

# Interferência de White Space Devices em receptores de TV Digital

Mauro Vieira de Lima e José Mauro P. Fortes

**Resumo**—O órgão regulador de telecomunicações do Reino Unido, Ofcom, publicou um regulamento que estabelece a potência de transmissão máxima para *White Space Devices* (WSDs) que operam, em caráter secundário, em uma célula de 100m x 100m do sistema primário de TV digital. A metodologia Ofcom é baseada em uma interferência de entrada única e não impõe restrições à interferência agregada gerada por múltiplos WSDs. Um artigo anterior investigou os limites nos quais a interferência agregada ultrapassa os limiares regulatórios da metodologia Ofcom. No artigo, as potências de transmissão dos WSDs são obtidas utilizando uma abordagem determinística na qual os WSDs em uma célula dividem igualmente a potência de transmissão máxima desta célula. No presente trabalho, as potências de transmissão dos WSDs são modeladas como variáveis aleatórias estatisticamente independentes, refletindo uma situação mais realista, uma vez que a tecnologia atual permite o uso de potências de transmissão que dependem do tipo e da qualidade do serviço. Este novo método probabilístico é comparado ao método determinístico investigado anteriormente.

**Palavras-Chave**—White space device, interferência agregada, rádio cognitivo.

**Abstract**—The UK telecom regulator, Ofcom, has issued a regulation statement establishing a maximum transmission power for White Space Devices (WSDs) operating in a 100m x 100m cell of the primary digital TV system. The Ofcom methodology is based on single-entry interference and does not impose constraints on the aggregate interference produced by multiple WSDs. A former paper has investigated the limits within which the aggregate interference due multiple WSDs exceeds the regulatory thresholds in the Ofcom regulation. In the paper, the WSD transmit powers were determined using a deterministic approach in which the WSDs in a cell divide the maximum transmit power of this cell equally. In the present work, the WSD transmit powers are modeled as a statistically independent random variables, reflecting a more realistic situation, once the current technology allows for the use of transmit powers that depend on the type and the quality of the service. This new probabilistic method is compared to the deterministic method previously investigated.

**Keywords**—White space device, aggregate interference, cognitive radio.

## I. INTRODUÇÃO

A tecnologia do rádio cognitivo tem sido pesquisada para utilização mais eficiente do espectro, pois permite o aproveitamento de faixas de frequência subutilizadas, através de rádios reconfiguráveis com inteligência para entender e adaptar-se ao ambiente radioelétrico [1].

Os dispositivos rádio cognitivos que operam na banda de frequência da TV digital, denominada DTT (*Digital Terrestrial Television*), são conhecidos como WSD (*White Space Device*)

Mauro Vieira de Lima e José Mauro P. Fortes, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, E-mails: mvi-eira@inmetro.gov.br, jmfortes@cetuc.puc-rio.br.

e utilizam os canais livres, liberados na migração analógico-digital dos sistemas locais de radiodifusão de TV. Os WSD são alocados na banda em caráter secundário na condição de não provocar interferência acima do limite estabelecido pelo órgão regulador. Os órgãos reguladores possuem o desafio de definir as condições de operação dos sistemas WSD [2] [3].

O órgão regulador do Reino Unido, Ofcom (*Office of Communication*), publicou, em fevereiro de 2015, a primeira regulação europeia [4] permitindo a operação de sistemas WSD na banda DTT através do suporte de sistemas de banco de dados geolocalizados WSDB (*White Space Database*). Neste documento, a metodologia de cálculo do limite máximo de emissão de potência do WSD é definida, bem como os parâmetros necessários para o cálculo inequívoco deste limite.

O planejamento de sistemas de TV subdivide a área de cobertura em unidades de área, denominada célula, com dimensões típicas de 100m x 100m. O regulamento Ofcom assume como premissa de cálculo que somente um WSD irradiará por célula e por canal de frequência. Entretanto, reconhece que um WSDB pode prover serviços para múltiplos WSD na mesma área geográfica e no mesmo canal de frequência, resultando em uma agregação da interferência. O regulamento assume que a agregação de múltiplas entradas de interferência dos WSD não será um problema a curto prazo.

