

Análise de Desempenho de uma Rede Cognitiva *Full-Duplex* com Captação de Energia

Hebert Douglas Pereira, Samuel B. Mafra e Evelio M. G. Fernandez

Resumo—Investigamos o desempenho de uma rede cognitiva *full-duplex* com captação de energia composta por um transmissor e um destino na rede primária e uma fonte, um *relay* e um destino na rede secundária, no qual será aplicado detecção conjunta nos sinais recebidos da fonte e do *relay*. A auto-interferência no *relay* é levada em consideração devido à natureza da transmissão *full-duplex*. Uma expressão analítica para a probabilidade de *outage* da rede analisada foi derivada. Os resultados mostram que o esquema proposto supera o *half-duplex* e a transmissão direta nos cenários particulares analisados.

Palavras-Chave—Captação de energia, rede cognitiva cooperativa, comunicação *full-duplex*, detecção conjunta.

Abstract—We investigate the performance of a full-duplex energy harvesting cooperative cognitive network composed by one transmitter and one destination in the primary network, and one source, one relay, and one destination in the secondary network, in which joint decoding of the signals received from source and relay is performed. The effect of self-interference at the relay is taken into account in our analysis due to the full-duplex relaying nature. A closed-form expression for the outage probability of the proposed scheme is derived. Result show that the proposed scheme outperforms the half-duplex and direct transmission in the particular scenarios under consideration.

Keywords—Energy Harvesting, cooperative cognitive network, full-duplex communication, joint decoding.

I. INTRODUÇÃO

Dado o grande avanço tecnológico nas últimas décadas e o grande crescimento das redes sem fio, várias técnicas têm sido propostas para aumentar a eficiência no uso do espectro de radio frequências (RF) e da energia, dado que ambos são recursos naturais limitados. Dentre essas técnicas, podemos citar captação de energia e rádio cognitivo. Uma das formas de captação de energia é mostrada em [1] onde foi comprovada a possibilidade de se transmitir energia e informação de forma conjunta através de sinais de RF usando duas técnicas: multiplexação no tempo (TS, do inglês *Time-Switching*) e divisão de potência (PS, do inglês *Power-Switching*). No modo TS, um intervalo de tempo é utilizado para a captação de energia e o tempo restante para transmissão de informação. Já no modo PS uma porcentagem da potência é destinada para conversão de energia e a outra porcentagem para decodificação de informação conforme mostrado em [2], [3].

Na busca por melhorar a eficiência da rede, surge o conceito de comunicação cooperativa [4], onde nós *relays* são utilizados para encaminhar a informação para o destino através de dois

protocolos principais: amplifica e encaminha (AF, do inglês *Amplify-and-Forward*) onde o *relay* apenas amplifica o sinal recebido, e decodifica e encaminha (DF, do inglês *Decode-and-Forward*) onde o *relay* somente re-envia a informação se conseguir decodificá-la corretamente. Em [3] é proposta uma rede cooperativa com captação de energia nos modos PS e TS e o *relay* operando no modo AF. A rede possui uma fonte um *relay* e um destino, sendo que o *relay* não possui fonte de energia própria, toda a energia necessária é captada do sinal enviado pela fonte. Nessa análise é mostrado um desempenho superior do esquema TS em relação ao PS.

Em [5] é proposta uma rede cognitiva com seleção de *relays full-duplex* (FD) para melhorar o desempenho, em termos de probabilidade de *outage*, em relação a esquemas operando em modo *half-duplex* (HD). Por sua vez, em [6] os autores apresentam o esquema FDJD (do inglês: *Full-Duplex Joint-Decoding*) onde o enlace direto entre fonte e destino da rede secundária é considerado. O *relay* utiliza o protocolo DF seletivo e a técnica detecção conjunta (JD, do inglês: *Joint-Decoding*) [7] é aplicada no destino para decodificar os sinais recebidos da fonte e do *relay*. É mostrado que o FDJD apresenta melhor desempenho em relação a esquemas tradicionais que desconsideram o efeito do sinal do enlace direto, ou o consideram como interferência, no destino.

