

Análise de Desempenho do Protocolo Cog-PRMA sob Sensoriamento Imperfeito

Daniel Siqueira e José Marcos Câmara Brito

Resumo— Este artigo estende análises previamente apresentadas na literatura para incluir o efeito do sensoriamento imperfeito em uma rede de rádios cognitivos que utiliza protocolo de múltiplo acesso por divisão de tempo na rede primária e protocolo de múltiplo acesso cognitivo com reserva de pacote na rede secundária. A vazão da rede secundária é calculada sob esta nova condição (sensoriamento imperfeito) e comparada com os resultados prévios.

Palavras-Chave— Sensoriamento Imperfeito, rádios cognitivos, Cog-PRMA, análise de desempenho, múltiplo acesso.

Abstract— This article extends prior analyses presented in the literature to include the effect of imperfect sensing in a cognitive radio network that uses multiple access protocols for split time in the primary network and multiple cognitive Access Protocol with reservation of the package in the secondary network. The flow of the secondary network is calculated under this new condition (imperfect sensing) and compared with previous results.

Keywords— Imperfect sensing, cognitive radio, Cog-PRMA, performance analysis, multiple access.

I. INTRODUÇÃO

O crescimento do número de terminais e do tráfego nas redes sem fio demanda a utilização de novas técnicas que resultem no uso mais eficiente do espectro de radiofrequência. O acesso oportunístico no contexto dos rádios cognitivos é um exemplo de uma técnica promissora a ser incorporada nas futuras redes de comunicação sem fio.

A ideia do acesso oportunístico é utilizar o espaço não alocado, no domínio do tempo ou da frequência, para permitir o acesso ao canal de usuários denominados secundários (US), sem que estes interfiram, ou interfiram minimamente, nos usuários detentores do direito de uso do canal, denominados usuários primários (UP). [1]

Assim, uma rede de rádios cognitivos é formada por UPs, detentores do direito de uso do canal, e USs, que utilizam o canal de forma oportunística. Em uma das formas de implementação das redes de rádios cognitivos, que é a considerada neste artigo, os USs fazem o sensoriamento do canal para verificar se o mesmo está ocioso (ausência do usuários primário) e só transmitem se perceberem o canal como livre. Logo, os USs precisam detectar a atividade dos UPs antes de transmitirem seus pacotes.

Devido a limitações práticas nos dispositivos cognitivos, o processo de sensoriamento não é perfeito e erros de sensoriamento podem ocorrer: o canal pode estar livre e ser detectado como ocupado (falso alarme) ou o canal pode estar ocupado

e ser detectado como livre (erro de detecção). Assim, existe a possibilidade de um US transmitir simultaneamente em um mesmo canal com um UP, interferindo na transmissão deste.

O múltiplo acesso é um elemento chave em uma rede na qual o meio é compartilhado. No âmbito das redes de rádios cognitivos ele pode estar presente tanto na rede primária, regulando o acesso dos usuários primários ao canal, quanto na rede secundária, regulando o acesso dos USs às oportunidades de transmissão no canal.

Diversas técnicas de múltiplo acesso vêm sendo propostas, analisadas e implementadas nas redes de telecomunicações tradicionais ao longo dos últimos 40 anos. O advento das redes multimídia levou a propostas além das clássicas, como a técnica denominada *Packet Reservation Multiple Access* (PRMA), cujo desempenho foi analisado em [2], [3], [4] e [5].

Resumidamente, no PRMA os usuários podem transmitir pacotes classificados como periódicos ou não periódicos. O canal é dividido em quadros e janelas de tempo e os terminais transmitem nas janelas de tempo segundo o protocolo de acesso denominado *Slotted-Aloha*. Se um terminal transmite com sucesso um pacote periódico em uma janela, isto resulta na reserva desta janela para o terminal em questão no quadro seguinte. Ou seja, no quadro seguinte este terminal poderá transmitir seu pacote na mesma janela sem colisão. [3] [6]

Uma versão cognitiva do protocolo PRMA (Cog-PRMA) foi proposta e analisada por Hu e Yao em [7] para uso por USs que compartilham uma rede com UPs, que por sua vez utilizam o múltiplo acesso *Time Division Multiple Access* (TDMA) para compartilhar o canal.

