# Protocolo Cooperativo de Rádio Cognitivo Explorando Retransmissões do Primário

Samuel Baraldi Mafra, Evelio Martín García Fernández, Richard Demo Souza e João Luiz Rebelatto

***Resumo*— Neste artigo é avaliado o uso de cooperação em uma rede cognitiva *overlay*, onde o enlace secundário explora as retransmissões do enlace primário. Mostra-se que, com a utilização de comunicação cooperativa, a taxa de transmissão do enlace secundário pode ser consideravelmente aumentada se comparada com esquemas existentes na literatura, sem apresentar grande impacto no desempenho do enlace primário. A melhor configuração para o método proposto é aquela em que os nós da rede secundária estão próximos do transmissor primário.**

***Palavras-Chave*— Comunicação cooperativa, rádio cognitivo, HARQ.**

***Abstract*— This paper evaluates the use of cooperation in a cognitive *overlay* network, where the secondary link exploits the retransmissions of the primary link. We show that, using cooperative communication, the transmission rate of the secondary link can be considerably increased as compared with existing schemes in the literature, without causing major impact on the performance of the primary link. The best configuration for the proposed scheme is that in which the secondary nodes are close the primary transmitter.**

***Keywords*— Cooperative communication, cognitive radio, HARQ.**

## I. Introdução

O termo rádio cognitivo foi introduzido por Mitola em [1] para designar redes inteligentes de comunicação que conhecem o ambiente e seus recursos e que são capazes de se adaptar em ocasião de mudanças. Segundo Haykin [2], rádio cognitivo é um sistema de comunicação sem fio inteligente que faz modificações em certos parâmetros de funcionamento (potência de transmissão, frequência de portadora, etc) em tempo real, com dois objetivos principais:

- comunicação altamente confiável quando e onde necessário;
- utilização eficiente do espectro de rádio.

São três os protocolos de comunicação para rádio cognitivo mais conhecidos: *underlay*, *overlay* e *interweave* [3], [4]. No protocolo *interweave* os usuários não licenciados (secundários) fazem um sensoriamento do espectro licenciado à procura de faixas de frequência não utilizadas e, encontrando-as, transmitem nessas frequências sem causar interferência no usuário licenciado (primário). Se por acaso o usuário primário começar a transmitir em uma determinada frequência, o usuário secundário não pode transmitir na mesma, devendo então procurar outra não utilizada. No protocolo *underlay* usuários secundários podem transmitir simultaneamente com usuários primários desde que sua interferência esteja abaixo de um certo limite. Assim, a potência de transmissão do secundário é limitada pelo nível de interferência aceito pelo usuário primário. No protocolo *overlay* o usuário secundário conhece a mensagem do usuário primário. Com esse conhecimento e usando técnicas avançadas de comunicação pode transmitir de forma concorrente com o primário. Em [4] é demonstrado que o protocolo *overlay* pode atingir uma maior capacidade entre os protocolos de comunicação cognitiva.

Em [5] Tannious e Nosratinia propõem um protocolo *overlay* de comunicação cognitiva em que o secundário se comunica aproveitando oportunidades originadas nas retransmissões do primário. Em muitos casos há um excesso de informação mútua depois de uma retransmissão, com respeito à mínima informação mútua requerida para decodificação correta, tal que o primário pode tolerar uma certa quantidade de interferência sem perda de desempenho. Entretanto, ainda assim por vezes a comunicação do enlace secundário pode causar uma interferência no primário acima da tolerável. Ainda em [5], Tannious e Nosratinia propõem uma solução para eliminar a interferência do secundário sobre o primário, mas que pressupõe conhecimento de todos os canais (secundário-secundário, secundário-primário e primário-primário) pelo transmissor secundário. Note que tal conhecimento global dos canais é muito difícil de se conseguir na prática. Em [6] é considerado um cenário semelhante, mas onde são usadas múltiplas antenas pelos secundários. O uso de múltiplas antenas possibilita uma grande diminuição na interferência no enlace primário e boas taxas no enlace secundário sem necessitar de conhecimento prévio do canal no transmissor. Porém, o uso desta estratégia é complicado nos casos onde o tamanho ou custo do dispositivo impossibilita a instalação de múltiplas antenas.

