

Técnicas de Segurança na Camada Física para Sistemas de Comunicação Móveis Híbridos RF/VLC

Isabella W. G. da Silva
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de São Carlos
São Carlos, Brasil
isabella@estudante.ufscar.br

Diana P. Moya Osorio
Centre of Wireless Communications
University of Oulu
Oulu, Finland
diana.moyaosorio@oulu.fi

Helder Vinicius A. Galeti
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de São Carlos
São Carlos, Brasil
helder@ufscar.br

Resumo—A medida que a implementação das redes da quinta geração de comunicações móveis ocorre ao redor do mundo. Pesquisadores unem esforços para iniciar o desenvolvimento da próxima geração, o 6G. Para a sexta geração, espera-se requisitos ainda mais exigentes em termos de frequência e segurança. Nesse contexto, para este trabalho a probabilidade de *outage* de sigilo de uma rede híbrida de radio frequência (RF) e comunicação por luz visível (VLC, do inglês *visible light communications*) na presença de um espião. Assume-se que os dados são transmitidos por RF e VLC, simultaneamente, seguindo um esquema de multiplexação proposto. Além disso, ambos usuários possuem capacidades de *multi-homing*, logo, são capazes de receber dados de ambos pontos de acesso simultaneamente. Para análise do desempenho, são formuladas uma expressão em formato integral e uma expressão assintótica da probabilidade de *outage* de sigilo e ambas são validadas via simulações de Monte Carlo. Os resultados obtidos mostram que a multiplexação do sinal entre RF e VLC aumentam a performance em termos de sigilo já que, deste modo é possível aproveitar-se das melhores características de ambos os domínios.

Index Terms—comunicação por luz visível, probabilidade de *outage* de sigilo, Sistemas híbridos RF/VLC, segurança na camada física.

I. INTRODUÇÃO

A quinta geração de comunicações móveis (5G) representa um avanço significativo quando comparada a gerações anteriores. Entretanto, conforme a implementação das redes 5G ocorre e a sociedade torna-se ainda mais dependente das comunicações móveis, espera-se que surjam novos casos de uso e desafios. Desse modo, pesquisadores iniciaram o desenvolvimento de sua sucessora, a sexta geração (6G). É esperado que o 6G tenha um papel ainda mais expressivo e integrado na sociedade, oferecendo serviços com latências ainda mais baixas, armazenamento ilimitado e enormes capacidades cognitivas [1]. Além disso, mesmo que as pesquisas de 6G estejam em suas etapas iniciais, pode-se afirmar que, devido a escassez de espectro, explorar frequências superiores a 100 GHz será um dos requerimentos de implementação.

Dessa forma, com um intervalo de frequências não licenciadas entre 400 e 800 THz, as comunicações por luz visível (VLC, do inglês *visible-light communications*) tem

emergido como uma das mais promissoras tecnologias e tem atraído grande atenção, principalmente pelos avanços em diodos emissores de luz (LED, do inglês *light emitting diodes*) e suas vantagens de uso, como a capacidade de prover iluminação e transmissão de dados simultâneas, alta eficiência energética e longa vida útil. Além destes, o VLC possui outras características interessantes como a privacidade e segurança inerente, custo reduzido e transmissões em alta velocidades [2], [3]. Entretanto, mesmo com características interessantes, ainda há diversas limitações que devem ser consideradas para a utilização desta tecnologia em cenários práticos. Dentre elas, pode-se citar a cobertura limitada e a instabilidade de conexão entre o transmissor e usuário [4]. Para superar tais limitações, diversos autores propõem cenários híbridos, combinando o uso de comunicações em VLC e também em rádio frequência (RF) [2], [5], [6]. Em [2], através de uma investigação experimental, os autores apresentam uma rede de comunicação sem fio ótica e de RF reconfigurável, na qual o sistema é capaz de adotar dinamicamente o melhor modo de transmissão com base em regras de transferência predefinidas, e.g., falhas no enlace ou políticas locais. Os autores em [5] apresentam a comparação entre um sistema híbrido RF/VLC e uma rede que utiliza apenas a tecnologia VLC. Desse modo, neste trabalho, nota-se que há um ganho considerável em termos de conectividade média e vazão do sistema ao considerar o modelo híbrido. Além disso, em [6], a performance de um sistema híbrido RF/VLC sob restrições estatísticas de qualidade de serviço (QoS, do inglês *quality of service*) é avaliada em termos da máxima taxa média de chegada ao transmissor.

Por outro lado, com a introdução de tecnologias disruptivas e serviços modernos, a garantia de segurança e privacidade será, sem dúvidas, um dos requisitos chave para as futuras redes 6G. Logo, as técnicas tradicionais de criptografia podem não ser aplicáveis ou suficientes para as mais diversas aplicações, especialmente para cenários com algum tipo de restrição [7]. Neste sentido, a segurança na camada física (PLS, do inglês *physical layer security*) tem emergido com uma candidata para complementar a segurança das

comunicações sem fio atuais, atuando junto a criptografia tradicional. A PLS foca nas propriedades físicas do canal, aproveitando-se de fenômenos como desvanecimento e interferência para fornecer maior segurança às redes sem fio. Desta maneira, o uso de técnicas de PLS para redes VLC com restrições de sigilo vem ganhando bastante interesse [8], [9]. Em [8], os autores derivam os limites superior e inferior da capacidade de sigilo de uma rede VLC *indoor* na presença de um espião. Em [9], a probabilidade de *outage* de sigilo (SOP, do inglês *secrecy outage probability*) de uma rede VLC com informação do estado do canal (CSI, do inglês *channel state information*) imperfeita na presença de um espião é investigada. Além disso, cenário híbridos VLC/RF com restrições de sigilo foram investigados em [10]–[12]. Por exemplo, em [10], investiga-se o desempenho em termos da capacidade de sigilo média de um sistema híbrido VLC/RF na presença de um espião. Para garantir a segurança, os autores propõem um esquema de seleção de enlace baseado na disponibilidade de uma taxa de sigilo positiva ao enlace de VLC. Em [11] e [12], os autores propõem algoritmos de PLS baseados em *beamforming* para não permitir que o espião receba a informação oriunda tanto de VLC como RF.