Uma avaliação da potência interferente agregada foi desenvolvida em [7] no qual adotamos um método determinístico para emissão dos WSD. No presente artigo é desenvolvido um novo método probabilístico para a caracterização da potência de transmissão do WSD, sendo realizada uma análise comparativa com o método anterior.

Este artigo aborda na Seção II a modelagem matemática utilizada para cálculo das potências de transmissão e da interferência agregada. A Seção III apresenta os resultados numéricos das simulações, sendo as conclusões apresentada na Seção IV.

## II. MODELAGEM MATEMÁTICA

### A. Cálculo da e.i.r.p. Máxima Regulatória

O relatório ECC.186 [3] estabelece que o método de planejamento dos sistemas de TV digital deve ser adotado para definir os limites de interferência de um sistema secundário. Assim, o critério a ser utilizado para o cálculo da potência interferente intersistema deve ser o mesmo adotado para potência interferente intrasistema. O método de planejamento se inicia fixando para cada célula um valor máximo  $Z$  para o nível de potência interferente intersistema excedido 1% do tempo. A determinação dos valores de  $Z$  associados a cada célula é feita de acordo com o procedimento definido em [5]. Neste

trabalho, considera-se que os valores de  $Z$  são conhecidos. O critério a ser atendido pela interferência agregada afetando um receptor DTT em uma célula  $j$  é que o nível  $I_{0.01,j}$  de potência interferente agregada excedido durante 1% do tempo deve ser menor ou igual ao valor de  $Z$  associado à célula  $j$ , ou seja,

$$I_{0.01,j} \leq Z_j \quad (1)$$

Pode-se verificar facilmente que este critério de interferência é equivalente à condição

$$P(i_{agg,j} > Z_j) \leq 0.01 \quad (2)$$

onde  $i_{agg,j}$  é a potência interferente agregada afetando um receptor DTT em uma célula  $j$  e  $Z_j$  o valor de  $Z$  a ela associado. Esta condição deve ser satisfeita para todas as células.

O próximo passo é a determinação de um valor máximo de e.i.r.p. (*equivalent isotropically radiated power*) para os WSDs em uma dada célula, por exemplo a célula  $k$ . Para isso, a geometria ilustrada na Figura 1 é utilizada. Nesta figura,  $E_{kj}$

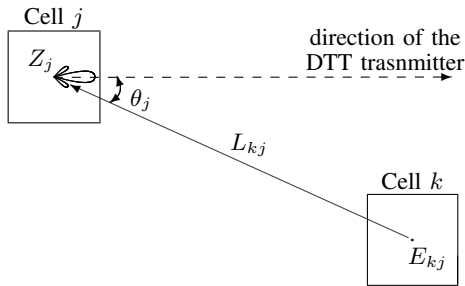


Fig. 1. Geometria para Cálculo da e.i.r.p.  $E_{kj}$

é o valor da e.i.r.p. transmitida por todos os WSDs da célula  $k$  em direção à célula  $j$  e  $L_{kj}$  é a perda de propagação entre a célula  $k$  e  $j$ . A potência interferente  $i_{kj}$  que chega à célula  $j$  devida aos WSDs na célula  $k$  é dada por

$$i_{kj} = E_{kj} + g(\theta_j) - L_{kj} + \rho(\Delta f) \quad (3)$$

onde  $g(\theta_j)$  é o ganho da antena DTT para o ângulo de chegada  $\theta_j$  da interferência e  $\rho(\Delta f)$  é a razão de proteção devida à separação de frequência  $\Delta f$  entre os canais DTT e WSD.

