

Métrica de Eficiência em Redes de Rádio Cognitivo com Fila e Retransmissão Garantida

Rubem Toledo Bergamo¹ e Paulo Cardieri²

Resumo — Este trabalho investiga o desempenho de uma rede de rádios cognitivos (rede secundária) que acessa de forma oportunista o canal licenciado aos usuários de uma rede primária. Emprega-se na análise a métrica *power*, definida como a razão entre a vazão de um enlace e o atraso observado pelos pacotes transmitidos nesse enlace. Os usuários das redes primária e secundária são modelados por meio de filas do tipo M/G/1, com prioridade para o usuário primário. São calculados os valores da métrica *power* para diferentes ordens de modulação, supondo retransmissões sem limite de pacotes recebidos com erro. Os resultados mostram que ordens de modulação elevadas diminuem o atraso, mas levam a enlaces pouco robustos, aumentando o número de retransmissões. Portanto, o desempenho da rede secundária, levando-se em conta vazão e atraso, pode ser maximizado pelo ajuste apropriado da ordem da modulação.

Palavras-Chave — Rede de rádios cognitivos, filas com prioridade, métrica *Power*.

Abstract — In this paper, the performance of cognitive radio networks with opportunistic channel access is investigated using the performance metric *power*, defined as the ratio of throughput and packet delay. Users of primary and secondary networks are modeled by means of M/G/1 queues with priority to primary users. The metric *power* is calculated for different modulation orders and assuming infinite number of retransmissions. Numerical results show that higher modulation orders lead to low packet delay, but also make transmission links less robust, increasing the number of retransmissions. Therefore, the performance of the secondary network can be optimized by choosing the appropriate modulation order.

Keywords — Cognitive radio networks, priority queue, performance metric *power*.

I. INTRODUÇÃO

O espectro eletromagnético atualmente é um valioso recurso compartilhado por vários provedores de serviço sem fio. Este espectro eletromagnético está cada vez mais escasso e um importante tema de pesquisa hoje em dia é como fazer uso mais eficiente deste espectro de forma a aumentar a sua capacidade de transmissão de informação. Atualmente o regime de atribuição de espectro aos provedores de serviços sem fio consiste em uma alocação fixa. No entanto, apenas pequenas partes do espectro são realmente utilizadas em um dado instante [1]. Os conceitos de uso oportunista do espectro e de rádio cognitivo [2] surgiram como forma de usar o espectro eletromagnético de forma mais eficiente por usuários primários (licenciados, ou seja, que tem o direito de uso do espectro) e secundários (não licenciados), compartilhando a

mesma porção do espectro. O usuário dito secundário usará o espectro licenciado ao usuário primário de forma oportunista [1], ou seja, quando o usuário primário não estiver usando o espectro. Um dos principais objetivos da tecnologia de rádio cognitivo é aumentar a vazão disponível ao usuário secundário, por meio de ajustes do sistema comunicação a partir do conhecimento sobre o ambiente de transmissão. No entanto, além de buscar a maximização da vazão, sistemas baseados em acesso oportunista do canal devem também manter o atraso dentro de limites aceitáveis. Esta relação entre vazão e atraso é o foco de investigação deste trabalho.

No uso oportunista do canal, o usuário secundário deve realizar o sensoriamento espectral ou algum processo de coleta de informações sobre o estado dos canais disponíveis, de forma a selecionar um canal livre para a transmissão do seu sinal. Para o funcionamento adequado da rede de rádios cognitivos, o usuário secundário deve parar sua transmissão quando algum usuário primário iniciar a sua transmissão naquele canal, pois a prioridade de uso do canal é sempre do usuário primário. Neste trabalho usamos um modelo de rede envolvendo filas com prioridade, onde o usuário primário tem prioridade sobre o secundário, e retransmissões são possíveis quando um pacote não for transmitido com sucesso. Para uma análise conjunta da vazão e do atraso, usaremos uma métrica de eficiência que relaciona vazão e atraso, chamada *Power*, que foi proposta por Giessler *et al.* [3] e explorada por Kleinrock *et al.* em vários trabalhos [4][5]. Por meio dessa métrica, iremos investigar o efeito no atraso de transmissão causado pelo aumento da taxa de chegadas de pacotes nos usuários primário e secundário. Este atraso será analisado para várias ordens de modulação M-QAM. As próximas seções foram divididas da seguinte forma. Na Seção II será apresentado o modelo de rede com filas, além de descrever como os usuários primários e secundários acessam o canal. Na Seção III são apresentadas as expressões teóricas para os tempos médios de espera dos usuários primários e secundários com retransmissão de pacotes. Na Seção IV a métrica *power* é apresentada e discutida. Resultados numéricos são discutidos na Seção V, e, por fim, conclusões e trabalhos futuros são discutidos na Seção VI.