Neste sentido, para este trabalho, pretende-se complementar o estudo de cenários híbridos VLC/RF com restrições de sigilo. Para isso, a SOP de um sistema híbrido VLC/RF *indoor* na presença de um espião é investigado. As principais contribuições deste trabalho são: i) Propõe-se um esquema de multiplexação no qual os dados enviados pela fonte são divididos de acordo com um fator de alocação; ii) Para analisar o efeito de parâmetros importantes no desempenho do sistema, derivou-se uma expressão em forma integral da SOP; iii) Para averiguar a ordem de diversidade do sistema, obteve-se uma expressão assintótica em forma fechada da SOP. Ademais, para corroborar as expressões analíticas, simulações de Monte Carlo são executadas.

Notação: Ao longo deste trabalho utiliza-se, respectivamente, $f_X(\cdot)$ e $F_X(\cdot)$ para simbolizar a função densidade de probabilidade (PDF, do inglês *probability density function*) e a função de distribuição acumulada (CDF, do inglês *cumulative density function*) de uma variável aleatória X ; $\mathbb{E}[\cdot]$ simboliza a esperança; e $[x]^+ = \max(x, 0)$.

II. MODELO DO SISTEMA

Assume-se uma rede de comunicação híbrida VLC/RF como ilustrado na Fig. 1. Neste sistema, considera-se uma fonte de dados que provê conexão através dos pontos de acesso de comunicação por RF e por VLC, ao usuário legítimo (Bob) e ao usuário espião (Eve). Primeiramente, a fonte recebe os dados da internet e em seguida, os envia em janelas de T segundos para ambos usuários seguindo uma dada estratégia de transmissão. Ambos usuários, Bob e Eve, são equipados com um *front-end* RF e com um fotodiodo e possuem habilidades de *multi-homing*, i.e. podem receber dados de ambos pontos de acesso simultaneamente. Além disso, sabendo que a área de cobertura do ponto de acesso de VLC é geralmente menor

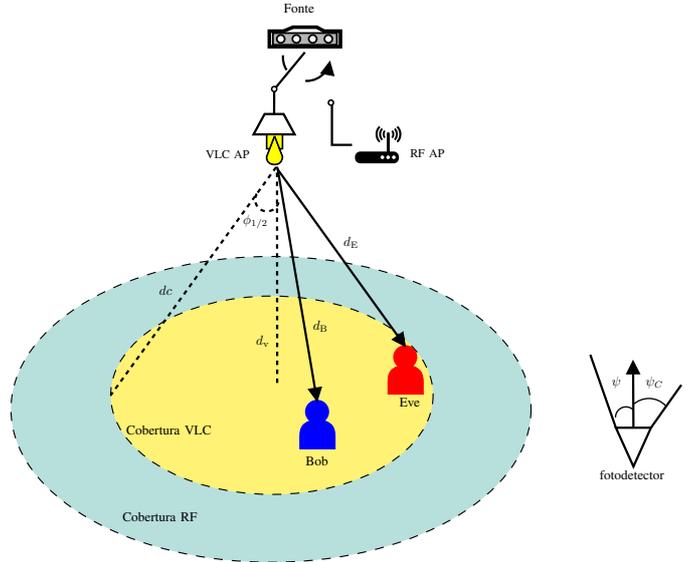


Figura 1. Modelo do Sistema

quando comparada com a de RF, assume-se que as áreas de cobertura de VLC e de RF são sobrepostas [13].

A seguir, serão descritos os canais de RF e de VLC. Ademais, ao longo das análises numéricas, assume-se Bob como B e Eve como E para simplificar as notações.

A. Modelo do Canal de RF

Ao considerar um cenário *indoor*, sabe-se que há maior possibilidade de ocorrência de componentes de linha de visada (LoS, do inglês *Line-of-Sight*). Logo, para levar em consideração estas componentes, assume-se que todos os enlaces de RF experimentam desvanecimento do tipo Rice [14]. Sendo assim, os coeficientes dos canais entre $S \rightarrow B$ e $S \rightarrow E$, simbolizados por h_B^{rf} e h_E^{rf} , respectivamente, são modelados com fator Riciano K_i e parâmetro de amplitude de Ω_i dado pelo ganho médio do canal correspondente, isto é, $\Omega_i = \mathbb{E}\{|(h_i^{rf})|^2\}$ com $i \in \{B, E\}$. A partir destas considerações, o sinal recebido em B e em E podem ser expressos como