Trabalhos recentes têm abordado esquemas de captação de energia em redes cognitivas cooperativas. Em [8], um esquema de captação de energia em uma rede cognitiva é analisado, onde a rede secundária coopera com a primária através do protocolo *overlay*, e o transmissor secundário opera em modo FD com captação de energia usando o protocolo PS, carregando suas baterias a partir do sinal de RF do primário e da auto-interferência. Já em [9] uma rede com captação de energia é considerada onde o *relay* opera em modo FD e a auto-interferência no *relay* é aproveitada para captação de energia. Com isso, os autores conseguiram um ganho na taxa de transmissão da rede em comparação com modelos existentes. Em [10] uma rede de rádio cognitivo com captação de energia é proposta, composta por uma fonte e um destino na rede primária, e na rede secundária um *relay* e um destino que captam energia no modo PS. De forma similar, uma rede cognitiva com captação de energia é proposta em [11] onde a fonte e o *relay* captam energia para funcionamento a partir de qualquer transmissor dentro da área de cobertura. O *relay* opera em modo AF e não há comunicação direta entre a fonte e o destino por conta de condições adversas de propagação em larga escala.

Nesse artigo iremos estender o esquema FDJD apresentado em [6] para um cenário com captação de energia. Propomos

Hebert Douglas Pereira, S. B. Mafra e E. M. G. Fernandez, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil. E-mails(hebert.douglas@ufpr.br, mafrasamuel@gmail.com, evelio@ufpr.br). Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e Fundação Araucária.

assim uma rede cognitiva cooperativa FD com captação de energia que chamaremos de EH-FDJD (EH-FDJD, do inglês: *Energy Harvesting Full-Duplex with Joint-Decoding*). Consideramos que a fonte e o *relay* da rede secundária não possuem fonte de energia própria e carregam suas baterias através da energia captada da rede primária, utilizando o protocolo TS por ser de mais fácil implementação e menor complexidade do que o PS. O desempenho do esquema proposto será comparado com esquemas cognitivos com captação de energia com transmissão direta e com cooperação em modo HD.

O restante do artigo está organizado como segue. Na Seção II são apresentados o modelo de topologia da rede e os protocolos utilizados na comunicação. Os equacionamentos da probabilidade de *outage* são mostrados na Seção III. Na Seção IV são apresentados resultados numéricos e discussões. Conclusões e trabalhos futuros são mostrados na Seção V.

II. MODELO DO SISTEMA

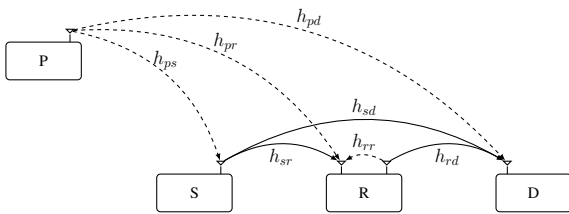


Fig. 1. Modelo do sistema: Rede cognitiva cooperativa com *relay* FD.

A Figura 1 mostra a topologia da rede, mesma topologia analisada em [6], onde P representa o transmissor primário e a rede secundária é composta por uma fonte S, um *relay* R e um destino D que possui fonte de energia permanente. Já os nós S e R realizam captação de energia do sinal transmitido por P¹. Assim, devido a proximidade do transmissor primário considera-se um cenário limitado por interferência na rede secundária. Assume-se que o destino primário está a uma distância grande de S, tal que a potência transmitida por S e R não causará nenhuma interferência no mesmo.

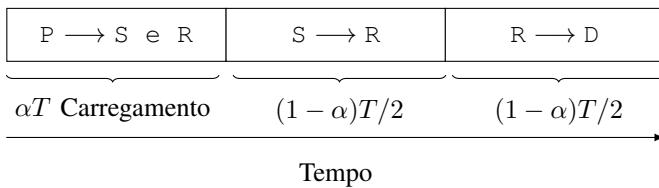


Fig. 2. Protocolo HD de captação de energia e transmissão de informação.

Para transmissão das informações serão considerados cenários HD e FD conforme mostrado nas Figuras 2 e 3, respectivamente. Em ambos cenários, no primeiro intervalo de tempo de duração αT , $\alpha \in [0, 1]$, S e R captam energia do sinal de P. Após a captação de energia, no cenário HD (Fig. 2) o restante do tempo é dividido em dois intervalos de

¹Assume-se que os nós possuem uma bateria capaz de mantê-los em funcionamento, visto que se considerarmos que toda energia captada for utilizada para funcionamento e transmissão das informações, o problema se torna muito difícil de modelar conforme mostrado em [12].