II. MODELAGEM DO SISTEMA ADOTADO

A. Modelagem da Rede e do Sistema de Transmissão

No cenário de rede adotado o usuário primário é licenciado para uso de um dado canal com prioridade, enquanto que o usuário secundário poderá usar aquele canal desde que o usuário secundário não o esteja fazendo. Associado a cada usuário (transmissor), há um terminal receptor. O acesso será

¹Rubem Toledo Bergamo – Departamento Engenharia de Telecomunicações – Instituto Federal de Santa Catarina, Campus de São José – SC. rubem@ifsc.edu.br.

²Paulo Cardieri – FEEC, UNICAMP. cardieri@decom.fee.unicamp.br. Trabalho parcialmente financiado pelo CNPq, Proc. 312146/2012-4.

da forma *slotted*, ou seja, o tempo será dividido em *slots* de tamanhos iguais para usuários primários e secundários. Consideraremos a existência de apenas um usuário primário e um usuário secundário, que representarão o tráfego agregado gerado por um conjunto de usuários. Quando o usuário secundário desejar transmitir, deverá fazer o sensoriamento espectral no início do *time slot*. Se não for observado nenhum sinal no canal no início do *time slot*, então se assume que o restante do *time-slot* poderá ser utilizado pelo usuário secundário. O tempo de sensoriamento espectral é considerado desprezível quando comparado com o tamanho do *time-slot*, de forma que desconsideraremos este tempo de sensoriamento nos cálculos de vazão e atraso. Além disso, assumiremos que os terminais estão perfeitamente sincronizados temporalmente. É também assumido sensoriamento espectral perfeito, ou seja, as probabilidades de falso alarme e de perda de oportunidade de transmissão são assumidas iguais a zero. A hipótese de sensoriamento espectral perfeito certamente não é realista, mas simplificará a formulação matemática, e corresponderá à situação de melhor caso. As chegadas de pacotes aos usuários primário e secundário seguem processos de Poisson, com taxas médias λ_1 e λ_2 , respectivamente. A Fig. 1 ilustra a estrutura de *time-slot* adotada, com o compartilhamento entre os usuários primário e secundário. Note-se que o canal é compartilhado sem interferência mútua entre as transmissões, devido a hipótese de sensoriamento espectral perfeito.

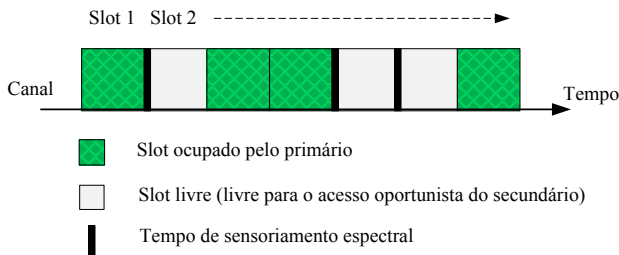


Figura 1: Estrutura de *time-slots* adotada no estudo.

O modelo da rede adotado nesse estudo também inclui uma fila do tipo M/G/1 para cada usuário, como ilustrado na Fig. 2.