$$y_i^{rf}(t) = \sqrt{P^{rf}} s^{rf}(t) h_i^{rf}(t) + n_i^{rf}(t) \quad (1)$$

Onde $s^{rf}(t)$ corresponde ao sinal de informação e P^{rf} a potência total de transmissão do ponto de acesso de RF. $n_i^{rf}(t)$ é o ruído observado no *front-end* dos receptores RF, modelado como ruído aditivo gaussiano branco (AWGN, do inglês *additive white gaussian noise*) com potência média N_0 . Além disso, as amostras de ruído $\{n_i^{rf}(t)\}$ são consideradas independentes e identicamente distribuídas. Assume-se também que o sinal de informação $s^{rf}(t)$ possui potência média unitária, isto é $\mathbb{E}\{|s^{rf}(t)|^2\} = 1$. Ademais, considera-se que os canais apresentam desvanecimento em blocos e que $h_i^{rf}(t)$ permanece fixo durante uma janela de transmissão (T segundos) e varia independentemente de uma janela para a outra. Para simplificar a notação, define-se $g_i^{rf} \triangleq |h_i^{rf}|^2$ para $i \in \{B, E\}$ como sendo os ganhos dos canais. Portanto,

a relação sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*) recebida em Bob e Eve são dadas por $\gamma_i^{\text{rf}} = \gamma_P |h_i^{\text{rf}}|^2$ com $i \in \{\text{B}, \text{E}\}$. Onde $\gamma_P = P^{\text{rf}}/N_0$ é a SNR total de transmissão com respeito ao transmissor RF.

B. Modelo do Canal de VLC

Assume-se que o transmissor emprega modulação por intensidade de detecção direta (IM/DD, do inglês *intensity modulation/direct detection*). Em (IM/DD), o diodo emissor de luz (LED, do inglês *light emitting diode*) varia a intensidade da luz emitida com respeito ao sinal a ser transmitido. Além disso, o front-end de VLC em Bob e Eve são equipados com um fotodetector que possui a capacidade de gerar uma corrente elétrica proporcional a intensidade de luz coletada. Ademais, os canais VLC são tipicamente compostos de componentes de Linha de Visada (LoS, do inglês *Line-of-Sight*) e de multi-percurso. Entretanto, em cenários *indoor*, normalmente a maioria da energia coletada pelos foto-diodos (acima de 95%) é proveniente das componentes de linha de visada [15]. Desse modo, assume-se que o canal de VLC é plano, com uma componente de linha de visada dominante e o ganho do canal não varia durante a transmissão de dados, desde que os receptores estejam em posições fixas. Portanto, a relação entrada-saída do canal VLC entre o ponto de acesso VLC no transmissor e o foto-diodo dos receptores em um instante de tempo t é dado a seguir:

$$y^{\text{vlc}}(t) = s^{\text{vlc}}(t)h^{\text{vlc}} + n^{\text{vlc}} \quad (2)$$

Onde $s^{\text{vlc}} \in \mathbb{R}^+$ é a intensidade de luz emitida pelo LED, que possui valor médio limitado superiormente como sendo $\mathbb{E}\{s^{\text{vlc}}\} = P^{\text{vlc}}$ devido a medidas de segurança. Além disso, $h^{\text{vlc}} \in \mathbb{R}^+$ é o ganho do canal óptico, invariante no tempo e dependente somente das posições dos usuários. Semelhantemente ao canal de RF, n^{vlc} é modelado como AWGN, com potência média N_0 . Também é assumido que o ponto de acesso VLC segue um padrão de irradiação Lambertiano e que o ponto de acesso é direcionado para baixo e o fotodetector dos usuários é direcionado para cima. Logo, o ganho do canal a uma dada distância entre o ponto de acesso, Bob e Eve é expresso por [16]

$$h_i^{\text{vlc}} = \frac{(m+1)AD(\psi)r^2 d_v^{m+1}}{2\pi \sin^2(\psi_C) d_i^{m+3}} \text{rect}(\psi/\psi_C) \quad (3)$$

Onde d_i com $i \in \{\text{B}, \text{E}\}$ é a distância do transmissor ao receptor, A denota a área física do detector, ψ e ψ_C são, respectivamente, o ângulo de incidência em relação ao eixo normal do plano do receptor, e o ângulo do campo de visão (FOV, do inglês *field of view*) do fotodetector. $D(\psi)$ é o ganho do filtro óptico, e r é o índice de refração. $m = -1/\log_2(\cos(\phi_{1/2}))$ representa a ordem de emissão Lambertiana, onde $\phi_{1/2}$ é o ângulo de visão de meia intensidade do LED. Ademais, $\text{rect}(z)$ é uma função retangular, na qual, $\text{rect}(z)=1$ se $z \leq 1$ e $\text{rect}(z)=0$ caso contrário.

Seguindo a conversão dos termos ópticos para elétrico, a SNR nos receptores VLC podem ser definidas como [17]

$$\gamma_i^{\text{vlc}} = \frac{(\rho P^{\text{vlc}} h_i^{\text{vlc}})^2}{k^2 N_0} \quad (4)$$

Onde ρ é o fator de eficiência de conversão óptica para elétrica do fotodetector e k é a razão entre a potência óptica média e a potência elétrica média do sinal transmitido, que segue a seguinte relação [18]

$$k = P^{\text{vlc}} / \sqrt{P_{\text{ele}}} \quad (5)$$

III. MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta seção é apresentada uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* de sigilo do sistema híbrido RF/VLC em estudo. Para isso, é preciso, primeiramente, definir a capacidade de sigilo.