Uma alternativa ao uso de múltiplas antenas é a comunicação cooperativa [7]–[9], em que um ou mais nós atuam como retransmissores (*relays*) e cooperam com a comunicação entre fonte e destino, possibilitando a obtenção de diversidade espacial mesmo em redes cujos dispositivos são providos de somente uma antena. Em [7], foram apresentados dois protocolos de comunicação cooperativa: amplifica e encaminha (AF) e decodifica e encaminha (DF). No protocolo AF o *relay* amplifica o sinal e reencaminha para o destino. Já no protocolo DF, o *relay* tenta decodificar a mensagem da fonte para então recodificar e encaminhá-la para o destino. Com o protocolo DF é possível transmitir com taxas diferentes no transmissor e no *relay*. O protocolo DF possui duas subdivisões: DF fixo (FDF) e DF seletivo (SDF). No protocolo FDF o *relay* sempre encaminha a mensagem para o destino mesmo que não tenha conseguido decodificar, enquanto que no SDF o *relay* só encaminha se não ocorreram erros na

S. B. Mafra e E. M. G. Fernandez, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil. E-mails: mafrasamuel@gmail.com, evelio@ufpr.br.
R. D. Souza e J. L. Rebelatto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Paraná, Brasil. E-mails: richard@utfpr.edu.br, jlrebelatto@utfpr.edu.br

decodificação. No caso de haver canal de retorno, é possível ainda usar o protocolo DF incremental (IDF) em que o *relay* só encaminha a mensagem para o destino caso este tenha requisitado uma retransmissão.

Neste artigo consideramos o mesmo cenário que [5], [6], porém exploramos o uso de comunicação cooperativa na rede secundária. Em particular consideramos os protocolos cooperativos SDF e IDF. O objetivo principal é aumentar a taxa de transmissão do enlace secundário sobre os esquemas existentes na literatura, sem prejudicar significativamente o desempenho do enlace primário, sem precisar de conhecimento prévio dos canais pelo transmissor secundário nem de múltiplas antenas transmissoras e receptoras. Apresentamos o equacionamento da probabilidade de *outage* e do *throughput* considerando o novo esquema proposto, e demonstramos através dos resultados numéricos que o uso de cooperação no enlace secundário pode garantir altas taxas sem afetar o desempenho do primário.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção II são descritos o modelo do sistema e o protocolo proposto, enquanto que na Seção III são detalhados os equacionamentos de *outage* e *throughput* para o esquema proposto. Na Seção IV são apresentados os resultados numéricos, enquanto que a Seção V encerra o artigo.

## II. Modelo do Sistema

Consideramos uma rede primária composta por um transmissor $T_p$ e um destino $D_p$. O enlace secundário é composto de um transmissor secundário $T_s$, um *relay* $R_s$ e um destino secundário $D_s$, conforme a Figura 1. O canal entre o transmissor $i$ e o receptor $j$ é denotado por $h_{ij}$ e segue uma distribuição Rayleigh, sendo do tipo quase estático com energia média $\lambda_{ij}$. Consideramos uma notação onde $i, j \in \{p, s, r\}$, sendo o indíce $p$ reservado ao transmissor ou destino primário, $s$ ao transmissor ou destino secundário e $r$ ao *relay*. A energia $\lambda_{ij}$ é definida como $\lambda_{ij} = \frac{1}{(dn_{ij})^{\alpha}}$, onde $dn_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_{pp}}$ representa a normalização da distância entre o transmissor $i$ e o receptor $j$ com relação à distância transmissor primário-receptor primário ($d_{pp}$), e $\alpha$ é o expoente de perda de percurso. A rede secundária se comunica na mesma frequência e espaço de tempo que a rede primária. A densidade espectral de potência do ruído ($N_0$) é assumida unitária. Além disso, em todas as equações consideramos o logaritmo na base 2.

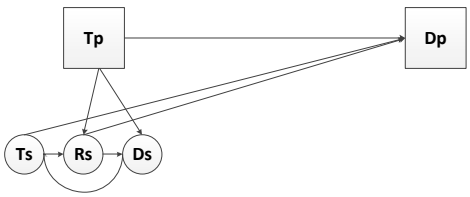


Fig. 1. Modelo do sistema, contendo transmissor primário $T_p$, destino primário $D_p$, transmissor secundário $T_s$, *relay* $R_s$ e destino secundário $D_s$.

Assume-se que o sinal recebido pelo nó $j$, $y_{ij}$, é:

$$y_{ij} = \sqrt{P_i} h_{ij} x_i + z_j, \tag{1}$$

em que $P_i$ é a potência de transmissão do nó $i$, $x_i$ a mensagem transmitida pelo nó $i$ e $z_j$ é o ruído AWGN.

