

Dispositivos Secundários em Ambiente *Indoor* na Faixa de Frequência da TV Digital

Mauro Vieira de Lima e José Mauro P. Fortes

Resumo— A utilização da faixa de frequência da TV digital por dispositivos secundários foi regulamentada em vários países. Tais dispositivos devem operar utilizando canais de frequências livres sem causar interferência significativa nos dispositivos primários. O regulamento da Ofcom no Reino Unido define como premissa a proteção apenas do receptor de TV digital com antena *outdoor*. A existência tanto de receptores fixos com antena *indoor* quanto de *smartphones* com capacidade para recepção de TV digital demonstram a necessidade de proteção do serviço de TV digital no ambiente *indoor*. Essa proteção é importante uma vez que um dispositivo transmitindo em um canal de frequência adjacente pode causar interferência e indisponibilizar o serviço do receptor quando estiver próximo do mesmo. Este artigo apresenta uma solução para esta proteção através da estimação de parâmetros obtidos das mensagens transmitidas pelo receptor de TV digital. A proposta possibilita um cenário de convivência *indoor* com baixa probabilidade de interrupção do serviço de TV digital.

Palavras-Chave— compartilhamento do espectro, TV white space, perda de propagação, estimação, probabilidade de interrupção.

Abstract—The use of the digital TV frequency band by secondary devices has been regulated in several countries. Such devices must operate using free frequency channels without causing significant interference to the primary devices. The Ofcom regulation in the United Kingdom defines as a premise the protection of only the digital TV receiver with outdoor antenna. The existence of both fixed receivers with indoor antenna and smartphones capable of receiving digital TV demonstrates the need to protect the digital TV service in the indoor environment. This protection is important since a device transmitting on an adjacent frequency channel may cause interference and unavailability of the receiver service when close to it. This paper presents a solution for this protection by estimating parameters obtained from the messages transmitted by the digital TV receiver. The proposal provides a scenario of indoor coexistence with low probability of interruption of the digital TV service.

Keywords— spectrum sharing, TV white space, propagation loss, estimation, interruption probability.

I. INTRODUÇÃO

A forte demanda pelos serviços de telecomunicações sem fio tem motivado o uso dos canais de frequências liberados na migração da TV analógica para digital (dividendo digital) em um esquema de compartilhamento da banda de frequência de UHF. Os dispositivos que visam utilizar a faixa de frequência da TV digital devem trabalhar em um esquema de acesso dinâmico do espectro através da identificação de canais livres, utilizando-os de forma oportunística sem causar interferência significativa nos dispositivos primários [1].

Mauro Vieira de Lima e José Mauro P. Fortes, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) e Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Brasil, E-mails: mvieira@inmetro.gov.br, jmfortes@cetuc.puc-rio.br.

A utilização dos canais livres, chamados *TV White Spaces* (TVWS), na faixa de frequência da TV digital foi regulamentada em alguns países, entre eles EUA e Reino Unido. Os regulamentos exigem o suporte de um sistema de banco de dados com geolocalização que gerencia a admissão do dispositivo na faixa de frequência. Assim, o banco de dados recebe a informação de localização do dispositivo, através de um acesso internet fora da banda de frequência da TV digital, e retorna os TVWS disponíveis e as respectivas potências de transmissão (e.i.r.p. - *equivalent isotropically radiated power*) máximas naquela localização [2] [3]. A agência reguladora do Reino Unido, Ofcom, definiu em seu regulamento [4] [5] a metodologia de cálculo da e.i.r.p. máxima baseada na premissa de que apenas o receptor de TV digital (rTVD) com antenas *outdoor* deve ser protegido.

O sistema de TV digital apresenta hoje não só rTVD fixos com antenas *outdoor*, mas também com antenas *indoor*. Além desses, outros dispositivos como smartphones com capacidade para recepção de TV digital, também, devem ser considerados. Esses rTVD com antenas *indoor* podem ser interferidos por dispositivos secundários que compartilham o mesmo ambiente. De fato, a proximidade de um dispositivo secundário transmitindo em um canal de frequência adjacente ao do rTVD pode indisponibilizar o serviço desse receptor. Note que é necessário desenvolver uma solução que assegure a operação dos dispositivos secundários no ambiente *indoor* sem provocar a interrupção do serviço primário da TV digital. O trabalho desenvolvido aqui propõe uma solução para o problema apresentado.