Definição 1.: A capacidade de sigilo é definida como a diferença entre a capacidade do canal legítimo com o canal espião. Logo, a capacidade de sigilo para os canais RF e VLC são dadas, respectivamente, por [19], [20]:

$$C_s^{\text{rf}} = [C_L^{\text{rf}} - C_E^{\text{rf}}]^+ = \log_2 \left(\frac{1 + \gamma_B^{\text{rf}}}{1 + \gamma_E^{\text{rf}}} \right), \quad (6)$$

$$C_s^{\text{vlc}} = \frac{1}{2} [C_L^{\text{vlc}} - C_E^{\text{vlc}}]^+ = \frac{1}{2} \left[\log_2 \left(\frac{1 + c^2 \gamma_B^{\text{vlc}}}{1 + c^2 \gamma_E^{\text{vlc}}} \right) \right]^+, \quad (7)$$

Onde c é uma constante relacionada com a distribuição do sinal transmitido pelo ponto de acesso de VLC [21]. Além disso, assume-se que ambos pontos de acesso tem total conhecimento do CSI de ambos enlaces com Bob e Eve em cada janela. A estimação do canal é realizada pelos receptores e enviada ao transmissor através de um canal de retorno sem atraso e sem erro. [6].

A. Probabilidade de Outage de Sigilo

Definição 2.: Para a configuração proposta, o sistema esta em *outage* de sigilo se a capacidade de sigilo C_s for menor que uma taxa de sigilo alvo, \mathcal{R}_s .

Como já previamente discutido na Seção II, assume-se que ambos usuários possuem capacidades de *multi-homing*. Portanto, sabendo desta consideração, um esquema de transmissão baseado em multiplexação é proposto no qual o fluxo de dados é dividido de acordo com a razão $\delta:(1-\delta)$ com $\delta \in (0, 1)$ e transmitido através dos canais de RF e VLC simultaneamente em cada janela. Vale ressaltar que pode-se considerar que este cenário trata-se de um modelo prático já que a luz e as ondas de RF não causam interferência entre si [22]. Ademais, considera-se também que, para ambos enlaces, a máxima taxa de transmissão é dada pela capacidade de sigilo do canal, isto é, $\mathcal{R}_s^i = C_s^i$ com $i \in \{\text{B}, \text{E}\}$. Desse modo, a taxa de transmissão total em cada janela é dada pela soma das taxas de transmissão

de ambos enlaces. Logo, tendo em vista todas as considerações feitas e a partir de (6) e (7), a SOP pode ser escrita como

$$\begin{aligned} \text{SOP} &= \Pr(C_s < \mathcal{R}_s) = \Pr(\delta C_s^{\text{rf}} + (1 - \delta) C_s^{\text{vlc}} < \mathcal{R}_s) \\ &= \Pr\left(C_s^{\text{rf}} < \frac{\mathcal{R}_s}{\delta} - \frac{(1 - \delta)}{\delta} C_s^{\text{vlc}}\right) \\ &= \Pr\left(\frac{1 + \gamma_B^{\text{rf}}}{1 + \gamma_E^{\text{rf}}} < 2 \frac{\mathcal{R}_s}{\delta} - \frac{(1 - \delta)}{\delta} C_s^{\text{vlc}}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Novamente, a partir da Seção II, sabe-se que $|h_i^{\text{rf}}|$ com $i \in \{B, E\}$, experimenta desvanecimento do tipo Rice. Logo, o ganho dos canais RF g_i^{rf} , com $i \in \{B, E\}$ seguem a distribuição qui-quadrada não central, com CDF e PDF dadas, respectivamente, por

$$\begin{aligned} F_{g_i^{\text{rf}}}(x) &= 1 - Q_1\left(\sqrt{\frac{2}{K}} x, x \sqrt{\frac{2(K+1)}{\Omega}}\right), \quad (9) \\ f_{g_i^{\text{rf}}}(x) &= \frac{(K+1) \exp\left(-K - \frac{(K+1)x}{\Omega_i^{\text{rf}}}\right) I_0\left(2\sqrt{\frac{K(K+1)x}{\Omega_i^{\text{rf}}}}\right)}{\Omega_i^{\text{rf}}}, \quad (10) \end{aligned}$$

Proposição 1. *Uma expressão em forma integral para a SOP de um sistema híbrido VLC/RF na presença de um espião é dada por*

$$\begin{aligned} \text{SOP} &= 1 - \int_0^\infty \frac{(K_E + 1) e^{-\frac{g_E^{\text{rf}}(K_E + 1)}{\Omega_E} - K_E} I_0\left(2\sqrt{\frac{g_E^{\text{rf}} K_E (K_E + 1)}{\Omega_E}}\right)}{\Omega_E} \\ &\quad \times Q_1\left(\sqrt{2K_B}, \sqrt{\frac{2\left((\gamma_P g_E^{\text{rf}} + 1) 2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{vlc}} + \mathcal{R}_s}{\delta}} - 1\right)}{(K_B + 1)^{-1} \gamma_P \Omega_B}}\right) dg_E^{\text{rf}} \end{aligned} \quad (11)$$

Onde $I_0(\cdot)$ representa a função Bessel de primeira ordem modificada [23, Eq. 8.447.1] e $Q_1(\cdot; \cdot)$ equivale a função Marcum-Q de primeira ordem [24, Eq. 4.34]

Demonstração. Para obter a expressão em forma integral da SOP do sistema, primeiramente, deve-se reescrever (8) como sendo

$$\begin{aligned} \text{SOP} &= \Pr\left(g_B^{\text{rf}} < \frac{(\gamma_P g_E^{\text{rf}} + 1) 2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{vlc}} + \mathcal{R}_s}{\delta}} - 1}{\gamma_P} \mid g_E^{\text{rf}} > 0\right) \\ &\quad \times \Pr(g_E^{\text{rf}} > 0) \\ &= \int_0^\infty F_{g_B^{\text{rf}}}\left(\frac{(\gamma_P g_E^{\text{rf}} + 1) 2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{vlc}} + \mathcal{R}_s}{\delta}} - 1}{\gamma_P}\right) f_{g_E^{\text{rf}}}(g_E^{\text{rf}}) dg_E^{\text{rf}} \end{aligned} \quad (12)$$