A perda de propagação  $L_{kj}$  é dada pelo modelo Hata estendido [6], sendo assim expressa como uma variável aleatória (v.a.) com distribuição Gaussiana de média  $m_{kj}$  e desvio padrão  $\sigma_{kj}$ , ou seja  $L_{kj} \sim N(m_{kj}, \sigma_{kj})$ . Considerando-se (3) verifica-se que  $i_{kj} \sim N(m'_{kj}, \sigma'_{kj})$ , onde

$$m'_{kj} = E_{kj} + g(\theta_j) - m_{kj} + \rho(\Delta f) \quad (4)$$

$$\sigma'_{kj} = \sigma_{kj} \quad (5)$$

A condição em (2) pode então ser reescrita como

$$P(i_{kj} > Z_j) = Q\left(\frac{Z_j - m'_{kj}}{\sigma'_{kj}}\right) \leq 0.01 \quad (6)$$

onde  $Q(\cdot)$  é a distribuição cumulativa de probabilidade de uma variável aleatória gaussiana  $\sim N(0, 1)$  (*Função Q*). Note que exigir que uma função  $Q$  seja menor ou igual a 0.01 é

equivalente a exigir que seu argumento seja maior ou igual a 2.33. Assim, a condição em (6) é equivalente a

$$Z_j \geq 2.33\sigma'_{kj} + m'_{kj} \quad (7)$$

ou, considerando-se (4) e (5),

$$E_{kj} \leq Z_j + m_{kj} - g(\theta_j) - \rho(\Delta f) - 2.33\sigma_{kj} \quad (8)$$

Note que o lado direito de (8) define um valor máximo para  $E_{kj}$ .

De acordo com os anexos do regulamento Ofcom [5], para canais adjacentes ( $\Delta f > 0$ ), as interferências devem ser calculadas para todas as células em uma área circular de 2 km de raio ao redor da célula  $k$ , conforme ilustrado na Figura 2.

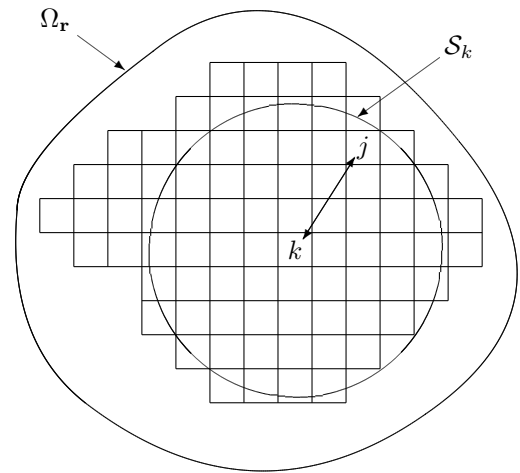


Fig. 2. Diagrama da Área Circular para Cálculo da e.i.r.p.  $E_k$

A máxima e.i.r.p.  $E_k$  permitida na célula  $k$  é definida pelo menor valor entre todos os valores máximos calculados para as e.i.r.p.  $E_{kj}$ , conforme expresso em (8), ou seja,

$$E_k = \min_j (Z_j + m_{kj} - g(\theta_j) - \rho(\Delta f) - 2.33\sigma_{kj}) \quad (9)$$

Esta e.i.r.p. máxima permitida é conhecida como e.i.r.p. regulatória. A restrição fundamental da metodologia Ofcom é definida pela e.i.r.p. regulatória de uma célula que não deve ser ultrapassada, o que implica em que a soma das e.i.r.p. dos WSDs em operação dentro de uma mesma célula está limitada à e.i.r.p. regulatória desta célula.

Note que os valores máximos de  $E_{kj}$  são calculados por um método *single-entry*, ou seja, considerando-se apenas a interferência gerada pelos WSDs de uma única célula (célula  $k$ ). Assim, é possível que a condição em (2) não seja atendida se a interferência agregada de WSDs em células múltiplas for considerada.

## B. Cálculo da Potência Interferente Agregada

O método utilizado para calcular a potência interferente agregada  $i_{agg}$  pode ser compreendido através da Figura 3. Esta figura ilustra um ambiente envolvendo múltiplos WSDs

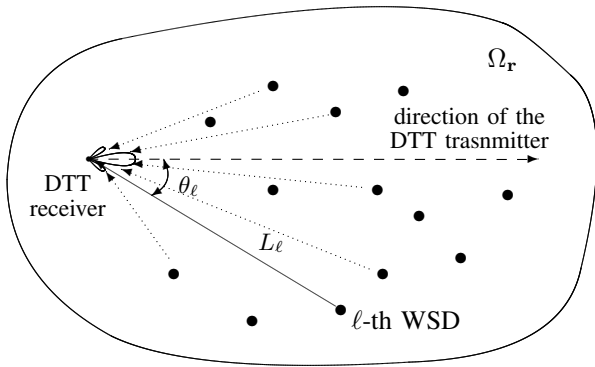


Fig. 3. Múltiplos WSD interferentes.