Este artigo aborda na Seção II a descrição do problema e na Seção III a modelagem matemática utilizada na solução do problema. A Seção IV apresenta os resultados obtidos, sendo as conclusões apresentadas na Seção V.

II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O principal problema para garantir a proteção do rTVD em um ambiente *indoor* é o desconhecimento da localização desse receptor. Note que um sistema de localização por satélite, como o GPS, não funciona em um ambiente *indoor*.

A informação da localização de um dispositivo sem fio *indoor*, em relação a outro dispositivo, pode ser obtida utilizando medidas do i) tempo de chegada de um sinal ou da ii) potência do sinal recebido no receptor. A primeira resulta em técnicas conhecidas como TOA (*time of arrival*), TDOA (*time difference of arrival*) and AOA (*angle of arrival*). A segunda utiliza a potência de recepção RSS (*received signal strength*) para obtenção da distância estimada [6]. A vantagem dessa última técnica está na simplicidade, pois não necessita

de hardware adicional para sua implementação, sendo essa a técnica utilizada neste trabalho.

O relatório ECC.186 [7] apresentou os requisitos para a implementação de dispositivos secundários na faixa de frequência do sistema de TV digital. O relatório indica cenários para localização do rTVD que podem ser utilizados no cálculo da e.i.r.p. máxima do dispositivo secundário. Esses cenários definem o conceito de geometria de referência (G.R.). Uma G.R. leva em conta a menor separação possível, dentro das condições reais de operação, para garantir que a interferência no rTVD não seja significativa. Considerando as características de um ambiente indoor, uma G.R. adequada seria aquela que apresentasse a menor distância entre o dispositivo secundário e o rTVD como a que é apresentada no cenário 3a do anexo 2 do relatório ECC.186 e reproduzida na Figura 1.

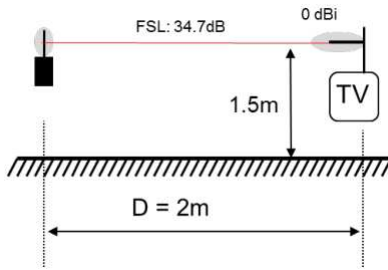


Fig. 1. Geometria de referência (G.R.) do cenário 3a no anexo 2 do relatório ECC.186. A perda de propagação (FSL) mostrada é válida para frequência de 650 MHz.

O problema na adoção da G.R. está em não ser possível garantir que o dispositivo se mantenha afastado do rTVD da distância considerada na G.R., uma vez que o dispositivo não sabe onde está localizado o rTVD. A proximidade com distâncias menores que a definida pela G.R. pode causar uma alta interferência com efeitos não lineares no rTVD que resultará na interrupção do serviço.

Note que a distância determina uma correspondente perda de propagação a partir de um modelo de propagação adequado. Ou seja, a distância mínima de separação de uma G.R. corresponde a um valor mínimo de perda de propagação. Assim sendo, uma solução para o problema é obter uma estimativa da perda de propagação real e adotar um procedimento de bloqueio da transmissão do dispositivo quando essa estimativa for inferior ao valor da perda de propagação mínima definida pela G.R.

III. MODELAGEM MATEMÁTICA

A. Estimativa da Perda de Propagação

A estimativa da perda de propagação não pode ser calculada pelo dispositivo sem a participação do rTVD, em outras palavras, eles devem se comunicar. Entretanto, o rTVD não possui capacidade de transmissão na faixa de frequência da TV digital. Assim sendo, o rTVD precisa utilizar uma tecnologia de transmissão via rádio que seja comum tanto a ele quanto ao dispositivo. Note que tanto o rTVD quanto o dispositivo secundário são equipamentos tais como smartphones,

laptops, smart TVs que possuem tecnologia Wi-Fi. Utilizamos a ubiquidade da tecnologia Wi-Fi neste trabalho para a comunicação fora da banda de TV digital entre rTVD e o dispositivo.

O rTVD deve se comunicar como um *beacon*, ou seja, enviando a mensagem periodicamente e utilizando uma mensagem de *broadcast* para que todos os dispositivos próximos possam recebê-la. A mensagem Wi-Fi deve conter i) o canal de frequência da TV digital sintonizado pelo rTVD, ii) a potência de transmissão da mensagem. A Figura 2 ilustra essa comunicação.