Portanto, considerando a CDF e PDF previamente descritas em (9) and (10), respectivamente. E após algumas simplificações, obtém-se (11). \square

Tabela I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Subsistema de RF	
SNR de transmissão, γ_P	20 dB
Expoente de Perda de Percurso, ϕ	1.8
Subsistema de VLC	
Distância Vertical, d_v	2.5 m
FOV do fotodetector, ψ_C	90°
Potência média emitida, P^{vlc}	9 W
Area física do fotodetector, A	1 cm ²
fator de eficiência de conversão, ρ	0.53 A/W
índice de refração, r	1.5
ganho do filtro óptico, $D(\psi)$	1
Ângulo de visão de meia intensidade do LED, $\phi_{1/2}$	60°
densidade espectral da potência do ruído, N^{vlc}	10^{-21} A ² / Hz
Razão entre a potência opt./Eletric., k	3
Constante c	$\sqrt{e/2\pi}$

B. Assíntota da SOP

Para obter maior conhecimento sobre a ordem de diversidade de sigilo obtida pelo sistema em investigação, uma expressão que determina o comportamento de outage de sigilo em alta SNR é proposto a seguir.

Proposição 2. *Uma expressão assintótica para a SOP de um sistema híbrido VLC/RF na presença de um espião é dada por (13), exibida ao topo da próxima página.*

Demonstração. Considerando o regime de alta SNR (i.e., com $\gamma_P \rightarrow \infty$) (12) pode ser reescrita como sendo

$$\text{SOP}^\infty = \int_0^\infty F_{g_B^{\text{rf}}}\left(2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{vlc}} + \mathcal{R}_s}{\delta}} g_E^{\text{rf}}\right) f_{g_E^{\text{rf}}}(g_E^{\text{rf}}) dg_E^{\text{rf}}. \quad (14)$$

Dessa forma, assim como em [25], baseando-se em [26, Eq. 3.5] e após as devidas substituições e simplificações, (13) é obtida. \square

Observação 1. A partir da expressão em (13) é possível notar que o comportamento assintótico do *outage* do sistema é independente de γ_P . Conseqüentemente, o ordem de diversidade de sigilo do sistema é zero.

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, as expressões analíticas derivadas na seção III são avaliadas por meio de casos ilustrativos e validadas via simulações de Monte Carlo. Para isso, considera-se que a posição dos usuários é estimada com base no ângulo de visão de meia intensidade do LED, i.e., $d_i = d_v / \cos(\phi_{1/2})$ para $i \in \{B, E\}$. Além disso, assume-se que o ganho médio dos canais de RF são determinados pela perda de percurso, isto é, $\Omega_i = d_i^{-\phi}$, $i \in \{B, E\}$ e a taxa alvo de sigilo é dada por $\mathcal{R}_s = 1$ bps/Hz. Ademais, a menos que posteriormente especificado, a Tabela I resume os valores considerados para os parâmetros do sistema.

Fig. 2 ilustra a SOP como função da SNR de transmissão do ponto de acesso de RF, γ_P , para diferentes fatores de alocação, $\delta = 0.2, 0.8$, e combinações do fator K, K_B e K_E . Além disso,

$$\begin{aligned}
\text{SOP}^\infty = & \frac{(K_E + 1)\Omega_B \exp\left(-\frac{(K_B+1)K_E\Omega_E 2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{VLC}} + \mathcal{R}_s}{\delta}} + K_B(K_E+1)\Omega_B}{(K_B+1)\Omega_E 2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{VLC}} + \mathcal{R}_s}{\delta}} + (K_E+1)\Omega_B}\right) I_0\left(\frac{2\sqrt{\frac{K_B(K_B+1)K_E(K_E+1)2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{VLC}} + \mathcal{R}_s}{\delta}} + \mathcal{R}_s}{\delta}}}{\Omega_B\Omega_E}}{\frac{(K_B+1)2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{VLC}} + \mathcal{R}_s}{\delta}} + \mathcal{R}_s}{\Omega_B} + \frac{K_E+1}{\Omega_E}}}\right)}{(K_B + 1)\Omega_E 2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{VLC}} + \mathcal{R}_s}{\delta}} + (K_E + 1)\Omega_B} \\
& - Q_1\left(\sqrt{\frac{2K_E}{\frac{(K_E+1)\Omega_B 2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{VLC}} + \mathcal{R}_s}{\delta}}}{(K_B+1)\Omega_E} + 1}}, \sqrt{\frac{2K_B(K_E + 1)\Omega_B}{(K_B + 1)\Omega_E 2^{\frac{(\delta-1)C_s^{\text{VLC}} + \mathcal{R}_s}{\delta}} + (K_E + 1)\Omega_B}}}\right)
\end{aligned} \tag{13}$$

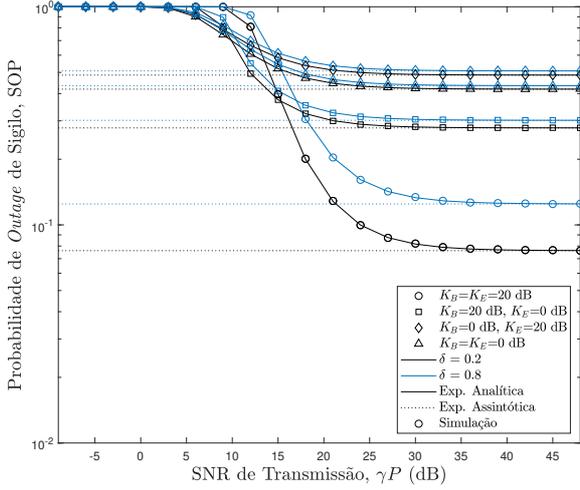


Figura 2. Probabilidade de *Outage* de Sigilo, SOP vs SNR de transmissão do ponto de acesso de RF, γ_P , para diferentes combinações dos fatores K , K_E e K_B , com $\delta=0.2, 0.8$ e considerando $d_B/d_E=0.6$.