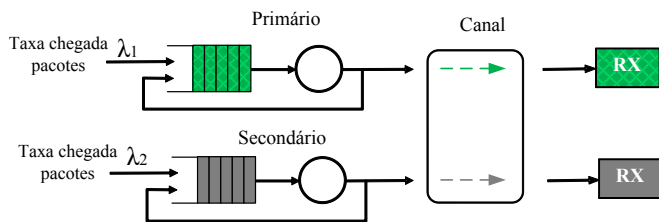


Figura 2: Modelo de fila para um usuário primário e um usuário secundário.

A disciplina de atendimento dos pacotes de ambas as redes será do FIFO (*First-In-First-Out*). No caso de um pacote não ter sucesso na transmissão, ele deverá ser retransmitido quantas vezes forem necessárias, até que a transmissão seja bem sucedida.

Para a transmissão dos pacotes, emprega-se modulação M-QAM. Assumiremos apenas ordens de modulação M que levem a constelações quadradas, pelo fato dessas serem mais usuais. Assumiremos também que o canal de propagação é do tipo AWGN. A probabilidade de erro de bit média para M-QAM de constelação quadrada é dada, portanto, por [6]

$$P_{eb} = \frac{1}{\log_2 \sqrt{M}} \sum_{k=1}^{\log_2 \sqrt{M}} P_b(k), \quad (1)$$

em que $P_b(k)$ é calculado através de

$$P_b(k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})\sqrt{M}-1} \left\{ (-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} A(i, k, M, \gamma) \right\}$$

em que

$$A(i, k, M, \gamma) = \left(2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \times 2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) B(i, M)$$

e

$$B(i, M) = \operatorname{erfc} \left((2i + 1) \sqrt{\frac{3 \log_2 M \gamma}{2(M-1)}} \right).$$

e γ é a relação sinal-ruído por bit transmitido.

III. ANÁLISE DO ATRASO DOS USUÁRIOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

Nessa seção é apresentada uma análise dos atrasos médios sofridos pelos pacotes primário e secundário. Relembrando, o modelo adotado supõe que pacotes recebidos sem sucesso são retransmitidos, sem limite para o número de retransmissões. Portanto, um pacote é somente retirado da sua fila quando for transmitido com sucesso, e nenhum pacote é descartado. Esse modelo de operação da rede com retransmissões sem limites implica que todos os pacotes serão transmitidos. Se ainda supusermos que a taxa de chegada de pacotes não excede a taxa de serviço (ou seja, o fator de utilização do sistema fila-servidor é menor que a unidade), então a vazão de saída será igual à taxa de chegada de pacotes. Assim, o efeito de erros de transmissão e consequente retransmissão será percebido no atraso do pacote, ou seja, no tempo gasto na fila e na sua transmissão.

A. Atraso dos Pacotes do Usuário Primário

Usaremos nesse trabalho a formulação apresentada em [7] e [8] para o cálculo do tempo médio de espera em uma fila do tipo M/G/1 com prioridade e retransmissão. O tempo médio de espera é definido como o tempo de serviço (ou seja, tempo de transmissão) somado ao tempo de espera na fila. Portanto, para o usuário primário, o tempo médio de espera W_1 é dado por [7][8]

$$W_1 = E[X_1] + \frac{\lambda E[X_1^2]}{2(1-\rho_1)}, \quad (2)$$

em que X_1 é o tempo gasto na transmissão e ρ_1 é o fator de utilização do canal pelo usuário primário, definido como $\rho_1 = \lambda_1 E[X_1]$, em que λ_1 é a taxa de chegada de pacotes do usuário primário. Note-se que o segundo termo de (2) é o tempo de espera na fila. A seguir calcularemos o valor médio $E[X_1]$ e o valor médio quadrático $E[X_1^2]$ de X_1 .