O desempenho do protocolo Cog-PRMA foi analisado em [7] considerando que o processo de sensoriamento do canal é perfeito, o que não corresponde ao que é possível na implementação do protocolo em uma rede real.

O objetivo deste artigo é estender as análises apresentadas em [7] considerando agora o caso real em que o sensoriamento do canal é imperfeito. O parâmetro de desempenho analisado é o mesmo considerado em [7], ou seja, a vazão da rede secundária.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II descreve o sistema considerado e resume as análises apresentadas em [7] para o protocolo Cog-PRMA; na Seção III apresenta-se o novo modelamento proposto; na Seção IV apresenta-se o cálculo da vazão na rede secundária e na Seção V os resultados numéricos obtidos; finalmente, na Seção VI apresentam-se as conclusões.

Daniel Siqueira e José Marcos Câmara Brito Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí-MG, Brasil. E-mails: daniel.teleco@mtel.inatel.br, brito@inatel.br.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Nesta seção descreve-se o sistema considerado nas análises e resume-se o modelamento matemático originalmente apresentado em [7]. Assume-se uma topologia em estrela tanto na rede primária quanto na rede secundária, nas quais os terminais de cada rede se comunicam com sua respectiva estação rádio base central.

Na rede primária considera-se o uso do protocolo TDMA, no qual o tempo é dividido em quadros e cada quadro é subdividido em janelas de transmissão *slots*. Na rede secundária, cada *slot* da rede primária é dividido em dois períodos: um *mini-slot*, que é utilizado pelo US para sensoriar o canal da rede primária e decidir se o *slot* está ocioso ou não; e o restante do *slot*, no qual é transmitido o pacote do US. Na rede secundária utiliza-se o protocolo Cog-PRMA, que será brevemente descrito a seguir.

Na rede secundária tem-se a geração de pacotes periódicos (como pacotes de voz) e não periódicos. No entanto, como no PRMA, no Cog-PRMA apenas pacotes periódicos geram reservas e, portanto, apenas estes foram considerados nas análises apresentadas em [7] e apenas estes serão considerados nas análises aqui propostas.

Assume-se, como em [2] e [3], que o processo de chegada de pacotes de voz nos USs é descrito por uma Cadeia de Markov de dois estados usualmente utilizada para modelar o processo de fala, com perfil de tráfego em rajada.

Neste modelo o processo pode estar no estado Talk (fala), em que há geração de tráfego, ou no estado Sil (silêncio), em que não há geração de tráfego. A probabilidade de transição do estado Talk para o estado Sil é β e a probabilidade de transição do estado Sil para o estado Talk é α como ilustrado na Fig. 1.

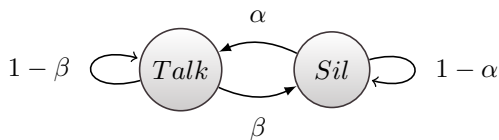


Fig. 1. Cadeia de Markov para o modelo de Fala

Assume-se que o intervalo de duração do silêncio e da conversação são exponencialmente distribuídos com média t_1 para o silêncio e t_2 para a fala. Assim, assumindo que a duração do time-slot é τ , as probabilidades de transição entre os estados de silêncio e fala são dadas por: [7]

$$\alpha = 1 - e^{-\frac{\tau}{t_1}} \quad (1)$$

$$\beta = 1 - e^{-\frac{\tau}{t_2}} \quad (2)$$

Definindo N_p como o número de *time slots* por quadro na rede primária, a probabilidade que um intervalo de silêncio termine em um quadro TDMA, α_f , é dada por:

$$\alpha_f = 1 - (1 - \alpha)^{N_p} \quad (3)$$

Similarmente, a probabilidade que uma rajada de fala termine em um quadro TDMA, β_f , é dada por:

$$\beta_f = 1 - (1 - \beta)^{N_p} \quad (4)$$

O processo de geração e transmissão de pacotes pelos USs é descrito pela Cadeia de Markov de três estados ilustrada na Fig.2.