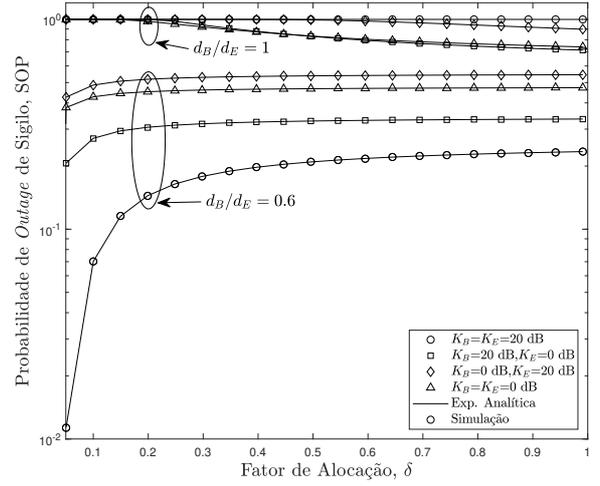


Figura 3. Probabilidade de *Outage* de Sigilo, SOP vs Fator de Alocação de Taxa, δ para diferentes combinações dos fatores K , K_E e K_B e da razão de distância entre os nós, $d_B/d_E=0.6, 1$.

Eve tem sua posição fixada na borda da cobertura do ponto de acesso de VLC. Note que a expressão analítica obtida coincide com os resultados alcançados pelas simulações. Ademais, a expressão assintótica derivada em (13) é independente de γ_P , portanto, a SOP apresenta uma linha de saturação em alta SNR. Observe que um resultado interessante é obtido quando $K_B=K_E=20$ dB, isto é, quando Bob e Eve possuem uma possível componente de LoS mais forte. Para ambos os valores considerados de δ , as curvas de $K_B=K_E=20$ dB alcançam os melhores resultados em termos de sigilo. Por outro lado, como esperado, o pior desempenho de sigilo é observado quando $K_B=0$ dB. Além disso, pode-se notar também que, em termos de δ , há maior segurança quando aloca-se mais taxa de transmissão para o enlace de VLC para os casos em que ambos os canais de RF possuem fortes componentes de LoS, enquanto que para todos os outros cenários avaliados, a diferença é mínima.

Na Fig. 3, é ilustrado a SOP vs o fator de alocação, δ para diferentes combinações do fator K , K_E e K_B , e $d_B/d_E=0.6, 1$. Como já previamente observado na Fig. 2, com Bob posicionado mais próximo á fonte, melhores resultados

são encontrados quando considera-se o fator K alto para ambos canais. Note também que, para valores menores de δ , o impacto da LoS nos enlaces de RF é mais pronunciado, o que é esperado, dado que, nestas condições, o enlace de RF é a principal fonte de vazamento de dados para Eve. Além disso, observe que, em termos de sigilo, é favorável que uma maior taxa seja alocada ao enlace de VLC. Entretanto, esta condição não é válida para o cenário com Bob e Eve localizados na borda de cobertura do ponto de acesso de VLC. Para este, observa-se melhor desempenho ao alocar maior taxa de dados para RF visto que, de acordo com (7), a capacidade de sigilo do canal de VLC é baseada na posição dos nós e é positiva somente se Bob está localizado em uma posição mais privilegiada em relação a fonte do que Eve. Ademais, para este cenário, nota-se também que o desempenho apresenta pequena melhoria quando Eve não possui componente de LoS, isto é, quando experimenta desvanecimento do tipo Rayleigh.

Fig. 4 ilustra a SOP vs. a razão entre as distância dos nós receptores, d_B/d_E , para diferentes fatores de alocação $\delta=0.2, 0.5, 0.8$. Também considera-se $K_B=K_E=10$ dB. Note que, como esperado, quando Bob está posicionado muito mais

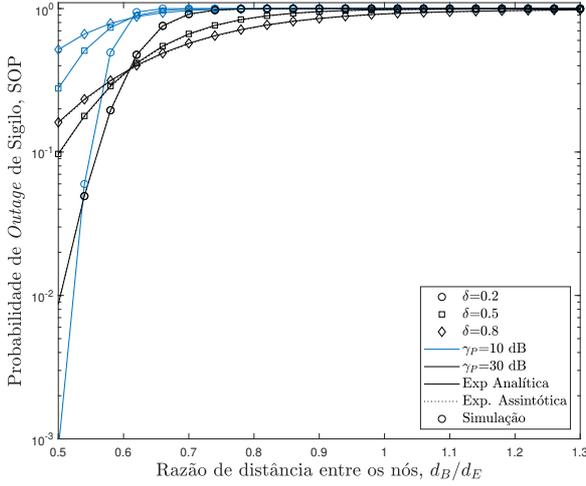


Figura 4. Probabilidade de *Outage* de Sigilo, SOP vs. razão entre as distância dos nós receptores, d_B/d_E para diferentes fatores de alocação $\delta=0.2, 0.5, 0.8$ e $\gamma_P=10, 30$ dB, com $K_B=K_E=10$ dB.