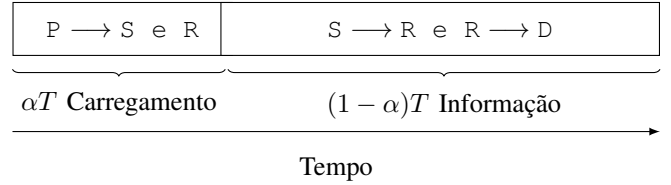


Fig. 3. Protocolo FD de captação de energia e transmissão de informação.

igual duração $(1 - \alpha)\beta T$ com $\beta = \frac{1}{2}$. No primeiro intervalo a informação é enviada via *broadcast* para R e D e no segundo intervalo R encaminha a informação de S para D. No cenário FD mostrado na Figura 3 considera-se $\beta = 1$ de forma que a transmissão da informação de S para R e de R para D acontecem simultaneamente no mesmo intervalo de tempo. No caso FD, a transmissão e recepção simultâneas provoca auto-interferência no *relay*.

Será considerado desvanecimento quase estático em todos os enlaces, sendo o coeficiente de canal entre o transmissor i e o destino j será denotado por h_{ij} , com $i \in \{p, s, r\}$ e $j \in \{s, r, d\}$. Todos os canais são i.i.d. Rayleigh com $|h_{ij}|^2$ tendo uma distribuição exponencial de média λ_{ij} e variância σ_{ij} . O ganho de potência médio do canal é dado por $\lambda_{ij} = \hat{d}_{ij}^{-\nu} \sigma_{ij}$ onde $\hat{d}_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_{pd}}$ é a distância entre os nós i e j com relação à distância do transmissor primário ao destino secundário, enquanto ν é o expoente de perda de percurso. Observe que λ_{rr} representa a auto-interferência residual no *relay* após a aplicação de técnicas de cancelamento de interferência conforme descrito em [13]. Considera-se também que a componente da linha de visada é reduzida pela isolação das antenas do *relay*, assim λ_{rr} é dominada pela componente de dispersão, que em geral tem valores muito pequenos.

A energia recebida tanto em S quanto em R é dada por

$$E_k = \eta \alpha T P_p |h_{pk}|^2, \quad (1)$$

onde η é a eficiência de conversão de energia, αT é o tempo de carregamento, P_p é a potência de transmissão do primário e $|h_{pk}|^2$ é o ganho de potência do canal entre o usuário primário e o nó k , $k \in \{s, r\}$. A potência de transmissão de S e R é dada por

$$P_k = \frac{E_k}{(1 - \alpha)\beta T} = \frac{\eta \alpha P_p |h_{pk}|^2}{(1 - \alpha)\beta} = \mathcal{K} P_p |h_{pk}|^2, \quad (2)$$

onde $\mathcal{K} = \frac{\eta \alpha}{(1 - \alpha)\beta}$ e β representa a fração do tempo utilizada pelos nós para transmitir as informações.

Consequentemente, os sinais recebidos em R e D são dados, respectivamente, por

$$y_r = \sqrt{P_s} h_{sr} x_s + \sqrt{P_r} h_{rr} x_r + \sqrt{P_p} h_{pr}, \quad (3)$$

$$y_d = \sqrt{P_r} h_{rd} x_r + \sqrt{P_s} h_{sd} x_s + \sqrt{P_p} h_{pd}, \quad (4)$$

onde P_k e x_k são, respectivamente, a potência e a mensagem transmitidas pelo nó k e h_{rr} é o coeficiente de auto-interferência no *relay* FD.

III. ANÁLISE DA PROBABILIDADE DE *outage*

Neste trabalho consideramos como métrica de avaliação de desempenho a probabilidade de *outage*, que é definida como

a probabilidade de falha na comunicação em um determinado enlace de comunicação. Supondo largura de banda unitária, a probabilidade de *outage* do enlace direto entre fonte e destino secundários pode ser escrita como

$$\begin{aligned} \mathcal{O}^{DT} &= \Pr[\mathcal{I}_{sd} < \mathcal{R}] \\ &= \Pr\left[(1-\alpha)\beta \log_2\left(1 + \frac{P_s |h_{sd}|^2}{P_p |h_{pd}|^2}\right) < \mathcal{R}\right] \\ &= \Pr\left[\log_2\left(1 + \mathcal{K} \left(\frac{|h_{ps}|^2 |h_{sd}|^2}{|h_{pd}|^2}\right)\right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}\right], \end{aligned} \quad (5)$$