O US está originalmente no estado silêncio e transita deste estado para o estado contenção quando um pacote é gerado.

No estado contenção o US irá sensoriar o canal e, se detectar que o *time slot* está livre, transmitirá com probabilidade p_s , que é o parâmetro Probabilidade de Permissão de Acesso do PRMA. Se a transmissão teve sucesso (ou seja, não houve colisão), o usuário passa para o estado reserva, onde transmite seus demais pacotes (sem contenção) nos quadros seguintes. Assume-se que a probabilidade de permissão de acesso é invariante no tempo e possui o mesmo valor para todos os terminais. A transição do estado reserva para o estado silêncio ocorre quando o US encerra sua conversação.

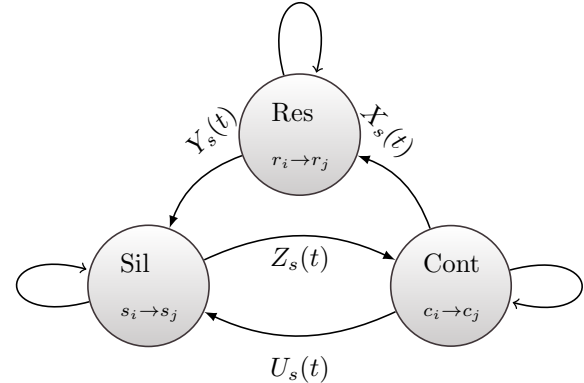


Fig. 2. Relacionamento entre os estados de Silêncio, Contenção e Reserva

As seguintes variáveis são definidas para o modelamento do sistema:

R_s : Número de USs no estado de Reserva no início do quadro;

C_s : Número de USs no estado de Contenção no início do quadro;

S_s : Número de USs no estado de Silêncio no início do quadro;

H_s : Número de USs no estado de Fala no início do quadro;

W_s : Número de USs na Rede de Rádios Cognitivos.

A relação entre estas variáveis é expressa nas Eqs. 5 e 6:

$$H_s = R_s + C_s \quad (5)$$

$$W_s = R_s + C_s + S_s \quad (6)$$

O comportamento do sistema é modelado como uma Cadeia de Markov de duas dimensões, com uma dimensão sendo o número de USs no estado de reserva da cadeia ilustrada na Fig. 2 e a outra sendo o número de usuários em conversação.

Sejam $\varepsilon_i = (r_i, h_i)$, e $\varepsilon_j = (r_j, h_j)$ estados vizinhos da cadeia bidimensional, nos quais r_i e h_i representam o número de USs em reserva e conversação no estado i e r_j e h_j o número de USs em reserva e conversação no estado j . Definindo t como a duração do quadro TDMA, a probabilidade de transição do estado i para o estado j , $P_{\varepsilon_i, \varepsilon_j}$, pode ser expressa pela Eq. 7:

$$P_{(r_i, h_i), (r_j, h_j)} = P(\varepsilon[t+1] = (r_j, h_j) | \varepsilon[t] = (r_i, h_i)) \quad (7)$$

Para obter a probabilidade de transição de estado, $P_{\varepsilon_i, \varepsilon_j}$, é preciso estimar os seguintes processos aleatórios que regulam as transições na cadeia ilustrada na Fig. 2:

$Y_s(t)$: Número de USs que liberaram sua reserva em um quadro TDMA.

$Z_s(t)$: Número de USs que começaram uma conversação em um quadro TDMA.

$U_s(t)$: Número de USs que falharam em conseguir uma reserva em um quadro TDMA.