interferindo em um receptor DTT. A potência interferente devida ao  $\ell$ -ésimo WSD, em dBm, é dada por

$$i_\ell = P_\ell - L_\ell + g(\theta_\ell) + \rho(\Delta f) \quad (10)$$

onde  $P_\ell$  é a e.i.r.p. transmitida pelo WSD interferente em dBm,  $L_\ell$  é a perda de propagação em dB,  $g(\theta_\ell)$  é o ganho da antena DTT na direção do WSD interferente em dBi,  $\theta_\ell$  é o ângulo de chegada da interferência,  $\rho(\Delta f)$  é razão de proteção devida à separação de frequência  $\Delta f$  entre os canais DTT e WSD também em dB. De novo a perda de propagação  $L_\ell$  é calculada pelo modelo Hata estendido [6], sendo modelada como uma v.a. Gaussiana. Considerando-se  $N$  WSDs interferentes, a potência interferente agregada afetando o receptor DTT (em dBm) é dada por

$$i_{agg} = 10 \log \left( \sum_{\ell=1}^N 10^{i_\ell/10} \right) \quad (11)$$

Note, a partir de (11), que sendo  $L_\ell$  uma variável aleatória gaussiana,  $i_\ell$  será também uma variável aleatória gaussiana. Assim, as parcelas do somatório em (11), expressas em miliWatts, são modeladas por variáveis aleatórias com distribuição lognormal. Como consequência, a potência interferente agregada, expressa em miliWatts, corresponde à soma de variáveis aleatórias lognormais estatisticamente independentes.

Não existe uma expressão analítica para a função densidade de probabilidade da soma de v.a. lognormais, sendo necessária a utilização de aproximações. Neste trabalho, o método de aproximação de Schwartz-Yeh [8] é utilizado por apresentar uma boa aproximação para sistemas rádio na faixa de UHF [9]. A método de Schwartz-Yeh aproxima a função densidade de probabilidade da soma de variáveis aleatórias lognormais por uma v.a. com distribuição lognormal. Consequentemente, a potência interferente agregada  $i_{agg}$  em (11) é uma v.a. Gaussiana.

Note que a  $i_{agg}$  é dependente das localizações  $\{\mathbf{r}_\ell, \ell = 1, \dots, N\}$  dos WSDs, cada uma delas representada pelo par (longitude, latitude). As posições geográficas dos  $N$  WSDs pode então ser representada pelo vetor  $2N$ -dimensional

$$\mathbf{r} = (\mathbf{r}_1^T \quad \mathbf{r}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{r}_N^T)^T \quad (12)$$

Dadas as localizações geográficas de todos os WSD interferentes, ou seja, dado  $\mathbf{r} = \mathbf{R}$ , o método de Schwartz-Yeh

fornece a média e a variância condicionais da variável aleatória  $i_{agg}$ , definidas por

$$m_{i_{agg}|\mathbf{r}=\mathbf{R}} = E[i_{agg}|\mathbf{r}=\mathbf{R}] \quad (13)$$

$$\sigma_{i_{agg}|\mathbf{r}=\mathbf{R}}^2 = E\left[(i_{agg} - m_{i_{agg}|\mathbf{r}=\mathbf{R}})^2 | \mathbf{r}=\mathbf{R}\right] \quad (14)$$

Considerando-se que as posições dos WSDs, dadas pelo vetor  $\mathbf{r}$ , são aleatórias, a função densidade de probabilidade da potência interferente agregada pode ser escrita como

$$p_{i_{agg}}(I) = \int_{\Omega_r} p_{i_{agg}|\mathbf{r}=\mathbf{R}}(I) p_{\mathbf{r}}(\mathbf{R}) d\mathbf{R} \quad (15)$$

onde  $p_{\mathbf{r}}(\mathbf{R})$  denota a função densidade de probabilidade do vetor  $\mathbf{r}$ .