onde \mathcal{I}_{sd} é a informação mútua do canal $S \rightarrow D$ e \mathcal{R} é a taxa de transmissão esperada. Uma expressão fechada para (5) foi apresentada em [14]:

$$\mathcal{O}^{DT} = \mathcal{Z} e^{\mathcal{Z}} E_1(\mathcal{Z}), \quad (6)$$

onde $E_1(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-xt}}{t} dt$ é a função exponencial integral [15, Eq. (5.1.4)] e \mathcal{Z} é uma constante dada por:

$$\mathcal{Z} = \frac{\left(2^{\frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}} - 1\right) \lambda_{pd}}{\mathcal{K} \lambda_{ps} \lambda_{sd}}. \quad (7)$$

A. Protocolo de Captação de Energia Full-Duplex Cognitivo

No esquema de captação de energia *full-duplex* com detecção conjunta EH-FDJD os sinais recebidos tanto de D quanto de R são decodificados conjuntamente de acordo com o processo de decodificação *backward*, que é um processo iterativo dependente da decodificação dos blocos, cuja finalidade é combinar as informações recebidas da fonte e do *relay*, através de técnicas avançadas de decodificação e de conhecimento adquiridos dos quadros previamente recebidos [7], [6]. Assim a informação mútua no canal $S \rightarrow R$ pode ser calculada como:

$$\mathcal{I}_{sr}^{FD} = \beta(1-\alpha) \log_2\left(1 + \frac{P_s |h_{sr}|^2}{P_p |h_{pr}|^2 + P_r |h_{rr}|^2}\right), \quad (8)$$

enquanto que a informação mútua entre R e D com detecção conjunta é dada por

$$\mathcal{I}_{rd}^{FD} = \beta(1-\alpha) \log_2\left(1 + \frac{P_s |h_{sd}|^2 + P_r |h_{rd}|^2}{P_p |h_{pd}|^2}\right). \quad (9)$$

Pode-se notar que os sinais vindo de S e de R são tratados como informação útil no destino, contudo também é possível perceber que a auto-interferência em R é levada em consideração de acordo com (8). Dessa forma, a probabilidade de *outage* do esquema proposto EH-FDJD pode ser escrita de forma similar a [6] dado que o cenário é o mesmo:

$$\mathcal{O}^{\text{EH-FDJD}} = \mathcal{O}_{sd}^{FD} \mathcal{O}_{sr}^{FD} + (1 - \mathcal{O}_{sr}^{FD}) \mathcal{O}_{rd}^{FD}. \quad (10)$$

Para se obter uma expressão fechada para (10) é necessário resolver os termos individualmente. O valor de \mathcal{O}_{sd}^{FD} pode ser obtido usando (6). A probabilidade de *outage* para o enlace $S \rightarrow R$, definida como $\mathcal{O}_{sr}^{FD} = \Pr[\mathcal{I}_{sr} < \mathcal{R}]$, pode ser calculada encontrando primeiramente os valores de P_s e P_r por meio de (2) e em seguida substituindo em (8),

$$\mathcal{O}_{sr}^{FD} = \Pr\left[\log_2\left(1 + \frac{\mathcal{K} |h_{ps}|^2 |h_{sr}|^2}{|h_{pr}|^2 (1 + \mathcal{K} |h_{rr}|^2)}\right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}\right]. \quad (11)$$

A auto-interferência em (11), representada por h_{rr} , pode ser vista como uma versão atenuada da interferência do primário

no *relay* e pode ser desprezada². Portanto, a probabilidade \mathcal{O}_{sr}^{FD} pode ser reescrita como

$$\mathcal{O}_{sr}^{FD} = \Pr\left[\log_2\left(1 + \mathcal{K} \left(\frac{|h_{ps}|^2 |h_{sr}|^2}{|h_{pr}|^2}\right)\right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}\right]. \quad (12)$$

Desta forma, a probabilidade de *outage* entre os nós S e R pode ser comparada com a probabilidade de *outage* entre os nós S e D apenas alterando os valores de λ_{pd} por λ_{pr} e λ_{sd} por λ_{sr} .