A probabilidade de *outage* é a probabilidade de falha na comunicação entre os nós $i$ e $j$ [10]. Um evento de *outage* ocorre quando a informação mútua é menor que uma taxa $\mathcal{R}_k$ esperada, em que $k \in \{p, s\}$, sendo o indíce $p$ reservado ao enlace primário e $s$ ao enlace secundário. Supondo uma banda unitária, a probabilidade de *outage* é dada por [7]:

$$\mathcal{P}_{out} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{ij}|^2 P_i) < \mathcal{R}_k\}, \tag{2}$$

em que $\mathcal{P}\{a\}$ representa a probabilidade do evento $a$. Por sua vez, o *throughput* esperado do enlace $k$ é a taxa líquida de transmissão sem erro, sendo dado por [10]:

$$\mathcal{T}_k = \mathcal{R}_k(1 - \mathcal{P}_{out}). \tag{3}$$

### A. Protocolo Proposto

Em termos gerais, o protocolo de comunicação proposto pode ser descrito pelas seguintes etapas:

1) O nó primário transmite um pacote e os receptores primário e secundário escutam. Se o receptor primário decodifica com sucesso a mensagem, um reconhecimento positivo (*ACK*) é transmitido. O transmissor primário está apto a mandar uma nova mensagem. O receptor secundário ouve o *ACK* e descarta o pacote. Entretanto, se o destino primário envia um reconhecimento negativo (*NACK*), então $T_p$ faz uma retransmissão.
2) Ao ouvir um *NACK* o receptor secundário verifica se conseguiu decodificar o sinal do transmissor primário. Em caso de sucesso $D_s$ enviará um "pronto para enviar"(*CTS*) para $T_s$, que inicia a sua transmissão. A comunicação acontece em duas etapas. Na primeira etapa, ao receber um *CTS*, o transmissor secundário transmite a sua mensagem para o *relay* e o destino secundário. Na segunda etapa o *relay* encaminha a mensagem para o destino secundário[1]. Caso o *relay* não consiga decodificar a mensagem do transmissor primário, a mensagem de $T_s$ é descartada. *Relay* e destino secundário podem eliminar a interferência do primário por conhecer sua mensagem.
3) Ambos receptores decodificam as mensagens e em caso de falha declaram *outage*. O destino primário declara *outage* depois que as duas transmissões de $T_p$ falham. O receptor secundário declara *outage* quando a transmissão de $T_s$ e a do *relay* falham.

## III. Probabilidade de *Outage* e *Throughput*

Nesta seção determinamos o equacionamento da probabilidade de *outage* e do *throughput* para o esquema proposto. Consideramos primeiro o desempenho do enlace primário quando o enlace secundário está inativo, depois analisamos o desempenho dos enlaces primário e secundário quando a rede secundária cooperativa proposta está ativa, e por fim descrevemos o desempenho no caso de uma rede secundária não cooperativa como proposto por Tannious e Nosratinia [5].

[1] As comunicações do transmissor secundário e do *relay* precisam ocorrer durante o intervalo da retransmissão do primário.

### A. Rede Secundária Inativa

Definindo $\mathcal{P}\{O_{ini}\}$ como sendo a probabilidade de *outage* da transmissão inicial do usuário primário, então:

$$\begin{aligned}\mathcal{P}\{O_{ini}\} &= \mathcal{P}\{\log(1+|h_{pp}|^2P_p) < \mathcal{R}_p\} \\ &= 1-\exp\left(-\frac{2^{\mathcal{R}_p}-1}{\lambda_{pp}P_p}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Considerando apenas uma retransmissão, um evento de *outage* ocorre na rede primária quando a informação mútua acumulada de duas transmissões for menor que uma taxa $\mathcal{R}_p$. O enlace primário usa o esquema de redundância incremental (IR) entre as duas transmissões e considera-se que os canais não mudam entre as duas transmissões do enlace primário. Denotada por $\mathcal{P}\{O_{ref}\}$, a probabilidade de *outage* do primário após uma retransmissão é dada por :

$$\begin{aligned}\mathcal{P}\{O_{ref}\} &= \mathcal{P}\{2\log(1+|h_{pp}|^2P_p) < \mathcal{R}_p\} \\ &= 1-\exp\left(-\frac{2^{\frac{\mathcal{R}_p}{2}}-1}{\lambda_{pp}P_p}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