A função distribuição de probabilidade complementar da variável  $i_{agg}$  é então dada por

$$C_{i_{agg}}(I) = P(i_{agg} > I) = \int_{\Omega_r} p_{\mathbf{r}}(\mathbf{R}) \int_I^\infty p_{i_{agg}|\mathbf{r}=\mathbf{R}}(u) du d\mathbf{R} \quad (16)$$

Observando que a função densidade de probabilidade condicional em (16) é uma gaussiana com média e variância dadas respectivamente por (13) e (14), obtém-se

$$C_{i_{agg}}(I) = \int_{\Omega_r} p_{\mathbf{r}}(\mathbf{R}) Q\left(\frac{I - m_{i_{agg}|\mathbf{r}=\mathbf{R}}}{\sigma_{i_{agg}|\mathbf{r}=\mathbf{R}}}\right) d\mathbf{R} \quad (17)$$

### C. Modelagem da e.i.r.p. do WSD

O cálculo da  $i_{agg}$  desenvolvido na seção anterior utiliza o valor da e.i.r.p.  $P_\ell$  transmitida por cada um dos WSDs. O relatório ECC.186 [3] sugere que os valores de  $P_\ell$  sejam determinados dividindo-se a e.i.r.p. regulatória de uma célula, dada por (9), entre os WSDs localizados dentro da mesma. Assim, o primeiro método considerado neste trabalho para a determinação de  $P_\ell$  divide a e.i.r.p. regulatória igualmente entre os WSDs ativos na célula. Este método foi utilizado na obtenção dos resultados em [7]. Note que, neste método, o aumento do número de WSDs dentro da célula determina a redução do valor de  $P_\ell$ . Esta redução da e.i.r.p.  $P_\ell$  pode implicar na redução da taxa de transmissão do WSD, assim, uma e.i.r.p. mínima operacional  $P_{min}$  é definida para que os WSDs possam operar com uma taxa de transmissão adequada. A e.i.r.p.  $P_\ell$  de cada WSD dentro de uma determinada célula, por exemplo a Célula 0, é dada por

$$P_\ell = E_0 - 10 \log(N_0) \quad (18)$$

onde  $E_0$  é a e.i.r.p. regulatória da célula e  $N_0$  é o número de WSDs ativos na Célula 0.

Um método alternativo proposto neste trabalho para a determinação de  $P_\ell$ , modela as e.i.r.p. dos WSDs de uma mesma célula como variáveis aleatórias estatisticamente independentes. Assim, este novo método reflete uma situação mais realista onde a e.i.r.p. dos WSDs de uma mesma célula não têm o mesmo valor já que a tecnologia atual permite o uso de potências de transmissão que podem variar de acordo com o tipo e a qualidade do serviço. Neste método considera-se que a soma das e.i.r.p. dos WSDs de uma mesma célula pode ultrapassar o valor regulatório da célula, desde que com uma

pobabilidade  $p$  muito pequena, ou seja, tem-se, para a Célula 0

$$P\left(\sum_{\ell=1}^{N_0} P_{\ell} > E_0\right) < p \quad (19)$$

Além disso, o método considera duas outras restrições:

- de acordo com o Regulamento da Ofcom (Item A11.50), durante 90% do tempo o WSD opera abaixo de 8 dBm, o que sugere a restrição

$$P(P_{\ell} > 8 \text{ dBm}) = 0.1 \quad (20)$$

- a probabilidade de um WSD operar com uma e.i.r.p. inferior a  $P_{min}$  é muito pequena, ou seja,

$$P(P_{\ell} < P_{min}) = 0.01 \quad (21)$$

De modo a possibilitar que o método de cálculo Schwartz-Yeh continue sendo aplicado na determinação do comportamento estatístico da potência interferente agregada, este novo método considera uma distribuição normal para as variáveis aleatórias  $P_{\ell}$ . Isto se deve à restrição do método de Schwartz-Yeh onde as interferências  $i_{\ell}$  no somatório em (11) são necessariamente v.a. gaussianas. Considerando-se as restrições em (20) e (21), obtém-se os valores da média e do desvio padrão das variáveis  $P_{\ell}$ , dados respectivamente por