$X_s(t)$: Número de USs que obtêm sucesso na disputa por um time-slot em um quadro TDMA

Como estamos interessados no número específico de USs em cada intervalo discreto t , vamos simplificar a notação para $Y_s(t) = y_s$, $Z_s(t) = z_s$, $X_s(t) = x_s$ e $U_s(t) = u_s$.

A relação entre o número de USs em reserva no estado j , r_j , e o número de USs em reserva no estado i , r_i , é expressa pela Eq. 8, enquanto a relação entre o número de USs em contenção no estado

j , c_j , e o número de USs em contenção no estado i , c_i , é expressa pela Eq. 9.

$$r_j = r_i + x_s - y_s \quad (8)$$

$$c_j = c_i + z_s - u_s - x_s \quad (9)$$

Expressa-se y_s em função de r_i , r_j , x_s e sabendo-se que da Eq. 5 temos $c_s = h_i - r_i$ expressa-se z_s em função de h_j , h_i , r_i , r_j , x_s , u_s , portanto podemos obter a Eq. 11, como em [4]

$$y_s = r_i - r_j + x_s \quad (10)$$

$$z_s = h_j - h_i + r_i - r_j + x_s + u_s \quad (11)$$

Assim as probabilidades de transição de estado podem ser determinadas através das distribuições de $Y_s(t)$, $Z_s(t)$, $X_s(t)$ e $U_s(t)$. As seguintes restrições devem ser observadas: $z_s \leq W_s - h_i$ e $y_s \leq r_i$.

1) *Estimativa para $P[Y_s(t) = y_s]$* : se o número de USs que tem reserva no início de um quadro TDMA é r_i , $Y_s(t)$ possui distribuição binomial e é dada pela Eq. 12, onde P_{idle} é a probabilidade de um slot estar livre (não ocupado pela rede primária).

$$P[Y_s(t) = y_s] = \binom{r_i}{y_s} \{\beta_f P_{idle}\}^{y_s} \times \{1 - \beta_f P_{idle}\}^{r_i - y_s} \quad (12)$$

$$0 \leq y_s \leq r_i$$

2) *Estimativa para $P[Z_s(t) = z_s]$* : lembrando que o número total de USs que podem iniciar uma conversação em um quadro TDMA é $W_s - h_i$, $Z_s(t)$ tem a distribuição binomial dada pela Eq. 13.

$$P[Z_s(t) = z_s] = \binom{W_s - h_i}{z_s} \{\alpha_f\}^{z_s} \times \{1 - \alpha_f\}^{W_s - h_i - z_s} \quad (13)$$

$$0 \leq z_s \leq W_s - h_i$$

3) *Estimativa para $P[U_s(t) = u_s]$* : o número de usuários que estão no estado contenção e não conseguem sucesso na tentativa de fazer reserva é dado por $c_s - x_s$. Assim, $U_s(t)$ tem a distribuição binomial dada pela Eq. 14.

$$P[U_s(t) = u_s] = \binom{c_s - x_s}{u_s} \{\beta_f\}^{u_s} \times \{1 - \beta_f\}^{c_s - x_s - u_s} \quad (14)$$

$$0 \leq u_s \leq c_s - x_s$$

4) *Estimativa para $P[X_s(t) = x_s]$* : Finalmente, a distribuição de $X_s(t)$ pode ser obtida por meio da cadeia de Markov ilustrada na Fig. 3, se $c_s \leq m_s$, ou pela cadeia ilustrada na Fig. 4, se $c_s > m_s$, onde m_s é o número de *time-slots* disponíveis e não reservados, $m_s = N_p - r_i$.

