiro and M.S. de Alencar, "Um Novo Método para o Cálculo da Probabilidade de Erros de Bit de Esquemas de Modulação QAM Sujeitos ao Desvanescimento Rayleigh," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 19, no. 2, ago, 2004, DOI. 10.14209/JCIS.2004.1.

[12] P.H.P. de Carvalho, R.D. Vieira and J.P. Leite, "A Continuous-State Reinforcement Learning Strategy for Link Adaptation in OFDM Wireless Systems," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 30, no. 1, jun, 2015, DOI. 10.14209/JCIS.2015.6.

[13] E. Standard, "Digital Radio Mondiale (DRM)," *System Specification, Journal ETSI-ES*, vol. 201, no. 980, pp. 195, 2014.

[14] F.X.C.D. Sá, and M.O.C., Altoé, "Radiodifusão sonora digital para frequências inferiores a 30 MHz," 2010.

[15] F.F. Lima et al., "Results of low power DRM+ field trial in the FM band II in Brazil," in *Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), SBMO/IEEE MTT-S International*. Pp. 1-5, 2013.

[16] Inmetro, "Medições de Campo do Sistema HD Radio na Faixa de FM em Belo Horizonte com a Rádio UFMG Educativa," pp. 1-77, 2012.

[17] ITU-R, "Systems for terrestrial digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the frequency range 30-3000 MHz," (Recommendation ITU-R BS.1114-9): pp. 84, 2015.

[18] M.S. Baek et al. "DRM + performance measurement in laboratory test environment," *Broadband Multimedia System and Broadcasting, BMSB, IEEE*, pp.1-4, 2012.

[19] H.M.M. Graciosa, "TV digital no Brasil," 2003. Available: [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtd2/pagina\\_5.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtd2/pagina_5.asp).

[20] CHEN, Y.; PAN, C.; ZHANG, Y. Bandwidth analysis of fm multiplex broadcasting. In: *Microwave and Millimeter Wave Technology, 2000, 2nd International Conference on. ICMMT*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 412-415. 66.

[21] R.K. Jurgen, "Broadcasting with digital audio," *IEEE Spectrum*, vol. 33, nº 3, pp. 52-59, 1996.

[22] E. Standard, "Digital Radio Mondiale (DRM)," *System Specification*, pp. 221, 2009.

[23] F. Maier, A. Tissen and A. Waal. "Evaluations and measurements of a single frequency network with DRM+," *Wireless Conference (European Wireless), Organization VDE*, vol. 18th European, pp. 1-5, 2012.

[24] R. Diniz, "O sistema Digital Radio Mondiale no contexto de escolha da norma técnica para o Sistema Brasileiro de Rádio

- Digital,” *Revista de Radiodifusão*, vol. 5, no. 5, 2011, DOI. 10.18580/radiodifusão.2011.5.75.
- [25] V. Oleg, “Research of influence of DRM broadcast transmitter non linearities onto the output signal parameters,” *T-Comm-ТелекоммуникацииТранспорт*, vol. 8, no 2, 2014.
- [26] S.A.A. Moreira, “Resumindo e concluindo... Yes, we QAM,” pp. 12, 2009.
- [27] F.F. Lima et al. “Analog and digital sound broadcasting systems compatibility analysis for frequencies below 30 MHz in Brazil,” in *SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics*, 2005.
- [28] E.L. Pinto and C.P. de Albuquerque, “A técnica de transmissão OFDM,” *Revista Científica*, vol. 1516, pp. 23-38, 2002.
- [29] S. Haykin and M. Moher, *Sistemas de Comunicação-5*, 5nd ed., Bookman Editora, 2011, pp. 220-239.
- [30] M.N. Rajesh et al., “ An analysis of VER comparison of various digital modulation scheme used for adaptive modulation,” *IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2016.
- [31] S. Kawai et al. “An 802.11 ax 4× 4 spectrum-efficient WLAN AP transceiver SoC supporting 1024-QAM with frequency-dependent IQ calibration and integrated interference analyzer,” in *Solid-State Circuits Conference-(ISSCC), IEEE International*, 2018.
- [32] B.R.F., Izario and C. Akamine, “Determinação da potência interferente versus a distância da estação LTE na TV Digital,” *Braxilian Society fo Television Engineering – ISSN Print 2447-0481*.



**Alexandre V. da Silva** é graduado em engenharia elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) em 2008, e Especialização em Sistemas de Telecomunicações (PUC Minas) em 2010. Atualmente é estudante do curso de Mestrado em Engenharia

Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas).



**Zélia M. A. Peixoto** recebeu o título de Bacharelado em engenharia eletrônica e de telecomunicações pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) em 1981, mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 1995 e 2000, respectivamente. Na verdade, ela é professora adjunta no

programa de pós-graduação em engenharia elétrica e departamento de engenharia eletrônica e de telecomunicações na PUC Minas, onde leciona cursos em processamento de sinais de tempo discreto e supervisiona pesquisas na pós-graduação. Seus principais tópicos de pesquisa incluem processamento digital de sinais e identificação de sistemas aplicados a sistemas elétricos, eletrônicos e de telecomunicações. Ela é uma das coordenadoras do grupo de estudos em processamento de sinais (GEPSIN-CNPq), membro IEEE (2014) e membro AES (2016).



**Flávia M. F. Ferreira** é graduada em engenharia elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) em 1990, concluiu seu mestrado em engenharia elétrica pela

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 1995 e seu

PhD em engenharia elétrica na pesquisa Centro de Telecomunicações da Universidade Católica do Rio de Janeiro (CETUC), em 2004. Atualmente é professora na PUC Minas, atuando no programa de pós-graduação em engenharia elétrica do departamento de engenharia eletrônica e telecomunicações sobre os seguintes tópicos: imagem, vídeo, áudio e processamento digital de voz, bem como visualização científica. Ela é uma das coordenadoras do grupo de estudos em processamento de sinais (GEPSIN-CNPq) e membro IEEE (2014).