O *throughput* esperado $\mathcal{T}_{ref}$ depende de o pacote ter sido recebido em uma ou duas tentativas, e é dado por:

$$\begin{aligned}\mathcal{T}_{ref} &= \mathcal{R}_p\mathcal{P}\{\overline{O}_{ini}\} + \frac{\mathcal{R}_p}{2}\mathcal{P}\{\overline{O}_{ref}, O_{ini}\} \\ &= \mathcal{R}_p\mathcal{P}\{\overline{O}_{ini}\} + \frac{\mathcal{R}_p}{2}\mathcal{P}\{O_{ini}\}\mathcal{P}\{\overline{O}_{ref}|O_{ini}\} \\ &= \mathcal{R}_p\mathcal{P}\{\overline{O}_{ini}\} + \frac{\mathcal{R}_p}{2}\mathcal{P}\{O_{ini}\}\cdot\left(1-\frac{\mathcal{P}\{O_{ref}\}}{\mathcal{P}\{O_{ini}\}}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

em que $\mathcal{P}\{\overline{a}\}$ representa a probabilidade complementar do evento $a$, ou seja, $\mathcal{P}\{\overline{a}\} = 1-\mathcal{P}\{a\}$. Para obter (6) consideramos que:

$$\begin{aligned}\mathcal{P}\{\overline{O}_{ref}|O_{ini}\} &= 1-\mathcal{P}\{O_{ref}|O_{ini}\} \\ &= 1-\mathcal{P}\{O_{ini}|O_{ref}\}\frac{\mathcal{P}\{O_{ref}\}}{\mathcal{P}\{O_{ini}\}} \\ &= 1-\frac{\mathcal{P}\{O_{ref}\}}{\mathcal{P}\{O_{ini}\}}. \end{aligned} \quad (7)$$

### B. Rede Secundária Cooperativa

Neste caso é necessário analisar o desempenho do sistema quando a rede secundária cooperativa está ativa. Para tal, primeiro considere a probabilidade de que o destino secundário não consiga decodificar a mensagem do primário:

$$\mathcal{P}\{O_{ps}\} = \mathcal{P}\{\log(1+|h_{ps}|^2P_p) < \mathcal{R}_p\}. \quad (8)$$

Definindo $\mathcal{P}\{U_d\}$ como a probabilidade que o enlace secundário está ativo, ou seja houve falha na transmissão inicial do primário e o destino secundário conseguiu decodificar corretamente a mensagem do primário, então:

$$\mathcal{P}\{U_d\} = \mathcal{P}\{O_{ini}\}\cdot(1-\mathcal{P}\{O_{ps}\}). \quad (9)$$

Por sua vez, a probabilidade de *outage* do primário na presença do secundário $\mathcal{P}\{O_p\}$, é dada por:

$$\mathcal{P}\{O_p\} = \underbrace{\mathcal{P}\{O_p|U_d\}\cdot\mathcal{P}\{U_d\}}_{(A)} + \underbrace{\mathcal{P}\{O_p|\overline{U_d}\}\cdot\mathcal{P}\{\overline{U_d}\}}_{(B)}. \quad (10)$$

O termo (A) da equação (10) representa a probabilidade de ocorrência do evento em que houve *outage* no primário e o secundário decodificou corretamente, enquanto que em (B) houve *outage* no primário entretanto o secundário não decodificou corretamente a mensagem do primário.

O termo (A) em (10) pode ser re-escrito como:

$$\begin{aligned}\mathcal{P}\{O_p|U_d\}\mathcal{P}\{U_d\} &= \mathcal{P}\{O_p|O_{ini},\overline{O_{ps}}\}\mathcal{P}\{O_{ini},\overline{O_{ps}}\} \\ &= \mathcal{P}\{O_p\}\mathcal{P}\{O_{ini}|O_p\}\mathcal{P}\{\overline{O_{ps}}|O_p\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Como para ocorrer *outage* no primário é necessário que também tenha ocorrido *outage* na transmissão inicial, (11) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}\mathcal{P}\{O_p|U_d\}\mathcal{P}\{U_d\} &= \mathcal{P}\{O_p\}\mathcal{P}\{\overline{O_{ps}}|O_p\} \\ &= \mathcal{P}\{O_p|\overline{O_{ps}}\}\mathcal{P}\{\overline{O_{ps}}\} \\ &= \mathcal{P}\{\log(1+|h_{pp}|^2P_p) \\ &+ (\frac{1}{2}\log\left(1+\frac{|h_{pp}|^2P_p}{1+|h_{sp}|^2P_s}\right) \\ &+ \frac{1}{2}\log\left(1+\frac{|h_{pp}|^2P_p}{1+|h_{rp}|^2P_r}\right)) < \mathcal{R}_p\} \\ &\cdot\mathcal{P}\{\log(1+|h_{ps}|^2P_p) \geq \mathcal{R}_p\}, \end{aligned} \quad (12)$$