Como estamos supondo retransmissão de pacotes transmitidos sem sucesso, o tempo efetivamente gasto na transmissão de pacotes é uma variável aleatória, que depende do número de retransmissões necessárias até a recepção correta do pacote. O tempo de serviço $1/\mu_1$ para uma tentativa de transmissão é o tempo gasto para a transmissão dos bits de um pacote, ou seja, depende apenas do tamanho do pacote L_1 e da taxa de transmissão R_{b1} e é dada por

$$\frac{1}{\mu_1} = \frac{L_1}{R_{b1}},$$

em que L_1 é o tamanho do pacote do usuário primário e R_{b1} é a taxa de transmissão do usuário primário. Supondo que a largura do canal de transmissão seja BW e que a ordem de modulação seja M , então a taxa de transmissão do primário é dado por

$$R_{b1} = BW \log_2 M.$$

A probabilidade de sucesso P_{suc} de transmissão de um pacote depende da probabilidade de erro de pacotes P_{ep} e do número de retransmissões N necessárias, e pode ser calculada por

$$P_{suc} = (P_{ep})^N (1 - P_{ep}).$$

Note-se que podemos entender P_{suc} como sendo a probabilidade de terem sido necessárias N retransmissões. Supondo que o pacote é considerado ser recebido com sucesso somente se todos os seus bits forem recebidos com sucesso, então a probabilidade de erro de pacote P_{ep} é calculada por

$$P_{ep} = 1 - (1 - P_{eb})^L,$$

em que P_{eb} é a probabilidade de erro de bit, dada por (1).

Caso sejam necessárias N retransmissões para a recepção com sucesso de um pacote, então o tempo de serviço efetivo vale $(N + 1) \times 1/\mu_1$. Portanto, o tempo médio de serviço (ou tempo médio gasto na transmissão) do primário pode ser calculado finalmente como [8]

$$E[X_1] = \sum_{N=0}^{\infty} (N + 1) \frac{1}{\mu_1} P_{ep1}^N (1 - P_{ep1}). \quad (3)$$

Rearranjando os termos do somatório em (3) como

$$E[X_1] = \frac{1}{\mu_1} (1 - P_{ep1}) \left[\sum_{N=0}^{\infty} N P_{ep1}^N + \sum_{N=0}^{\infty} P_{ep1}^N \right],$$

e fazendo as devidas simplificações, podemos mostrar que [8]

$$E[X_1] = \frac{1}{\mu_1} \frac{1}{(1 - P_{ep1})}. \quad (4)$$

Usando o mesmo raciocínio usado para derivar (4), o segundo momento do tempo de serviço do primário pode ser expresso por

$$E[X_1^2] = \sum_{N=0}^{\infty} \left[(N + 1) \frac{1}{\mu_1} \right]^2 P_{ep1}^N (1 - P_{ep1}).$$

Fazendo as devidas simplificações, podemos mostrar que

$$E[X_1^2] = \left(\frac{1}{\mu_1} \right)^2 \frac{(1 + P_{ep1})}{(1 - P_{ep1})^2}. \quad (5)$$

Portanto, usando (4) e (5) em (2), podemos calcular o tempo de espera médio W_1 de um usuário primário com prioridade de acesso ao canal, com esquema de retransmissão sem limite de número de retransmissões.

B. Atraso dos Pacotes do Usuário Secundário

Pacotes do usuário secundário podem sofrer atrasos não apenas devido a erros na transmissão desses pacotes (que acarretarão em retransmissões), mas também devido à indisponibilidade do canal, quando esse estiver sendo usado pelo usuário primário (deve-se lembrar de que o usuário

primário tem prioridade de uso do canal). Portanto, como veremos a seguir, o atraso dos pacotes do usuário secundário dependerá também da taxa de chegada de pacotes do usuário primário e do tempo médio de serviço do primário. Seguindo a formulação apresentada em [7], o tempo de espera médio dos pacotes do usuário secundário é calculado por

$$W_2 = \frac{E[X_2]}{(1 - \rho_1)} + \frac{\lambda_1 E[X_1^2] + \lambda_2 E[X_2^2]}{2(1 - \rho_1)(1 - \rho_1 - \rho_2)}, \quad (6)$$

em que X_2 é o tempo gasto efetivamente na transmissão do pacote do usuário secundário, e ρ_2 é o fator de utilização do canal pelo usuário secundário, definido como $\rho_2 = \lambda_2 E[X_2]$, em que λ_2 é a taxa de chegada de pacotes do usuário secundário. O primeiro termo da equação (6) representa o tempo médio de serviço do usuário secundário levando-se em conta o fato de que o canal está disponível ao usuário secundário apenas quando o usuário primário não estiver usando-o. O segundo termo de (6) corresponde ao tempo de espera na fila dos pacotes do usuário secundário.