Por fim, a probabilidade de *outage* no enlace $R \rightarrow D$ definida como $\mathcal{O}_{rd}^{FD} = \Pr[\mathcal{I}_{rd} < \mathcal{R}]$ pode ser obtida encontrando primeiramente os valores de P_s e P_r por meio de (2) e substituindo em (9):

$$\mathcal{I}_{rd} = \beta(1-\alpha) \log_2\left(1 + \mathcal{K} \left(\frac{|h_{ps}|^2 |h_{sd}|^2 + |h_{pr}|^2 |h_{rd}|^2}{|h_{pd}|^2}\right)\right). \quad (13)$$

Definição 1: Consequentemente, a probabilidade de *outage* \mathcal{O}_{rd}^{FD} pode ser aproximada como

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{rd}^{FD} &= \Pr\left[\log_2\left(1 + \mathcal{K} \left(\frac{|h_{ps}|^2 |h_{sd}|^2 + |h_{pr}|^2 |h_{rd}|^2}{|h_{pd}|^2}\right)\right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}\right] \\ &\approx 2^{-2\xi} \varrho_s^{-\xi} \varrho_r^{-\xi} (X \lambda_{pd})^\xi U\left(\frac{\xi}{2}, 0.5, \frac{X \lambda_{pd}}{4\varrho_s^2}\right) U\left(\frac{\xi}{2}, 0.5, \frac{X \lambda_{pd}}{4\varrho_r^2}\right), \end{aligned} \quad (14)$$

onde $X = \frac{\left(2^{\frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)}} - 1\right)}{\mathcal{K}}$, $U(a, b, c)$ é a função confluyente hipergeométrica descrita em [17, Eq. 9.211.4], $\xi = 1.61$ e $\varrho_k = 0.4878 \sqrt{\lambda_{pk} \lambda_{kd}}$.

Demonstração: A fim de encontrar a probabilidade de *outage* para o enlace $R \rightarrow D$ em (14), nos auxiliaremos de resultado apresentado em [16] para aproximar o produto de duas variáveis aleatórias Nakagami- m ($Z_k = h_{pk} h_{kd}$) por uma variável Gamma ($\Lambda_k \sim \Gamma(\xi, \varrho_k)$), onde $k \in \{s, r\}$, cujos parâmetros ξ e ϱ_k podem ser estimados através do método gerador de momentos descrito em [18]. Para isso, definem-se o primeiro e o segundo momentos de Λ como $E[\Lambda_k] = \xi \varrho_k$ e $E[\Lambda_k^2] = \xi(1 + \xi) \varrho_k^2$ [18]. De [19, Eq. 9], o momento de n -ésima ordem de Z_k pode ser determinado como

$$E[Z_k^n] = \frac{\Gamma(m_{pk} + \frac{n}{2}) \Gamma(m_{kd} + \frac{n}{2})}{\Gamma(m_{pk}) \Gamma(m_{kd})} \left(\frac{\lambda_{pk}}{m_{pk}}\right)^{\frac{n}{2}} \left(\frac{\lambda_{kd}}{m_{kd}}\right)^{\frac{n}{2}}. \quad (16)$$

Assim igualando os termos $E[Z_k] = E[\Lambda_k]$ e $E[Z_k^2] = E[\Lambda_k^2]$ e após algumas manipulações algébricas, ξ e ϱ_k podem ser escritas em função dos parâmetros de uma variável aleatória Nakagami- m com $m = 1$ ³, $\xi = 1.61$ e $\varrho_k = 0.4878 \sqrt{\lambda_{pk} \lambda_{kd}}$ conforme [16, Eq. 9 e Eq. 10], respectivamente, ou seja, $Z_k \sim \Gamma(1.61, 0.4878 \sqrt{\lambda_{pk} \lambda_{kd}})$.

Consequentemente, considerando $Z_k^2 \approx |h_{pk}|^2 |h_{kd}|^2$ e resolvendo as integrais em (15), podemos escrever a probabilidade de *outage* \mathcal{O}_{rd}^{FD} como em (14). ■

²Conforme mostrado em [6], [13], [16], a auto-interferência pode ser atenuada através de técnicas de cancelamento de interferência para valores residuais na ordem de $\lambda_{rr} < 10^{-3}$, assim podemos considerar que a parcela da auto-interferência é muito menor que a interferência da rede primária e assim esse termo pode ser desprezado.