em que o primeiro termo em (12), representa a probabilidade da informação mútua do enlace primário na $1^a$ transmissão somada à informação mútua da $2^a$ transmissão (na presença da interferência do enlace secundário) ser menor que a taxa $\mathcal{R}_p$.

O termo (B) em (10) pode ser re-escrito como:

$$\begin{aligned}\mathcal{P}\{O_p|\overline{U_d}\}\mathcal{P}\{\overline{U_d}\} &= \mathcal{P}\{O_p,\overline{U_d}\} \\ &= \mathcal{P}\{O_p,\overline{O_{ini},\overline{O_{ps}}}\} \\ &= \mathcal{P}\{2\log(1+|h_{pp}|^2P_p) < \mathcal{R}_p\} \\ &\cdot\mathcal{P}\{\log(1+|h_{ps}|^2P_p) < \mathcal{R}_p\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Assim, podemos escrever o *throughput* do primário na presença do secundário, $\mathcal{T}_p$, como:

$$\begin{aligned}\mathcal{T}_p &= \mathcal{R}_p\mathcal{P}\{\overline{O}_{ini}\} + \frac{\mathcal{R}_p}{2}\mathcal{P}\{\overline{O}_p|O_{ini}\} \\ &= \mathcal{R}_p\mathcal{P}\{\overline{O}_{ini}\} \\ &+ \frac{\mathcal{R}_p}{2}(\mathcal{P}\{\overline{O}_p|O_{ini},\overline{O_{ps}}\}\cdot\mathcal{P}\{\overline{O_{ps}}\} + \mathcal{P}\{\overline{O}_p|O_{ini},O_{ps}\}\cdot\mathcal{P}\{O_{ps}\}) \\ &= \mathcal{R}_p\cdot(1-\mathcal{P}\{O_{ini}\}) \\ &+ \frac{\mathcal{R}_p}{2}\left(\mathcal{P}\{\log(1+|h_{pp}|^2P_p) < \mathcal{R}_p \leq \log(1+|h_{pp}|^2P_p)\right. \\ &+ \frac{1}{2}\log\left(1+\frac{|h_{pp}|^2P_p}{1+|h_{sp}|^2P_s}\right) + \frac{1}{2}\log\left(1+\frac{|h_{pp}|^2P_p}{1+|h_{rp}|^2P_r}\right)\} \\ &\cdot\mathcal{P}\{\log(1+|h_{ps}|^2P_p) \geq \mathcal{R}_p\}\ ) \\ &+ \frac{\mathcal{R}_p}{2}(\mathcal{P}\{\log(1+|h_{pp}|^2P_p) < \mathcal{R}_p \leq 2\log(1+|h_{pp}|^2P_p)\} \\ &\cdot\mathcal{P}\{\log(1+|h_{ps}|^2P_p) < \mathcal{R}_p\}). \end{aligned} \quad (14)$$

O primeiro termo em (14) representa o caso em que houve transmissão inicial com sucesso no enlace primário; o segundo termo corresponde ao caso em que foi pedida uma retransmissão e o destino secundário decodificou corretamente a mensagem do primário; o terceiro termo representa o caso

em que é pedida uma retransmissão mas o destino secundário não conseguiu decodificar a mensagem do primário. Pelo equacionamento acima observa-se que a rede secundária só causa interferência no destino primário quando ocorre uma retransmissão, e a mensagem do primário foi decodificada corretamente pelo destino secundário[2].