Nas cadeias ilustradas nas Figs.3 e 4, $b(c_s)$ é a probabilidade de um US ter sucesso em uma tentativa de transmissão em um *slot* disponível, calculada pela Eq. 15, para $c_s = h_i - r_i$.

$$b(c_s) = P_{idle} \binom{c_s}{1} p_s (1 - p_s)^{c_s - 1} \quad (15)$$

$$c_s \geq 1$$

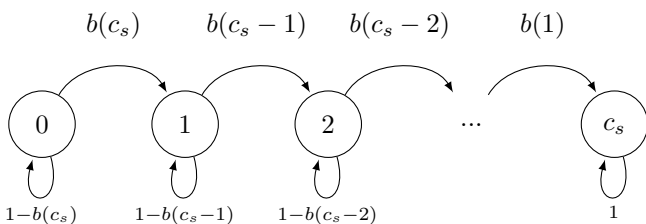


Fig. 3. Cadeia de Markov para estimativa de $P[X_s(t) = x_s]$ para $c_s \leq m_s$

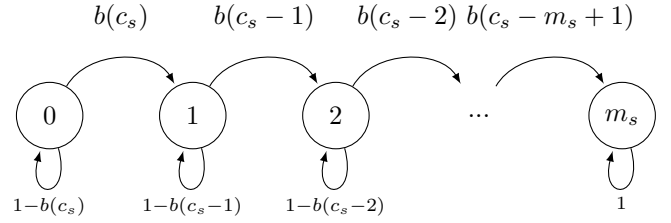


Fig. 4. Cadeia de Markov para estimativa de $P[X_s(t) = x_s]$ para $c_s > m_s$

A variável de estado dos diagramas das Figs. 3 e 4 é o número acumulado de USs que são bem sucedidos na transmissão de seus pacotes nos slots envolvidos em contenção em um quadro.

Para estimar $P[X_s(t) = x_s]$, calcula-se $b(c_s)$ e a matriz de transição de n passos da cadeia de Markov, que é resolvida utilizando o vetor de estado inicial $[1, 0, 0, 0, \dots, 0]$, ou seja, para $m_s = 1$ e $c_s = 1$ na Eq. 16 a probabilidade de $P[X_s(t) = 0]$ ou $P[X_s(t) = 1]$ será dada pela multiplicação do vetor de estado inicial pela matriz de transição após m_s passos, o que resultará em um vetor linha que ao ser transposto será a solução $P[X_s(t) = 0] = 1 - b(1)$ e $P[X_s(t) = 1] = b(1)$, como proposto em [4], [5], [7] e [8].

$$\begin{bmatrix} P[X_s(t) = 0] \\ P[X_s(t) = 1] \\ P[X_s(t) = 2] \\ \vdots \\ P[X_s(t) = c_s] \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \times \begin{bmatrix} 1 - b(c_s) & b(c_s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 - b(c_s - 1) & b(c_s - 1) & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 - b(c_s - 2) & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & b(c_1) \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}^{m_s} \quad (16)$$

O número n de passos é igual a m_s , se $c_s \leq m_s$, ou m_s , se $c_s > m_s$. As Eqs. 16 e 17 mostram a forma de cálculo de $P[X_s(t) = x_s]$ em ambos os casos.

$$\begin{bmatrix} P[X_s(t) = 0] \\ P[X_s(t) = 1] \\ P[X_s(t) = 2] \\ \vdots \\ P[X_s(t) = m_s] \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \times \begin{bmatrix} 1 - b(c_s) & b(c_s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 - b(c_s - 1) & b(c_s - 1) & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 - b(c_s - 2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & b(c_s - m_s + 1) \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}^{m_s} \quad (17)$$

Por fim, computadas as distribuições de todos os processos, pode-se calcular as probabilidades de transição em cada estado por meio da Eq. 18.

$$P_{i,j} = \sum_{u_s=0}^{c_s - x_s} \sum_{x_s=0}^{\min(c_s, m_s)} \begin{bmatrix} P[X_s(t) = x_s] \times P[U_s(t) = u_s] \times \\ P[Y_s(t) = r_i - r_j + x_s] \times \\ P[Z_s(t) = h_j - h_i + r_i - r_j + x_s + u_s] \end{bmatrix} \quad (18)$$

III. NOVO MODELO PROPOSTO

Nesta seção apresenta-se o novo modelamento proposto neste artigo para considerar as imperfeições no processo de sensoriamento do canal.