³Como definido na Seção II, os envelopes dos canais são modelados por variáveis aleatórias com distribuição de Rayleigh que é um caso particular da distribuição de Nakagami- m para $m = 1$.

$$\mathcal{O}_{rd}^{FD} = \int_0^\infty \int_0^{\sqrt{Z_{pd} \frac{\mathcal{R}}{(2(1-\alpha)\beta - 1)} - 1}}} \int_0^{\sqrt{Z_{pd} \frac{\mathcal{R}}{(2(1-\alpha)\beta - 1)} - (Z_r)^2}} \frac{\varrho_s^\xi e^{-\frac{Z_s}{\varrho_s}} Z_s^{\xi-1}}{\Gamma(\xi)} \frac{\varrho_r^\xi e^{-\frac{Z_r}{\varrho_r}} Z_r^{\xi-1}}{\Gamma(\xi)} \frac{e^{-\frac{Z_{pd}}{\lambda_{pd}}}}{\lambda_{pd}} dZ_s dZ_r dZ_{pd} \quad (15)$$

B. Protocolo de Captação de Energia Half-Duplex Cognitivo

Analizaremos também um esquema HD de captação de energia com detecção conjunta (EH-HDJD, do inglês: *Energy Harvesting Half-Duplex with Joint-Decoding*) no qual o protocolo de transmissão é o descrito na Figura 2. Neste caso a probabilidade de *outage* pode ser escrita de forma similar a [6] dado que o cenário é o mesmo:

$$\mathcal{O}^{EH-HDJD} = \mathcal{O}_{sd}^{HD} \mathcal{O}_{sr}^{HD} + (1 - \mathcal{O}_{sr}^{HD}) \mathcal{O}_{rd}^{HD}. \quad (17)$$

Para resolver (17), precisamos resolver os termos individualmente, assim as probabilidade de *outage* dos enlaces $S \rightarrow R$ e $S \rightarrow D$ podem ser descritas, respectivamente, como

$$\mathcal{O}_{sr}^{HD} = \Pr \left[\log_2 \left(1 + \mathcal{K} \left(\frac{|h_{ps}|^2 |h_{sr}|^2}{|h_{pr}|^2} \right) \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right], \quad (18)$$

$$\mathcal{O}_{sd}^{HD} = \Pr \left[\log_2 \left(1 + \mathcal{K} \left(\frac{|h_{ps}|^2 |h_{sd}|^2}{|h_{pd}|^2} \right) \right) < \frac{\mathcal{R}}{\beta(1-\alpha)} \right], \quad (19)$$

onde \mathcal{O}_{sr}^{HD} pode ser resolvida utilizando (6), apenas substituindo λ_{pd} por λ_{pr} e λ_{sd} por λ_{sr} em (7), enquanto que \mathcal{O}_{sd}^{HD} é obtido como em (6), mas considerando $\beta = \frac{1}{2}$. Já a probabilidade \mathcal{O}_{rd}^{HD} pode ser obtida a partir de (14) considerando $\beta = \frac{1}{2}$.

transmissor primário P está situado na coordenada (0,1) do sistema cartesiano, a fonte secundária S em (1,0) e o destino secundário D fixo em (2,0). O *relay* R está situado em linha reta entre S e D. Nas simulações a posição de R foi variada de (1.1,0) a (1.9,0).

Afim de encontrar a posição ótima para o *relay*, na Figura 4 é avaliada a probabilidade de *outage* dos diferentes esquemas em função da variação da distância de R entre S e D no cenário proposto. Pode ser observada a validade das expressões analíticas, visto que os valores são muito próximos aos simulados. A transmissão direta foi mantida no gráfico apenas para fins de comparação com os outros esquemas. Pode se observar que o esquema EH-FDJD apresenta o melhor desempenho entre todos os esquemas analisados. Além disso, pode se observar que a posição ótima do *relay* é exatamente no ponto médio entre S e D. Isto acontece devido que quando R está próximo a S, há uma maior captação de energia, entretanto a interferência do transmissor primário é grande, que acarreta em uma maior probabilidade de *outage*. Quando R está próximo a D, a interferência diminui, mas também diminui a captação de energia, aumentando assim a probabilidade de *outage*, assim o ponto ótimo é justamente no ponto médio entre S e D.

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

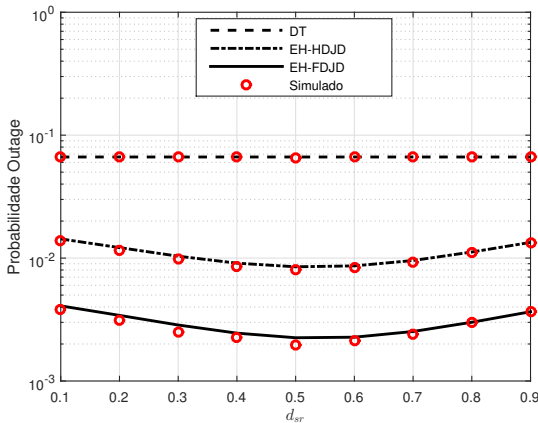


Fig. 4. Probabilidade de *outage* dos diferentes esquemas em função de d_{sr} .