Definindo-se como $\mathcal{P}\{O_{ss}\}$ e $\mathcal{P}\{O_{sr}\}$ as probabilidades de falha dos enlaces transmissor secundário-destino secundário e transmissor secundário-*relay*, respectivamente, então:

$$\mathcal{P}\{O_{ss}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{ss}|^2 P_s) < \mathcal{R}_s\}, \quad (15)$$

$$\mathcal{P}\{O_{sr}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{sr}|^2 P_s) < \mathcal{R}_s\}. \quad (16)$$

Para o *relay* se comunicar com o destino secundário é necessário que não tenha havido falha no enlace transmissor secundário-*relay* e que tenha sido decodificada corretamente a mensagem do primário no destino secundário assim como no *relay*. Definindo-se como $\mathcal{P}\{O_{pr}\}$ a probabilidade que o *relay* não tenha decodificado corretamente a mensagem do primário e $\mathcal{P}\{U_r\}$ a probabilidade do link secundário estar ativo e que o *relay* tenha decodificado as mensagens dos transmissores primário e secundário:

$$\mathcal{P}\{O_{pr}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{pr}|^2 P_p) < \mathcal{R}_p\}, \quad (17)$$

$$\mathcal{P}\{U_r\} = \mathcal{P}\{U_d\} \cdot [(1 - \mathcal{P}\{O_{pr}\}) \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{sr}\})]. \quad (18)$$

A probabilidade do destino não decodificar corretamente a mensagem vinda do *relay* escolhido é denotada por $\mathcal{P}\{O_{rs}\}$:

$$\mathcal{P}\{O_{rs}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{rs}|^2 P_s) < \mathcal{R}_s\}. \quad (19)$$

O *throughput* do secundário usando cooperação é[3]:

$$\mathcal{T}_{scop}^{SDF} = \frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_d\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{ss}\}) + \frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_r\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{rs}\}) \cdot \mathcal{P}\{O_{ss}\}, \quad (20)$$

para o caso do protocolo cooperativo SDF, e

$$\mathcal{T}_{scop}^{IDF} = \mathcal{R}_s \cdot \mathcal{P}\{U_d\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{ss}\}) + \frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_r\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{rs}\}) \cdot \mathcal{P}\{O_{ss}\}, \quad (21)$$

para o protocolo IDF.

Para os dois métodos a primeira parte da equação refere-se ao caso em que o destino consegue decodificar a mensagem do transmissor secundário, já a segunda parte refere-se ao caso em que o destino não consegue decodificar a mensagem do transmissor mas decodifica a mensagem do *relay*. No primeiro termo da equação do IDF a taxa esperada é $\mathcal{R}_s$ e não $\frac{\mathcal{R}_s}{2}$ pois no caso IDF havendo sucesso na decodificação da mensagem no destino secundário (informado via um sinal de *ACK*), o transmissor secundário envia uma nova mensagem no segundo intervalo de tempo enquanto o *relay* fica em silêncio, com isso obtém-se o dobro da eficiência em relação ao SDF [7].

[2]Para facilitar o equacionamento é considerado que as distâncias do transmissor secundário e do *relay* para o destino primário são praticamente iguais.

[3]O destino secundário aplica combinação por seleção entre as mensagens do transmissor secundário e do *relay*, de modo que um evento de *outage* só ocorre se os enlaces transmissor secundário-destino secundário e *relay*-destino secundário estiverem em *outage* ao mesmo tempo.

### C. Rede Secundária não Cooperativa

Nesta seção consideramos o caso em que a rede secundária não é cooperativa, que vem a ser o esquema proposto por Tannious e Nosratinia em [5]. Assim, a probabilidade de *outage* do enlace secundário $\mathcal{P}\{O_s\}$ é:

$$\mathcal{P}\{O_s\} = 1 - (\mathcal{P}\{U_d\} \cdot \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{ss}|^2 P_s) \geq \mathcal{R}_s\}), \quad (22)$$

e o seu *throughput*, $\mathcal{T}_s$, é simplesmente:

$$\mathcal{T}_s = \mathcal{R}_s(1 - \mathcal{P}\{O_s\}). \quad (23)$$

## IV. Resultados

Esta seção apresenta os resultados numéricos de desempenho do modelo proposto com cooperação no enlace secundário. Em todos os resultados é considerado coeficiente de perda de percurso $\alpha = 4$ e distâncias normalizadas com relação à distância transmissor-receptor primário ($d_{pp} = 1$). Além disso é considerado que o *relay* está no meio do caminho entre o transmissor e o destino secundário. As distâncias entre transmissor secundário-destino primário e *relay*-destino primário são consideradas aproximadamente iguais, assim como as distâncias transmissor primário-destino secundário e transmissor primário-*relay*. Por fim, assumimos que o *relay* e o transmissor secundário usam a mesma potência.