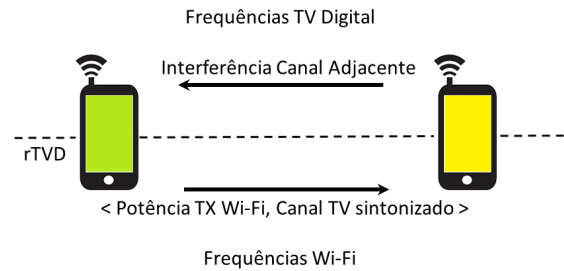


Fig. 2. O receptor de TV digital (rTVD) transmite via Wi-Fi, periodicamente, mensagens de broadcast ao dispositivo secundário para evitar a interrupção do serviço devido a interferência de canal adjacente na faixa de TV digital.

A comunicação Wi-Fi por broadcast pode ser realizada utilizando um recurso comum das estações clientes Wi-Fi que permite descobrir de forma ativa as sub-redes Wi-Fi próximas. Esta descoberta de rede utiliza uma mensagem de broadcast conhecida como *Active Probe Request* [8]. Esta mensagem possui no final do frame um campo genérico do fabricante que pode ser utilizado para enviar as informações de canal e potência.

O dispositivo secundário deve receber essa mensagem e verificar se está utilizando o canal de frequência adjacente ao do canal sintonizado pelo rTVD. Caso esteja, o dispositivo deve utilizar a potência de recepção (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*) para estimar a perda de propagação naquele canal de frequência Wi-Fi. Considerando perda em dB, potências em dBm e demais ganhos e perdas (antenas, cabos e conectores) já descontados nos valores das potências, a diferença entre a potência de transmissão P_{TX} informada na mensagem e a potência de recepção P_{RX} medida no dispositivo representa a perda de propagação estimada L no canal de frequência Wi-Fi f_{WiFi} .

$$L(f_{WiFi}) = (P_{TX} - P_{RX})_{WiFi} \quad (1)$$

O dispositivo deve fazer a conversão desta perda de propagação estimada no canal de frequência Wi-Fi para o canal de frequência da TV digital f_{TV} sintonizado pelo rTVD. Essa perda de propagação $L(f_{TV})$ pode ser calculada, utilizando o modelo de perda de propagação no espaço livre (FSL - *Free Space Loss*) [9].

$$\begin{aligned} L(f_{TV}) &= 20 \log(f_{TV}) + 20 \log(d) - 27.5 \\ L(f_{WiFi}) &= 20 \log(f_{WiFi}) + 20 \log(d) - 27.5 \end{aligned}$$

sendo frequências e distâncias dadas em MHz e metros, respectivamente. Subtraindo as equações temos

$$L(f_{TV}) = L(f_{WiFi}) + 20 \log\left(\frac{f_{TV}}{f_{WiFi}}\right) \quad (2)$$

B. Avaliação do Bloqueio da Transmissão

O modelo da perda de propagação média $\bar{L}(d)$ é descrito como

$$\bar{L}(d) = \bar{L}(d_0) + 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3)$$

sendo η o expoente da perda de propagação, d_0 a distância de referência e d a distância entre o dispositivo transmissor e o rTVD [9].

O efeito de sombreamento (*shadowing*) é adicionado a $\bar{L}(d)$ como uma variável aleatória (v.a.). Devido ao seu comportamento log-normal, o sombreamento corresponde em dB a uma v.a. Gaussiana com média zero e variância σ^2 . Assim sendo, a perda de propagação é também uma v.a. Gaussiana com $L \sim N(\bar{L}, \sigma^2)$ [6] [9]. O efeito do desvanecimento multipercurso é desconsiderado aqui devido as curtas distâncias envolvidas e ao caso de interesse que é com visada (LOS - *Line of Sight*) entre os dispositivos. Assim, adotamos o modelo de propagação FSL, utilizando $d_0 = 1\text{m}$ e $\eta = 2$, ou seja

$$L_0 = \bar{L}(d_0) = 20 \log(f_{TV}) - 27.5 \quad (4)$$

Observe na Figura 3 a aproximação de um dispositivo secundário com velocidade v , distância R para bloqueio da transmissão e tempo τ constante entre as mensagens de broadcast transmitidas pelo rTVD.