$$m_p = 5.16 + 0.35P_{min} \quad (22)$$

$$\sigma_p = 2.22 - 0.28P_{min} \quad (23)$$

### III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, dois cenários envolvendo a interferência de WSDs em receptores DTT são analisados. No primeiro deles (Cenário 1), o comportamento estatístico da potência interferente agregada afetando uma dada célula, por exemplo a Célula 0, é obtido utilizando-se (17) e o valor de  $C_{i_{agg}}(Z_0) = P(i_{agg} > Z_0)$  é determinado para diferentes densidades de WSDs. Num segundo cenário (Cenário 2) a probabilidade de atendimento ao critério de interferência em (2) é calculada considerando-se um processo preestabelecido de admissão de novos WSDs que adota a restrição da e.i.r.p. regulatória da metodologia Ofcom. Os parâmetros técnicos utilizados em ambos os cenários são apresentados na Tabela I.

Ambos os cenários apresentam três transmissores DTT co-localizados operando em canais de frequências diferentes (canais 24, 27 e 29). Um canal de frequência adjacente aos canais dos transmissores DTT (Canal 26) foi escolhido para a transmissão dos WSDs. Considerou-se um receptor DTT vítima localizado na célula central da região de trabalho, aqui designada Célula 0. Esta célula central é também, a célula de admissão do novo WSD. A função distribuição de probabilidade complementar da potência interferente agregada em (17) é calculada, considerando-se que os WSDs são distribuídos espacialmente de acordo com um processo pontual de Poisson homogêneo (PPP) bidimensional [10] [11]. A integral em (17) foi obtida utilizando-se o Método de Monte Carlo, tendo sido consideradas 1000 amostras do PPP. A Figura 4 mostra os resultados obtidos para o Cenário 1 utilizando os dois métodos de e.i.r.p. definidos na Seção II-C. Note que o critério de

TABELA I  
PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
Número de transmissores DTT	3
Canais de frequência DTT	24, 27, 29
Canal de frequência WSD	26
Método de cálculo campo elétrico DTT [12]	ITU-R P.1546-5
Distância receptor DTT vítima	35 km
Azimute receptor DTT vítima	270 graus
Diagrama de irradiação da antena DTT [13]	ITU-R BT.419-3
Tabela <i>protection rate</i>	low - classe 1
Método - perda de propagação [6]	extended Hata
<i>Clutter</i> - perda de propagação	urbano
Método de distribuição espacial WSD [11]	PPP
Número de amostras PPP por densidade	1000
e.i.r.p. mínima WSD $P_{min}$	5 dBm
Limite do critério de admissão $p$	0.01
e.i.r.p. WSD - média $m_p$	6.9 dBm
e.i.r.p. WSD - desvio padrão $\sigma_p$	0.8 dBm
Dimensões região de trabalho	4km x 4km
Altura antena DTT	10 m
Altura antena WSD	30 m

interferência em (2) tem o valor de  $10^{-2}$  como valor limite. Este valor é também indicado na Figura 4 onde observa-se que o método de e.i.r.p. determinístico viola o critério de interferência (CI) para todas as densidades, enquanto, o método de e.i.r.p. por v.a. viola o CI para densidades maiores do que de 18 WSD/km<sup>2</sup>.

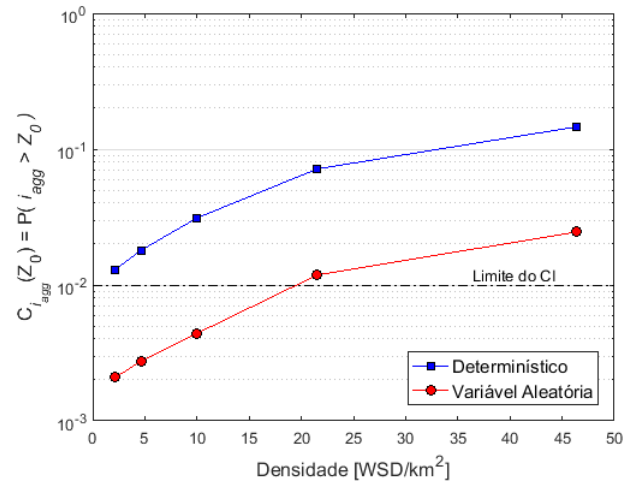


Fig. 4. Probabilidade da interferência agregada  $i_{agg}$  ser maior que a interferência intersistema limite  $Z_0$  em função da densidade para os métodos de e.i.r.p. determinístico e por variável aleatória. O gráfico utiliza o canal de frequência DTT 27 e as densidades  $\lambda = \{2.15, 4.64, 10, 21.5, 46.4\}$  WSD/km<sup>2</sup>.