Como o parâmetro de desempenho aqui considerado é a vazão na rede secundária, o erro de sensoriamento que interessa é o falso alarme, que ocorre com probabilidade P_f . A detecção incorreta da presença do primário, ou erro de detecção, afeta apenas a rede primária e, portanto, não será aqui considerada.

Para definir o novo modelo é preciso inicialmente computar a influência do falso alarme nos processos $Y_s(t)$, $X_s(t)$.

A. Nova Estimativa para $P[X_s(t) = x_s]$

A probabilidade de um US ter sucesso em uma tentativa de transmissão em um slot disponível, $b(c_s)$, dada pela Eq. 15, é influenciada pelo sensoriamento incorreto, pois se ocorrer um falso alarme não haverá tentativa de transmissão, mesmo o canal estando livre. Assim, o cômputo de $b(c_s)$ deve considerar a probabilidade de não haver falso alarme e passa a ser calculada pela Eq. 19.

$$b(c_s) = (1 - P_f)P_{idle} \binom{c_s}{1} p_s(1 - p_s(1 - P_f))^{c_s-1} \quad (19)$$

Com o novo valor de $b(c_s)$ pode-se então calcular $P[X_s(t) = x_s]$ seguindo o procedimento já apresentado na seção anterior.

B. Nova Estimativa para $P[Y_s(t) = y_s]$

A transição do estado reserva para o estado silêncio ocorre com o término da transmissão dos pacotes periódicos, que depende da existência de um slot ocioso. Logo, a probabilidade de falso alarme também influencia neste processo, que passa a ter a distribuição exponencial dada pela Eq. 20.

$$P[Y_s(t) = y_s] = \binom{r_i}{y_s} \{(1 - P_f)\beta_f P_{idle}\}^{y_s} \times \{1 - [(1 - P_f)\beta_f P_{idle}]\}^{r_i - y_s} \quad (20)$$

IV. CÁLCULO DA VAZÃO

Seguindo [7], a vazão da rede secundária é definida como o número médio de pacotes periódicos transmitidos com sucesso por quadro dividido pelo número de *time-slots* no quadro. O número médio de pacotes transmitidos com sucesso por quadro, por sua vez, é o número médio de USs que estão no estado reserva a cada quadro e que conseguiram transmitir com sucesso somado ao número médio de USs que obtiveram sucesso no processo de contenção a cada quadro. Logo, a vazão é computada pela Eq. 21:

$$S = \frac{1}{Np} \sum_{h_s=0}^{W_s} \sum_{r_s=0}^{N_p} (E[X_s(t)] + E[r_s])P[\varepsilon = (r_s, h_s)] \quad (21)$$

Na Eq. 22, $E[X_s(t)]$ representa o número médio de USs que obtiveram sucesso no processo de contenção a cada quadro e é computada por:

$$E[X_s(t)] = \sum_{i=1}^{x_s} i \times P[X_s = i] \quad (22)$$

Por sua vez, $E[r_s]$ representa o número médio de slots reservados em um quadro e utilizados com sucesso pelas USs, que pode ser calculada pela Eq. 23 (que já considera o efeito da probabilidade de falso alarme):

$$E[r_s] = \sum_{i=1}^{r_i} \binom{r_i}{i} \{(1 - P_f)(P_{idle})\}^i \times \{1 - [(1 - P_f)(P_{idle})]\}^{r_i - i} \quad (23)$$

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção apresentam-se os resultados numéricos do cálculo da vazão na rede secundária.

Para efeito de comparação apresentam-se tanto os resultados obtidos à partir do modelamento proposto na referência [7], que não considera os erros de sensoriamento, quanto pelo modelo proposto neste artigo, que os considera. Para permitir esta comparação, os mesmos parâmetros utilizados em [7] são aqui adotados, a saber: número de usuários primários $N_p = 10$; número de usuários secundários variando de 2 até 30; probabilidade de ociosidade P_{idle} assumindo o valor de 0,3 ou de 0,9; e probabilidade de permissão $p_s = 0,2$.