próximo da fonte do que Eve, isto é, para d_B/d_E menor que ≈ 0.6 , atinge-se melhores resultados em termos de sigilo ao alocar uma maior taxa de dados para ser transmitida via VLC. Por outro lado, ao considerar que Bob não está posicionado tão próximo á fonte mas, que ainda está localizado no interior da cobertura de VLC ($0.6 < d_B/d_E < 1$) e $\gamma_P=30$ dB, percebe-se uma inversão no comportamento do sistema. Logo, para alcançar menores valores da SOP, é preferível que uma maior taxa de dados seja transmitida pelo enlace de RF. Este comportamento evidencia as vantagens da combinação de ambas as técnicas de transmissão. Contudo, a medida que Bob posiciona-se fora da área de cobertura do VLC, o sistema está sempre em *outage*. Além disso, observa-se que o cenário com $\gamma_P=10$ dB apresenta melhor desempenho somente quando Bob está abaixo da fonte e com fator de alocação $\delta=0.2$ visto que, neste caso, o enlace de RF atua como uma fonte de vazamento de dados para Eve.

Na Fig. 5, a SOP é ilustrada em função do ângulo de visão de meia intensidade do LED, $\phi_{1/2}$, partindo de um ângulo mínimo de 30° até o valor de máxima difusão, 70° [27], considerando diferentes fatores de alocação $\delta=0.2, 0.5, 0.8$ e $\gamma_P=10, 30$ dB, com $K_B=K_E=10$ dB. A posição de Bob é assumida como sendo $d_B=d_v$. É válido lembrar que a distância entre os nós receptores e a fonte está relacionada a $\phi_{1/2}$. Devido a esta condição, para este caso, assume-se que Eve está fixado, com a distância até a fonte dada por $d_E=d_v/\cos(\pi/4)$ m. Logo, Eve encontra-se fora da cobertura do ponto de acesso de VLC para os primeiros valores de $\phi_{1/2}$ avaliados e dentro da cobertura para o restante. Neste contexto, vale apontar que, como pode-se observar pela Fig. 1, valores menores de $\phi_{1/2}$ implicam em um campo de visão reduzido para o ponto de acesso de VLC, o que acarreta em melhor desempenho em termos de sigilo para valores baixos de δ , isto é, com a alocação de taxa de dados favorecendo o enlace

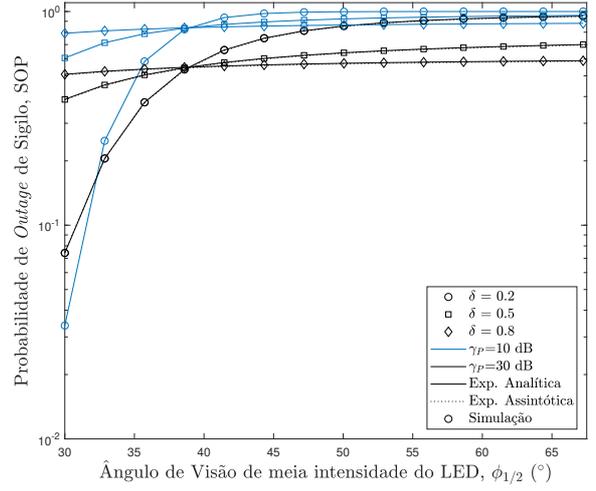


Figura 5. Probabilidade de *Outage* de Sigilo, SOP vs. ângulo de visão de meia intensidade do LED, $\phi_{1/2}$ para diferentes fatores de alocação $\delta=0.2, 0.5, 0.8$ e $\gamma_P=10, 30$ dB, com $K_B=K_E=10$ dB.

de VLC, visto também que, para estes valores de $\phi_{1/2}$, Eve está posicionado fora da área de cobertura do VLC. Além disso, valores baixos de $\phi_{1/2}$ também implicam em um maior ganho do concentrador óptico, o que, em resultado, aprimora a qualidade do sinal do receptor. Ademais, como já observado na Fig. 4, o cenário com $\gamma_P=10$ dB apresenta um melhor desempenho em termos de sigilo quando $\phi_{1/2}$ é muito pequeno ($< 35^\circ$). Finalmente, como esperado, exceto para $\delta=0.2$, a medida que $\phi_{1/2}$ aumenta, as curvas de desempenho com $\gamma_P=30$ dB alcançam melhor performance de sigilo para todos os casos estudados.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou o desempenho de um sistema híbrido RF/VLC na presença de um espião em termos da probabilidade de *outage* de sigilo. Para este sistema, foi proposto um esquema baseado em multiplexação, no qual a taxa de transmissão é dividida entre os enlaces de RF e VLC de acordo com um fator de alocação. Além disso, assume-se que tanto o usuário legítimo como o espião possuem habilidades de multi-homing, e portanto, são capazes de receber dados de ambos pontos de acesso simultaneamente. Para a avaliação do comportamento do sistema, foram derivadas uma expressão em forma integral e uma expressão assintótica da SOP e validadas via simulações de Monte Carlo. Os resultados obtidos mostram que para Bob próximo a fonte, melhor desempenho é alcançado quando mais dados são alocados para transmissão através do canal de VLC. Entretanto, a componente de LoS do canal de RF é capaz de afetar drasticamente a performance de sigilo do sistema. Além disso, de acordo com as métricas avaliadas, diferentes valores de potência de transmissão para o enlace de RF, γ_P , diferentes ângulos de visão de meia intensidade do LED, $\phi_{1/2}$, e também a posição do receptor legítimo em relação ao espião são parâmetros de grande