No Cenário 2, um procedimento para admissão de um novo WSD (WSDo) é desenvolvido para cada um dos métodos de e.i.r.p. definidos na Seção II-C. O procedimento de admissão do método de e.i.r.p. determinístico é realizado através dos seguintes passos:

- WSDo faz a requisição de admissão;
- WSDb calcula a e.i.r.p. regulatória  $E_0$  da Célula 0 em que o WSDo está localizado através de (9);
- WSDb calcula a e.i.r.p.  $P_{\ell}$  de cada WSD na Célula 0

através de (18).

- (iv) WSDB avalia critério de admissão em (24). Caso  $P_\ell$  não tenha sido reduzida abaixo de  $P_{min}$ , então WSDo é admitido. Caso contrário, WSDo é bloqueado.

$$P_\ell \geq P_{min} \quad (24)$$

O procedimento de admissão do método de e.i.r.p. por v.a. segue o procedimento do método anterior, alterando os dois últimos passos para

- (iii) WSDB carrega parâmetros da e.i.r.p.  $P_\ell \sim N(m_p, \sigma_p)$ ;  
 (iv) WSDB avalia critério de admissão em (19). Caso o critério seja atendido, o WSDo é admitido. Caso contrário, o WSDo é bloqueado.

Para o segundo método de determinação dos valores de  $P_\ell$  (v.a.), foi adotada uma e.i.r.p. mínima operacional  $P_{min} = 5$  dBm, obtendo-se, a partir de (22) e (23), os valores de  $m_p = 6.9$  dBm e  $\sigma_p = 0.8$  dBm para a média e o desvio padrão de  $P_\ell$ . Além disso foi adotado o valor 0.01 para a probabilidade  $p$  que aparece na restrição em (19).

Utilizando-se o Método de Monte Carlo, foram geradas, para diferentes valores de densidade de WSDs, 1000 amostras de um PPP. Para cada uma destas amostras, considerou-se que um novo WSD tenta ser admitido na Célula 0. Se o CI em (2) é satisfeito, o novo WSD é admitido e, caso contrário, não. A probabilidade do novo WSD atender o CI é estimada pela razão entre o número de vezes em que o novo WSD atendeu ao CI e o número de amostras do PPP consideradas (no caso 1000). A Figura 5 apresenta esta probabilidade em função da densidade de WSDs, para ambos os métodos considerados na determinação das e.i.r.p.  $P_\ell$ . Observe que

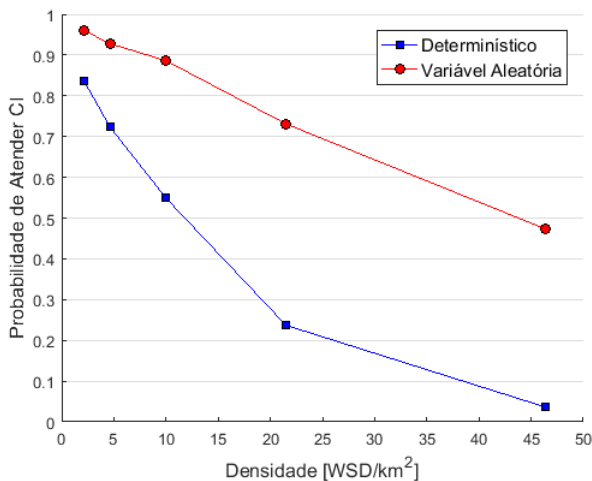


Fig. 5. Probabilidade de atender o critério de interferência (CI) em função da densidade para os métodos de e.i.r.p. determinístico e por variável aleatória. O gráfico utiliza o canal de frequência DTT 27 e as densidades  $\lambda = \{2.15, 4.64, 10, 21.5, 46.4\}$  WSD/km<sup>2</sup>.