Nesta seção são apresentados resultados numéricos para investigar o desempenho do esquema EH-FDJD em comparação com o do esquema EH-HDJD, ambos com detecção conjunta no destino, e com o desempenho do enlace direto DT sem cooperação. Simulações de Monte Carlo foram realizadas para validação das expressões analíticas obtidas. Foi utilizado um expoente de perdas de percurso $\nu = 4$ e $\eta = 1$ ⁴. O

⁴Valores menores de η não mudariam as conclusões, visto que o efeito é similar em todos os esquemas, apenas deslocaria os valores no eixo y das figuras.

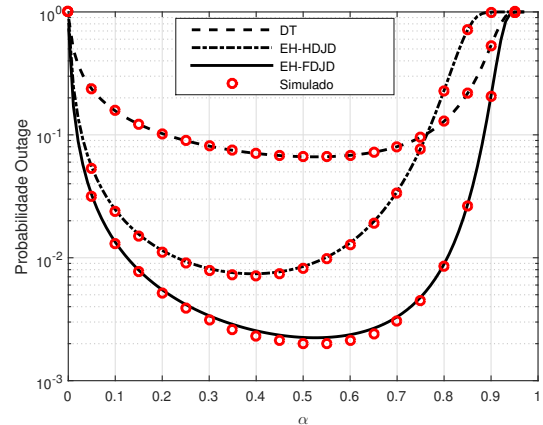


Fig. 5. Probabilidade de *outage* dos diferentes esquemas em função de α com $d_{sr} = 0.5$.

A Figura 5 apresenta uma análise da probabilidade de *outage* em função do parâmetro de carregamento α . Esta análise é importante pois o valor de α influencia tanto na potência quanto na taxa de transmissão. Considera-se $d_{sr} = 0.5$ que corresponde à posição ótima do *relay* neste cenário como visto na Figura 4. Pode ser observado que para uma determinada probabilidade de *outage*, o tempo de carregamento pode ser maior em EH-FDJD do que em EH-HDJD, assim com uma quantidade maior de energia armazenada, o esquema proposto consegue obter uma probabilidade *outage* menor. Além disso, pode-se observar que o esquema proposto pode obter uma determinada probabilidade de *outage* com um tempo menor

de carregamento e com isso dedicar mais tempo a fase de transmissão, por exemplo para uma probabilidade de outage de 10^{-2} o valor de $\alpha = 0.11$ em EH-FDJD e $\alpha = 0.22$ em EH-HDJD.

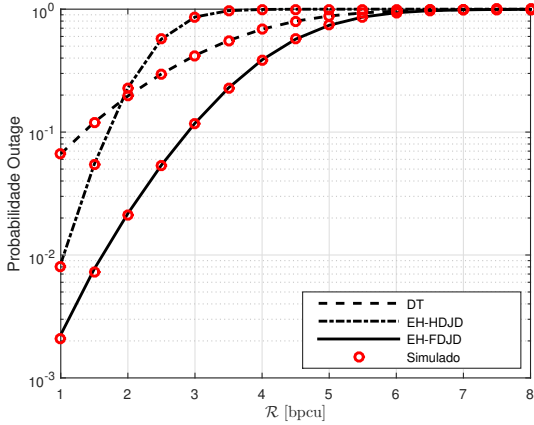


Fig. 6. Probabilidade de *outage* dos diferentes esquemas em função da taxa de transmissão esperada \mathcal{R} com $d_{sr} = 0.5$ e $\alpha = 0.5$.