impacto no desempenho de sigilo do sistema, e a variação destas variáveis pode implicar em uma mudança na alocação de taxa de dados, favorecendo a transmissão via RF ou VLC, o que pode acarretar em ganhos de sigilo. Portanto, a partir das análises realizadas, é possível concluir que a combinação das técnicas de transmissão RF e VLC pode aprimorar a comunicação e aumentar o desempenho em termos de sigilo.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Wikström, J. Peisa, P. Rugeland, N. Johansson, S. Parkvall, M. Girnyk, G. Mildh, and I. L. Da Silva, "Challenges and technologies for 6G," in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [2] M. S. Saud, I. Ahmed, T. Kumpulainen, and M. Katz, "Reconfigurable optical-radio wireless networks: Meeting the most stringent requirements of future communication systems," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 30, no. 2, p. e3562, 2019.
- [3] N. Chi, Y. Zhou, Y. Wei, and F. Hu, "Visible light communication in 6G: Advances, challenges, and prospects," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 93–102, 2020.
- [4] D. A. Basnayaka and H. Haas, "Design and analysis of a hybrid radio frequency and visible light communication system," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 65, no. 10, pp. 4334–4347, 2017.
- [5] H. Chowdhury and M. Katz, "Cooperative data download on the move in indoor hybrid (radio-optical) WLAN-VLC hotspot coverage," *Trans. on Emerging Telecommun. Technol.*, vol. 25, no. 6, pp. 666–677, 2014.
- [6] M. Hammouda, S. Akln, A. M. Vegni, H. Haas, and J. Peissig, "Link selection in hybrid RF/VLC systems under statistical queueing constraints," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2738–2754, 2018.
- [7] D. P. M. Osorio, E. E. B. Olivo, H. Alves, and M. Latva-Aho, "Safeguarding MTC at the physical layer: Potentials and challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 101 437–101 447, 2020.
- [8] J. Wang, C. Liu, J. Wang, Y. Wu, M. Lin, and J. Cheng, "Physical-layer security for indoor visible light communications: Secrecy capacity analysis," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 66, no. 12, pp. 6423–6436, 2018.
- [9] J. Y. Wang, Y. Qiu, S. H. Lin, J. B. Wang, M. Lin, and C. Liu, "On the secrecy performance of random VLC networks with imperfect CSI and protected zone," *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 4176–4187, 2020.
- [10] A. Kumar, P. Garg, and A. Gupta, "PLS analysis in an indoor heterogeneous VLC/RF network based on known and unknown CSI," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 68–76, 2021.
- [11] M. F. Marzban, M. Kashef, M. Abdallah, and M. Khairy, "Beamforming and power allocation for physical-layer security in hybrid RF/VLC wireless networks," in *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2017, pp. 258–263.
- [12] J. Al-Khori, G. Naurzybayev, M. M. Abdallah, and M. Hamdi, "Secrecy performance of decode-and-forward based hybrid RF/VLC relaying systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 10 844–10 856, 2019.
- [13] F. Wang, Z. Wang, C. Qian, L. Dai, and Z. Yang, "Efficient vertical handover scheme for heterogeneous VLC-RF systems," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 12, pp. 1172–1180, 2015.
- [14] M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, "Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 11, no. 12, pp. 4296–4307, 2012.
- [15] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, 2004.
- [16] J. R. Barry, J. M. Kahn, W. J. Krause, E. A. Lee, and D. G. Messerschmitt, "Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 367–379, 1993.
- [17] Y. Wang and H. Haas, "Dynamic load balancing with handover in hybrid li-fi and wi-fi networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 22, pp. 4671–4682, 2015.
- [18] S. Dimitrov and H. Haas, "Optimum signal shaping in ofdm-based optical wireless communication systems," in *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012, pp. 1–5.
- [19] S. Leung-Yan-Cheong and M. Hellman, "The gaussian wire-tap channel," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 24, no. 4, pp. 451–456, 1978.
- [20] A. Chaaban, Z. Rezk, and M. Alouini, "Fundamental limits of parallel optical wireless channels: Capacity results and outage formulation," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 65, no. 1, pp. 296–311, 2017.
- [21] A. Lapidath, S. M. Moser, and M. A. Wigger, "On the capacity of free-space optical intensity channels," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 55, no. 10, pp. 4449–4461, 2009.
- [22] M. Hammouda, S. Akln, A. M. Vegni, H. Haas, and J. Peissig, "Hybrid RF/VLC systems under QoS constraints," in *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2018, pp. 312–318.
- [23] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*, 7th ed. Elsevier/Academic Press, Amsterdam, 2007.
- [24] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital communication over fading channels*. John Wiley & Sons, 2005, vol. 95.
- [25] X. Liu, "Probability of strictly positive secrecy capacity of the rician-rician fading channel," *IEEE Wireless Commun. Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 50–53, 2013.
- [26] R. Price, "Some non-central F -distributions expressed in closed form," *Biometrika*, vol. 51, no. 1/2, pp. 107–122, 1964. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/2334200>
- [27] M. H. Khadr, A. Abd El Aziz, H. A. Fayed, and M. Aly, "Bandwidth and BER improvement employing a pre-equalization circuit with white LED arrays in a MISO VLC system," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 5, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/5/986>