a curva correspondente ao método determinístico apresenta uma queda bem mais acentuada do que aquela correspondente ao método por v.a, indicando um melhor desempenho deste último. Note que no método determinístico de determinação dos  $P_\ell$ , a probabilidade de atendimento ao CI pelo novo WSD cai para próximo de zero para a densidade de 46.4 WSD/km<sup>2</sup>,

indicando que, a partir desta densidade, quase todos os WSD que tentam admissão no sistema violam o CI. Já o método de determinação de e.i.r.p. por v.a. apresenta uma probabilidade de 0.48 de atendimento do CI para esta mesma densidade de WSDs (46.4 WSD/km<sup>2</sup>).

#### IV. CONCLUSÕES

Este artigo avalia a metodologia de cálculo Ofcom no atendimento ao critério de interferência, considerando a potência interferente agregada produzida por sistemas WSD em receptores DTT. Esta avaliação considera dois possíveis métodos na determinação das potências de transmissão (e.i.r.p.) dos WSDs: o método determinístico apresentado em [7] e um outro probabilístico, mais realista, no qual as e.i.r.p. dos WSDs são modeladas por variáveis aleatórias (v.a.) gaussianas, estatisticamente independentes.

A análise demonstra que, em termos do atendimento ao critério de interferência (CI), o método probabilístico apresenta melhor desempenho que o método determinístico.

Com relação à metodologia Ofcom, que calcula a e.i.r.p. regulatória de uma célula com base na interferência de entrada única (*single-entry*), foi possível verificar que, mesmo para o método probabilístico, o atendimento ao CI não é garantido. Na verdade, no método probabilístico, o CI só é atendido, em média, para densidades de WSDs menores do que 18 WSD/km<sup>2</sup>, o que demonstra a deficiência da metodologia de cálculo Ofcom no atendimento ao CI em densidades altas de WSD. Em resumo, este trabalho conclui que a metodologia Ofcom não garante a proteção dos receptores de TV digital contra a interferência agregada de múltiplos WSDs.

#### REFERÊNCIAS

- [1] A. M. Wyglinski; M. Nekovee and Y. T. Hou; *Cognitive radio communications and networks*, Elsevier, 2010.
- [2] *Technical and operational requirements for the possible operation of cognitive radio systems in the "white spaces" of the frequency band 470-790 MHz*, ECC Report 159, 2010.
- [3] *Technical and operational requirements for the operation of white space devices under geo-location approach*, ECC Report 186, 2013.
- [4] *Implementing TV white spaces*, OFCOM Statement, February 12, 2015.
- [5] *Implementing TV white spaces*, Annexes 1 to 12, OFCOM Statement, February 12, 2015.
- [6] *Hata and Hata-SRD implementation*, on-line SEAMCAT User Manual, available at "<http://tractool.seamcat.org/wiki/Manual>", on February 2015.
- [7] Lima, M. V.; Fortes, J. M. P., *Aggregate Interference from White Space Devices into Digital Television Systems*, International Conference on Computing and Network Communications, December, 2015.
- [8] S. Schwartz and Y. S. Yeh, *On the distribution function and moments of power sums with log-normal components*, Bell Syst. Tech. J., vol. 61, September, 1982.
- [9] P. Pirinen, *Statistical power sum analysis for nonidentically distributed correlated lognormal signals*, Finnish Signal Processing Symposium (FINSIG03), May, 2003.
- [10] Chiu, S. N.; Stoyan, D.; Kendall, W. S.; Mecke, J., *Stochastic geometry and its applications, Third Edition*, Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley, 2013.
- [11] Illian, J., Penttinen, A., Stoyan, H., Stoyan, D., *Statistical Analysis and Modeling of Spatial Point Patterns*, Wiley, 2008.
- [12] *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz*, Recommendation ITU-R P.1546-5, September, 2013.
- [13] *Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting*, Recommendation ITU-R BT.419-3, 1990.