Para se investigar a influência da probabilidade de falso alarme na vazão da rede secundária, esta foi calculada para diferentes valores de P_f .

Para o cômputo das probabilidades de transição da cadeia de Markov ilustrada na Fig. 2, utilizou-se nas Eqs. 1 e 2 os parâmetros: duração de um time-slot foi definido $\tau = 1s$, $t_1 = 120s$ e $t_2 = 100s$ segundo [7].

As Figs. 5 e 6 apresentam a vazão na rede secundária em função do número de USs na rede considerando, respectivamente $P_{idle} = 0,30$ e $P_{idle} = 0,90$.

São apresentados os resultados obtidos com base no modelo original [7] e os resultados obtidos com base no modelo proposto para diferentes valores de probabilidade de falso alarme.

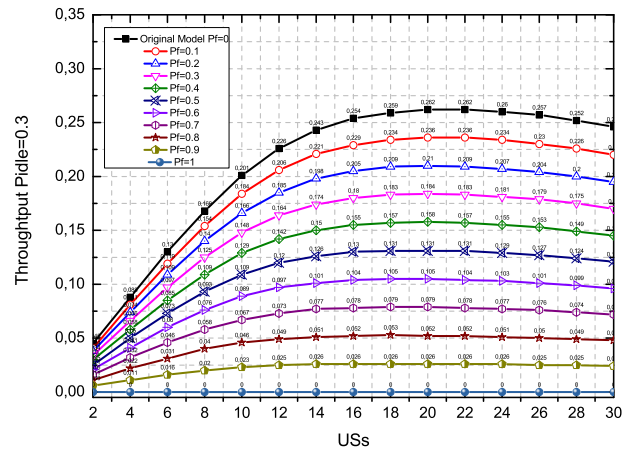


Fig. 5. Impacto na vazão com o crescimento de P_f para $P_{idle} = 0.30$.

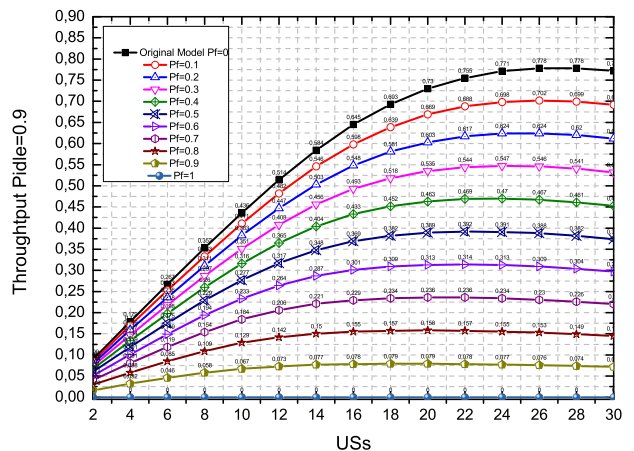


Fig. 6. Impacto na vazão com o crescimento de P_f para $P_{idle} = 0.90$.

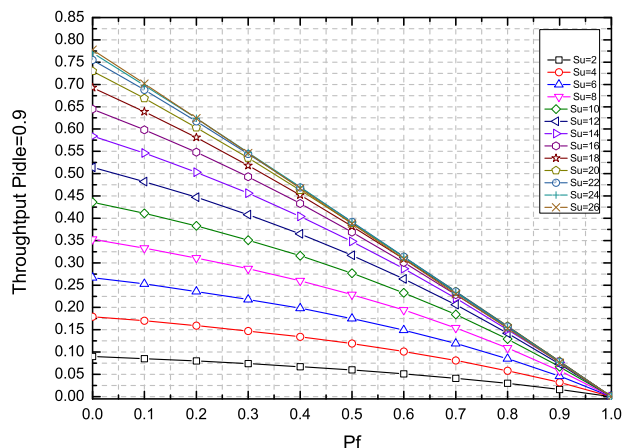


Fig. 7. Impacto na vazão com o crescimento de P_f para $P_{idle} = 0.90$ e $S_u = 2$ a 26.