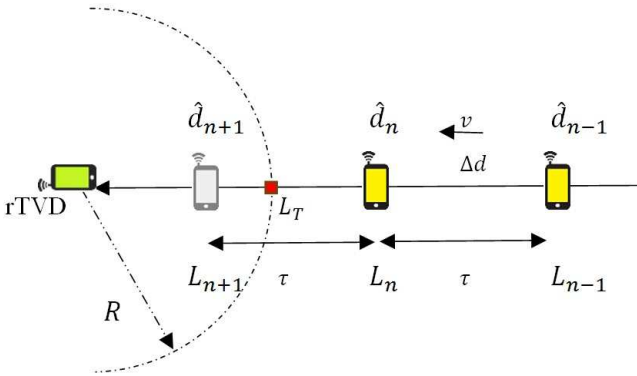


Fig. 3. Aproximação de dispositivo secundário, considerando uma distância R de bloqueio da transmissão e tempo τ entre as mensagens de broadcast do rTVD.

Sendo (L_{n+1}, L_n, L_{n-1}) as perdas de propagação nos instantes de recepção da mensagem e $(\hat{d}_{n+1}, \hat{d}_n, \hat{d}_{n-1})$ as respectivas distâncias estimadas. Seja L_T a perda de propagação limite (*threshold*) na borda da região de bloqueio ($d \leq R$). Assim, temos $L_T = \bar{L}(R)$ e a probabilidade de interrupção como

$$P(L < L_T) \quad (5)$$

Note que o dispositivo só pode se localizar em relação ao rTVD quando recebe a mensagem e calcula a perda de propagação. Caso o dispositivo aja reativamente, ele irá entrar

na região de bloqueio para depois interromper sua transmissão. Para que isso não ocorra, o bloqueio da transmissão será feito no instante anterior a entrada na região de bloqueio, ou seja, no instante n .

Seja τ pequeno ($\tau < 1\text{s}$) o suficiente para se considerar a velocidade v entre os instantes $(n, n-1)$, aproximadamente, a mesma velocidade entre os instantes $(n+1, n)$. Logo, $\Delta d = v\tau = \hat{d}_{n-1} - \hat{d}_n$ possui o mesmo valor entre os instantes $(n+1, n)$ e temos

$$\begin{aligned} \hat{d}_{n+1} &= \hat{d}_n - \Delta d \\ \hat{d}_{n+1} &= 2\hat{d}_n - \hat{d}_{n-1} \end{aligned} \quad (6)$$

Assim, o dispositivo deve parar de transmitir quando avaliar que no próximo instante $n+1$ ele irá invadir a região de bloqueio, ou seja quando $\bar{L}_{n+1} < L_T$. Para verificar essa condição o dispositivo deve calcular

$$\bar{L}_{n+1} = \bar{L}(\hat{d}_{n+1}) = \bar{L}(2\hat{d}_n - \hat{d}_{n-1}) \quad (7)$$

A estimativa das distâncias \hat{d}_n e \hat{d}_{n-1} é obtida através de um estimador de máxima verossimilhança (ML) [10].

$$\hat{d} = \underset{D}{\operatorname{argmax}} (\ln f_{L|d=D}(\mathcal{L})) \quad (8)$$

Sendo $f_{L|d=D}(\mathcal{L})$ a função densidade de probabilidade (fdp) de L dado $d = D$. A Equação (8) determina a correspondente equação ML como

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial D} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(L-\bar{L})^2}{2\sigma^2}} \right) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial D} \left(-\frac{1}{2\sigma^2} (L-\bar{L})^2 \right) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial D} (L-\bar{L})^2 &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial D} (L-L_0-20\log(D))^2 &= 0 \\ (L-L_0-20\log(D)) \left(-\frac{40}{D \ln 10} \right) &= 0 \\ L-L_0-20\log(D) &= 0 \end{aligned}$$

onde considera-se $D > 1\text{m}$ e as equações (3) e (4). Logo a estimativa da distância é dada por

$$\hat{d} = 10^{\frac{L-L_0}{20}} \quad (9)$$

C. Probabilidade de interrupção do serviço de TV digital

A probabilidade de interrupção do serviço de TV digital devido a um dispositivo secundário foi definida em (5). Note que esta probabilidade está atrelada a perda de propagação L_n , ou seja a última posição do dispositivo com recepção da mensagem antes de entrar na região de bloqueio. Observe na Figura 4 uma ilustração da fdp de L_n .