Na Figura 2 é apresentado o *throughput* do sistema em função da potência do transmissor secundário. A transmissão direta no enlace secundário (curva "sec não coop") representa o esquema proposto por Tannious e Nosratinia [5]. Os parâmetros usados são $\mathcal{R}_p = 4$ bits por uso do canal (bpcu), $\mathcal{R}_s = 4$ bpcu, $P_p = 10$ dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{sp} = \lambda_{rp} = 1$, $\lambda_{ps} = \lambda_{pr} = \lambda_{ss} = 2^4$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 4^4$, simulando a situação em que a rede secundária encontra-se mais próxima do transmissor do que do receptor primário.Verifica-se na Figura 2 que para $P_s = -9$ dB, a transmissão com o uso de cooperação de acordo com o método proposto atinge um *throughput* de 0,5 bpcu com uma perda de desempenho muito pequena no enlace primário para os métodos SDF e IDF, enquanto que para o esquema não cooperativo de Tannious e Nosratinia o *throughput* do secundário é nulo. Note que para valores maiores de $P_s$ o método IDF supera muito o método SDF, entretanto já há uma perda considerável no desempenho do primário. Além disso, o esquema proposto usando o protocolo IDF supera o esquema de Tannious e Nosratinia para todos os valores de $P_s$.

Na Figura 3 é feita uma análise parecida mas com os nós do enlace secundário mais próximos entre si, tal que consideramos $\mathcal{R}_p = 4$ bpcu, $\mathcal{R}_s = 6$ bpcu, $P_p = 10$ dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{sp} = \lambda_{rp} = 1$, $\lambda_{ps} = \lambda_{pr} = 2^4$, $\lambda_{ss} = 4^4$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 8^4$. Verifica-se na Figura 3 que para $P_s = -9$ dB o enlace secundário atinge um *throughput* igual ao alcançado pelo enlace primário praticamente sem perda de desempenho por parte do primário. Caso o par primário aceite um pouco de perda de desempenho, é possível atingir na rede secundária taxas maiores que as alcançadas pelo enlace primário.

Por fim, na Figura 4 consideramos que os nós da rede secundária estão próximos do receptor primário, tal que $\mathcal{R}_p = 4$ bpcu, $\mathcal{R}_s = 6$ bpcu, $P_p = 10$dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{ps} = \lambda_{pr} = 1$, $\lambda_{sp} = \lambda_{rp} = \lambda_{ss} = 2^4$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 4^4$. Fica claro que

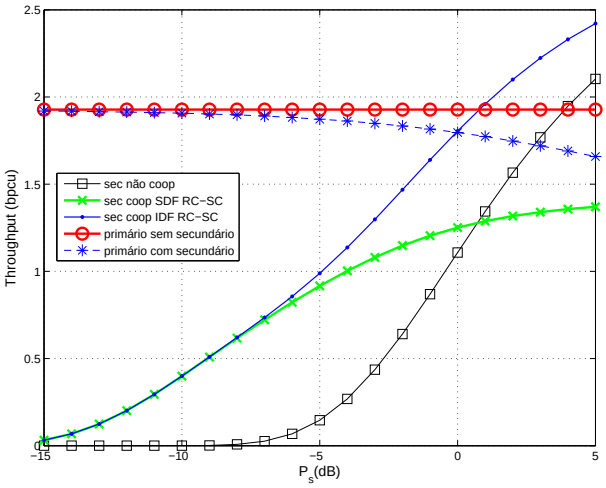


Fig. 2. *Throughput* versus $P_s$, para $\mathcal{R}_p = 4$ bpcu, $\mathcal{R}_s = 4$ bpcu, $P_p = 10$ dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{sp} = \lambda_{rp} = 1$, $\lambda_{ps} = \lambda_{pr} = \lambda_{ss} = 2^4$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 4^4$.