A Fig. 7 apresenta agora a vazão como uma função da probabilidade de falso alarme para destacar esta influência, com vários valores fixados de U_{ss} na rede. Novamente, percebe-se que o falso alarme pode influenciar significativamente no desempenho do sistema.

A partir das Figs. 5, 6, e 7, observa-se:

- A probabilidade de falso alarme pode impactar significativamente o desempenho da rede e não deve ser negligenciada no modelamento matemático.
- A P_f tem maior impacto no desempenho para um menor número de usuários na rede.
- Acima de 17 usuários na Fig. 7, a influência da P_f passa a ter menor peso sobre a vazão, variando o número de usuários de 18 até 30 reduz-se a vazão da rede em aproximadamente cinco por cento.
- A inflexão no início das curvas das Figs. 5 e 6 deve-se à dinâmica do protocolo que permite ao usuário secundário bem sucedido na fase de disputa por um time-slot, estado de contenção, garantia de acesso ao slot livre por divisão no tempo, extinguindo-se a necessidade de nova contenção, assim fazendo uso oportunístico e eficiente da rede cognitiva, enquanto não atinge a máxima quantidade de SUs.
- A inflexão no final das curvas das Figs. 5 e 6 deve-se ao aumento das colisões devido à disputa pela qual novos usuários passam para entrar na rede em situações nas quais não existem time-slots disponíveis e um usuário libera sua reserva, o time-slot recém liberado é alvo de vários usuários, o que provoca colisões ao longo de vários quadros acarretando a queda da vazão devido a colisões consecutivas.

O desempenho tende a tornar-se independente do número de usuários quando este cresce significativamente (à partir de 22 usuários aproximadamente).

VI. CONCLUSÕES

O protocolo de múltiplo acesso é uma parte preponderante das redes de rádios cognitivos.

Este artigo apresenta um novo modelo para análise de um protocolo de múltiplo acesso denominado Cog-PRMA, agregando ao modelo já descrito na literatura o efeito do sensoriamento imperfeito do canal.

Os resultados numéricos mostram que o aumento da probabilidade de falso alarme causa uma redução significativa na vazão da rede secundária, pela perda de oportunidades de transmissão.

Logo, o modelo analítico proposto neste artigo é mais realista que o modelo previamente apresentado na literatura.

Como trabalhos futuros, espera-se computar a influência dos erros de sensoriamento no desempenho da rede primária, o uso da probabilidade de permissão adaptativa visando o aumento da vazão e o modelamento do sistema considerando a possibilidade de ocorrer o efeito de captura.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Finep, com recursos do Funttel, contrato No 01.14.0231.00, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Brasil, e pela Fapemig.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," in *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug 1999.
- [2] D. Goodman and S. Wei, *Efficiency of Packet Reservation Multiple Access*, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol 40, pp 170-176, 1991.
- [3] S. Nanda and U. Timor, *Performance Of PRMA: A Packet Voice Protocol for Cellular System*, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol 40, pp 584-589, 1991.
- [4] T. Kobayashi and L. Sasase, *Performance Analysis of Packet Reservation Multiple Access With an Adaptive array*, *IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp.923-927, 1997.
- [5] J. Horng and J. W. Wang, *Throughput Analysis Of Packet Reservation Multiple Access Protocol For Wireless Communications*, *IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1242-1246, 1994.
- [6] A. Aijaz and A.H Aghvami, *A PRMA based MAC protocol for cognitive machine-to-machine communications*, *IEEE International Conference on Communications*, 2013.
- [7] S. Hu and Y. Yao, *Cog-PRMA Protocol for CR Users Sharing a Common Channel With TDMA Primary Users*, *IEEE Wireless and Optical Communications Conference*, 2011.
- [8] H. Qi and R. Wyrwas, *Markov Analysis for PRMA Performance Study*, *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp.1184-1188, 1994.