A probabilidade de interrupção corresponde a área sombreada na curva da Figura 3 limitada a direita pelo valor da perda limite L_T . Sendo $L_n \sim N(\bar{L}, \sigma^2)$, então podemos utilizar a função $Q(\cdot)$, definida como $Q(x) = P(x > X)$ para

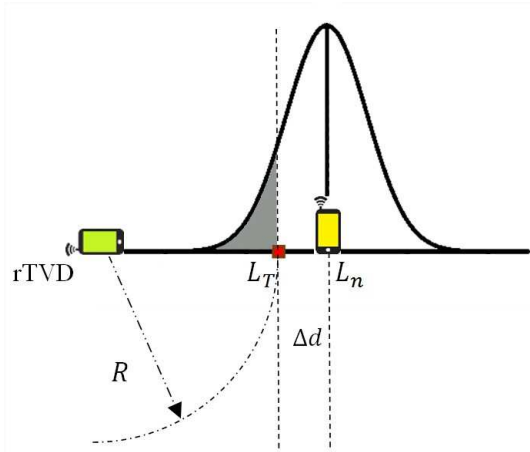


Fig. 4. Função densidade de probabilidade de L_n , indicando a área sombreada correspondente a probabilidade de interrupção do serviço de TV digital devido a aproximação de um dispositivo secundário.

$x \sim N(0, 1)$, e sua propriedade $Q(-x) = 1 - Q(x)$ [11].

$$P(L_n < L_T) = 1 - Q\left(\frac{L_T - \bar{L}}{\sigma}\right)$$

$$P(L_n < L_T) = Q\left(\frac{\bar{L} - L_T}{\sigma}\right) \quad (10)$$

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

O método apresentado para proteção do serviço de TV digital em ambiente indoor é avaliado considerando a probabilidade de interrupção como parâmetro de desempenho.

Uma simulação foi desenvolvida considerando a aproximação de um dispositivo em relação ao rTVD apresentada nas figuras 3 e 4. Nesse método a velocidade v e o período das mensagens τ são importantes variáveis que determinam a distância Δd entre o dispositivo e o limite da região de bloqueio onde o dispositivo deve interromper a sua transmissão.

A simulação associa v a velocidade do caminhar de uma pessoa variando entre 3km/h e 6 km/h, enquanto τ tem seus valores tomados entre 0.1s e 0.8s. O raio de bloqueio $R = 2m$ é adotado conforme a G.R. da Figura 1. As distâncias estimadas, a condição de interrupção ($\bar{L}_{n+1} < L_T$) e a probabilidade de interrupção $P(L_n < L_T)$ foram calculadas conforme as equações (9), (7) e (10), respectivamente. Foram consideradas antenas com 0 dBi e $\sigma = 1.5$ dB, este último utiliza a média de valores experimentais para 2m e 3m no ambiente *indoor* conforme apresentado em [12]. A Figura 5 apresenta o resultado da probabilidade de interrupção em relação a v para alguns valores de τ .

Observe que tanto o aumento de v quanto o aumento de τ reduz a probabilidade de interrupção, isso ocorre devido a essa probabilidade estar associada a proximidade Δd do dispositivo no momento do bloqueio da transmissão e Δd é diretamente proporcional a ambas as variáveis. Um limite máximo de probabilidade de interrupção poderia ser adotado definindo o valor de τ . Assim, para obter uma probabilidade inferior a 0,1 adotaria-se $\tau = 0.6$ cuja curva está sempre abaixo desse valor.

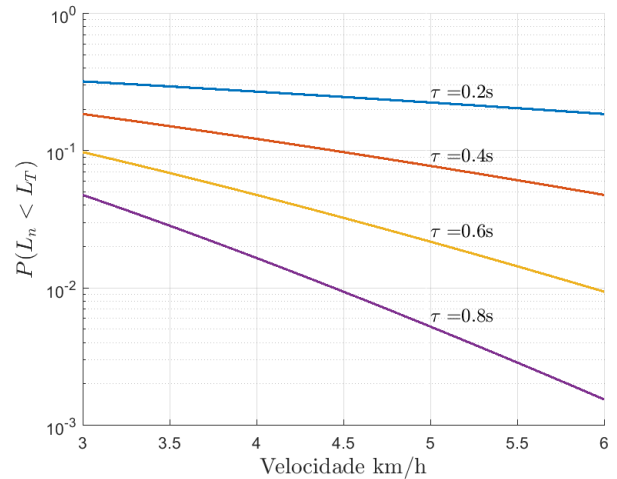


Fig. 5. Probabilidade de interrupção em relação a velocidade para alguns valores do período τ das mensagens.

A Figura 6 mostra a probabilidade de interrupção em relação a Δd para as velocidades mínima e máxima consideradas.