Finalmente, a Figura 6 apresenta a probabilidade de *outage* em função da variação da taxa de transmissão esperada, dada em bits por uso de canal (bpsu). Nessa análise consideramos $\alpha = 0.5$ e $d_{sr} = 0.5$. Nessa análise pode se observar que para uma determinada probabilidade de *outage*, o esquema EH-FDJD consegue até o dobro da taxa que em EH-HDJD, isso ocorre porque o esquema *full-duplex* transmite durante toda a fase de transmissão. Pode se observar também que o esquema EH-FDJD apresenta melhor desempenho para todas os valores da taxa de transmissão considerados em relação aos esquemas comparados.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, o desempenho de uma rede de captação de energia cognitiva cooperativa *full-duplex* é investigado. A rede secundária é composta por uma fonte, um *relay* e um destino, no qual é feita a detecção conjunta nos sinais recebidos da fonte e do *relay*, pois são considerados como informação mútua. Expressões analíticas para a probabilidade de *outage* foram derivadas e validadas através de simulações. Os resultados mostraram que a rede operando em modo *full-duplex* possui um desempenho superior em comparação com os esquemas *half-duplex* e transmissão direta no cenário particular proposto. Percebe-se que o esquema proposto atinge uma menor probabilidade de *outage*, com um tempo de carregamento menor. Ainda pode se notar que a taxa de transmissão alcançada é sempre superior quando comparado aos demais esquemas. Também pode ser observada a validade das expressões analíticas, visto que os valores são muito próximos aos simulados. Como trabalho futuro pretendemos analisar o cenário proposto com a técnica de captação de energia *Power Splitting*, afim de investigar qual protocolo apresenta melhor desempenho.

AGRADECIMENTOS

Hebert D. Pereira e Samuel B. Mafra agradecem à CAPES pelas bolsas recebidas.

REFERÊNCIAS

- [1] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in *2008 IEEE International Symposium on Information Theory*, July 2008, pp. 1612–1616.
- [2] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," in *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Dec 2012, pp. 3982–3987.
- [3] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 3622–3636, July 2013.
- [4] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec 2004.
- [5] B. Zhong, Z. Zhang, X. Chai, Z. Pan, K. Long, and H. Cao, "Performance analysis for opportunistic full-duplex relay selection in underlay cognitive networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 10, pp. 4905–4910, Oct 2015.
- [6] S. B. Mafra, H. Alves, D. B. Costa, R. D. Souza, E. M. G. Fernandez, and M. Latva-aho, "On the performance of cognitive full-duplex relaying under spectrum sharing constraints," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2015, no. 1, pp. 1–13, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1186/s13638-015-0397-z>
- [7] M. Khafagy, A. Ismail, M. S. Alouini, and S. Aissa, "On the outage performance of full-duplex selective decode-and-forward relaying," *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 6, pp. 1180–1183, June 2013.
- [8] S. Hu, Z. Ding, Q. Ni, and Y. Yuan, "Beamforming optimization for full-duplex cooperative cognitive radio networks," in *2016 IEEE 17th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, July 2016, pp. 1–5.
- [9] Y. Zeng and R. Zhang, "Full-duplex wireless-powered relay with self-energy recycling," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 201–204, April 2015.
- [10] Z. Wang, Z. Chen, B. Xia, L. Luo, and J. Zhou, "Cognitive relay networks with energy harvesting and information transfer: Design, analysis, and optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 4, pp. 2562–2576, April 2016.
- [11] Y. Liu, S. A. Mousavifar, Y. Deng, C. Leung, and M. Elkashlan, "Wireless energy harvesting in a cognitive relay network," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 4, pp. 2498–2508, April 2016.
- [12] S. Luo, R. Zhang, and T. J. Lim, "Optimal save-then-transmit protocol for energy harvesting wireless transmitters," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 3, pp. 1196–1207, March 2013.
- [13] M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, "Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 12, pp. 4296–4307, December 2012.
- [14] G. L. Moritz, S. B. Mafra, J. L. Rebelatto, R. D. Souza, B. F. Uchôa-Filho, and Y. Li, "Network-coded secondary communication with opportunistic energy harvesting," in *2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Aug 2015, pp. 336–340.
- [15] M. Abramowitz, *Handbook of Mathematical Functions, With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*,. Dover Publications, Incorporated, 1974.
- [16] H. Alves, D. B. da Costa, R. D. Souza, and M. Latva-aho, "Performance of block-markov full duplex relaying with self interference in nakagami-m fading," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 311–314, June 2013.
- [17] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*, 7th ed. Elsevier/Academic Press, Amsterdam, 2007.
- [18] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 4th ed. McGraw-Hill Higher Education, 2002.
- [19] G. K. Karagiannidis, N. C. Sagias, and P. T. Mathiopoulos, "N*nakagami: A novel stochastic model for cascaded fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, no. 8, pp. 1453–1458, Aug 2007.