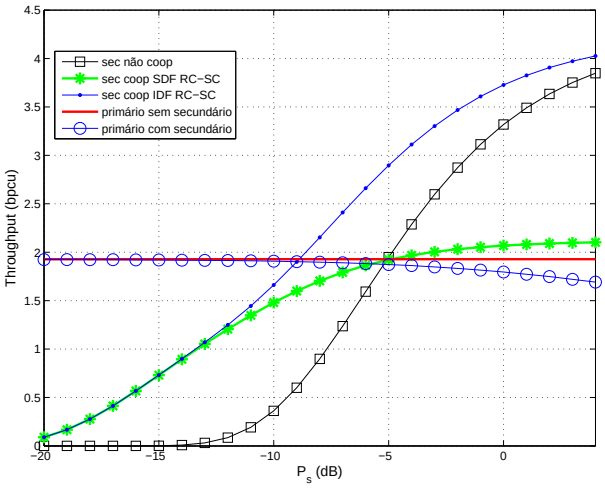


Fig. 3. *Throughput* versus $P_s$, para $\mathcal{R}_p = 4$ bpcu, $\mathcal{R}_s = 6$ bpcu, $P_p = 10$ dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{sp} = \lambda_{rp} = 1$, $\lambda_{ps} = \lambda_{pr} = 2^4$, $\lambda_{ss} = 4^4$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 8^4$.

o desempenho da rede secundária é muito ruim quando está próxima ao destino primário, devido ao fato que como está mais distante do transmissor primário, fica mais difícil decodificar a mensagem e a sua interferência no destino primário é grande. Assim, o esquema proposto é adequado para o caso em que a rede secundária está próxima do transmissor primário.

## V. Conclusões

Neste artigo foi apresentado um novo protocolo cooperativo de rádio cognitivo *overlay*, em que a rede secundária explora as retransmissões da rede primária. Através do uso de cooperação na rede secundária é possível atingir taxas mais elevadas que em esquemas sem cooperação, com uma perda de desempenho muito pequena no enlace primário. A configuração ótima para a comunicação em termos de *throughput* ocorre quando os nós da rede secundária estão próximos entre si e também próximos

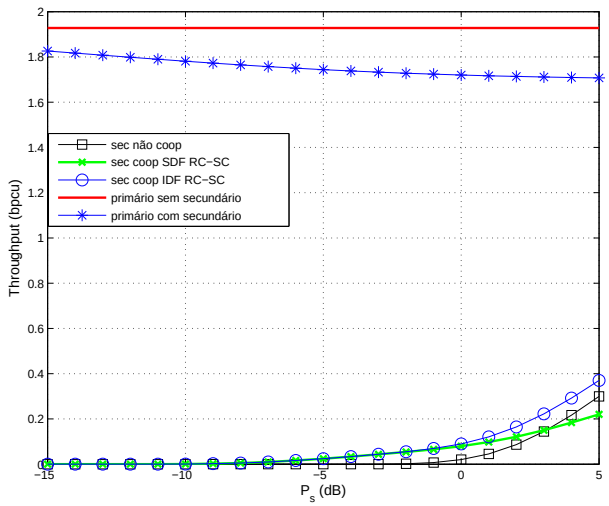


Fig. 4. *Throughput* versus $P_s$, para $\mathcal{R}_p = 4$ bpcu, $\mathcal{R}_s = 6$ bpcu, $P_p = 10$dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{ps} = \lambda_{pr} = 1$, $\lambda_{sp} = \lambda_{rp} = \lambda_{ss} = 2^4$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 4^4$.

ao transmissor primário. Nesta situação, pode-se alcançar taxas no enlace secundário até mesmo maiores que as alcançadas pelo enlace primário.

## Agradecimentos

Samuel Baraldi Mafra agradece à CAPES pela bolsa de mestrado recebida.

## Referências

[1] J. Mitola, G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Agosto 1999.

[2] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Fevereiro 2005.

[3] A. Goldsmith, S. Jafar, I. Maric e S. Srinivasa, "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: an information theoretic perspective," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894-914, Maio 2009.

[4] S. Srinivasa, S. A. Jafar, "The throughput potential of cognitive radio: a theoretical perspective," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 5, pp. 73-79, Maio 2007.

[5] R. A. Tannious, A. Nosratinia, "Cognitive radio protocols based on exploiting hybrid ARQ retransmissions," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 9, no. 9, pp. 2833-2841, Setembro 2010.

[6] R. D. Souza, "Reducing co-existence penalty of retransmission-based cognitive radio protocol," *Electronics Letters*, vol. 47, no. 6, pp. 409-411, Março 2011.

[7] J. N. Laneman, D. N. C. Tse e G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dezembro 2004.

[8] A. Sendonaris, E. Erkip e B. Aazhang, "User cooperation diversity. Part I. System description," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927-1938, Novembro 2003.

[9] A. Nosratinia, T. E. Hunter e A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74-80, Outubro 2004.

[10] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.