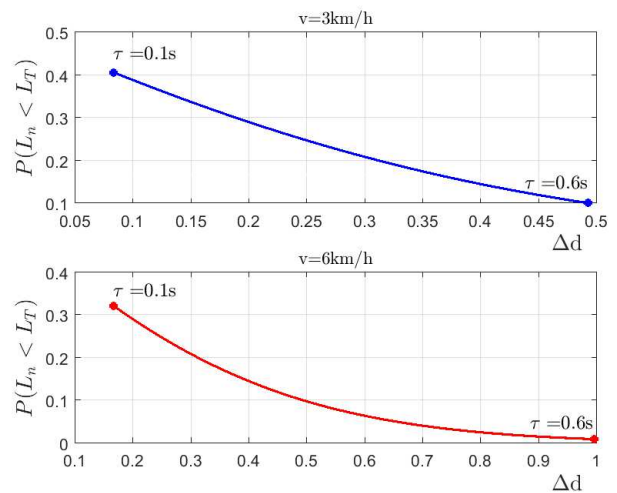


Fig. 6. Probabilidade de interrupção em relação a proximidade Δd do dispositivo no momento do bloqueio da transmissão para as velocidades mínima e máxima consideradas com τ variando de 0.1s a 0.6s.

Note que a probabilidade de interrupção é mais alta na curva com $v = 3$ km/h quando comparada a curva com $v = 6$ km/h. Isso se deve ao aumento de Δd quando a velocidade aumenta. Considere como exemplo adotar $\tau = 0.6$ s e observe que Δd irá variar entre 0.5m e 1m na faixa de velocidade de 3km/h a 6km/h. Agora, adote $\tau = 0.1$ s e note que Δd irá variar entre 0.08m e 0.16m na mesma faixa de velocidade. No primeiro exemplo, o dispositivo bloqueará sua transmissão entre 2.5m e 3m, enquanto no segundo exemplo o bloqueio ocorrerá entre 2.08m e 2.16m. Assim sendo, existe uma relação de custo-benefício na adoção de um valor para τ , uma vez que seu aumento reduz a probabilidade de interrupção e, simultaneamente, aumenta a distância Δd o que reduz a área de serviço do dispositivo secundário.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma proposta para a proteção de receptores de TV digital (rTVD) que utilizam antenas *indoor* em um cenário de compartilhamento da faixa de frequência da TV digital por sistemas secundários.

A proteção proposta é baseada no bloqueio da transmissão do dispositivo que opera no canal de frequência adjacente ao do receptor. A distância de bloqueio é definida conforme geometria de referência do relatório ECC.186 [7].

A condição de bloqueio é avaliada utilizando a perda de propagação. Esta última é estimada através das mensagens de broadcast transmitidas via Wi-Fi pelo rTVD. A probabilidade de bloqueio é calculada considerando as características de mobilidade humana em um ambiente *indoor* e a periodicidade das mensagens. O artigo demonstra que a proposta possibilita um cenário de convivência *indoor* com baixa probabilidade de interrupção do serviço no receptor de TV digital.

REFERÊNCIAS

- [1] Oh, S. W.; Ma, Y; Tao, M-H; Peh, E., *TV White Space: The First Step Towards Better Utilization of Frequency Spectrum*, Wiley-IEEE Press, 2016.
- [2] Holland, O.; Bogucka, H.; Medeisis, A., *Opportunistic spectrum sharing and white space access: the practical reality*, Wiley, 2015.
- [3] M. V. Lima, J. M. P. Fortes, *The Aggregate Interference from White Space Devices into Digital Terrestrial Television Receivers*. IET Communications, 2019.
- [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] Gezici, S., *A Survey on Wireless Position Estimation*. Wireless Personal Communication 44. 263-282, 2008.
- [7] *Technical and operational requirements for the operation of white space devices under geo-location approach*, ECC Report 186, 2013.
- [8] *IEEE standard 802.11*, IEEE, 2012.
- [9] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice-Hall, 1999.
- [10] H. L. Van Trees, *Detection, Estimation and Modulation Theory - Part I*. John Wiley & Sons, 1968.
- [11] S. L. Miller, D. Childers, *Probability and Random Processes: With Applications to Signal Processing and Communications - 2nd edn*. Elsevier, 2012.
- [12] O. G. Adewumi, K. Djouani, A. M. Kurien, *RSSI Based Indoor and Outdoor Distance Estimation for Localization in WSN*, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2013.