Podemos mostrar que o tempo médio de serviço e o valor médio quadrático do tempo de serviço do usuário secundário podem ser calculados, respectivamente, por

$$E[X_2] = \frac{1}{\mu_2} \frac{1}{(1 - P_{ep2})}$$

e

$$E[X_2^2] = \left(\frac{1}{\mu_2} \right)^2 \frac{(1 + P_{ep2})}{(1 - P_{ep2})^2}.$$

Como no caso do usuário primário, a probabilidade de erro de pacotes P_{ep2} depende da ordem da modulação M utilizada e dos parâmetros do enlace, como a relação sinal-ruído (SNR) e a largura do canal BW . Como estes parâmetros SNR e BW serão fixados no modelo de rede proposto, a probabilidade de erros de pacotes no nosso estudo dependerá apenas da ordem de modulação utilizada.

IV. MÉTRICA *POWER*

Giessler *et al.* apresentaram em [3] pela primeira vez uma discussão sobre a relação entre vazão e atraso em redes de pacotes, e definiram a métrica *power* como a razão entre a vazão e o atraso. Esta métrica, segundo [3], é bastante adequada para medir o desempenho da rede e o compromisso existentes entre vazão e atraso. A unidade da métrica a *power* no nosso contexto é pacotes/segundo².

Seguindo a proposição apresentada por Giessler *et al.*, Kleinrock *et al.* exploraram o uso desta relação entre vazão e atraso em redes com filas, como uma medida de eficiência da rede [4][5]. Normalmente nas redes de comunicação se deseja uma alta taxa de saída de pacotes (vazão), associada a um baixo atraso, o que corresponderia a uma alto valor de *power*. Porém, estas condições são normalmente contraditórias. No nosso contexto, buscamos avaliar o desempenho da rede composta por um usuário primário e um usuário secundário por meio da métrica *power*, e entender os efeitos dos parâmetros do sistema de comunicação. Particularmente estamos interessados em avaliar a *power* da rede secundária, em função da ordem de modulação empregada nas redes primária e secundária.

Como já discutido, uma vez que não há limites no número de retransmissões de pacotes, todos os pacotes que chegam ao sistema são transmitidos com sucesso. Portanto, definiremos a

vazão das redes primária e secundária como sendo as suas respectivas taxas de chegada de pacotes. Portanto, a métrica *power* será calculada aqui como

$$\text{Power}_{\text{pri}} = \frac{\lambda_1}{W_1}$$

e

$$\text{Power}_{\text{sec}} = \frac{\lambda_2}{W_2},$$

em que λ_1 e λ_2 são as taxas de chegadas de pacotes dos usuários primário e secundário, e os tempos de espera médios W_1 e W_2 podem ser calculados a partir das expressões (2) e (6), respectivamente.

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção é apresentada uma análise numérica dos atrasos médios dos usuários primário e secundário e da métrica *Power* do usuário secundário. A métrica *Power* será analisada apenas para a rede secundária, pois é a rede que usa o canal de forma oportunista e seu desempenho depende da rede primária. Como já mencionado, consideramos que o sensoriamento espectral da rede secundária é perfeito. Adotamos as mesmas características para as redes primária e secundária: largura do canal BW de 1 MHz, relação sinal-ruído SNR igual a 26 dB, e tamanhos L_1 e L_2 dos pacotes primário e secundário iguais a 1000 bits. A taxa de chegada de pacotes do secundário λ_2 é mantida fixa e igual a 1000 pct/s, enquanto que taxa de pacotes do primário λ_1 será um dos parâmetros na análise. A mesma ordem de modulação será usada nos usuários primário e secundário, e que será outro parâmetro da análise.

A Fig. 3 mostra o tempo de atraso médio do primário em função da taxa de chegada de pacotes do primário para várias ordens de modulação.

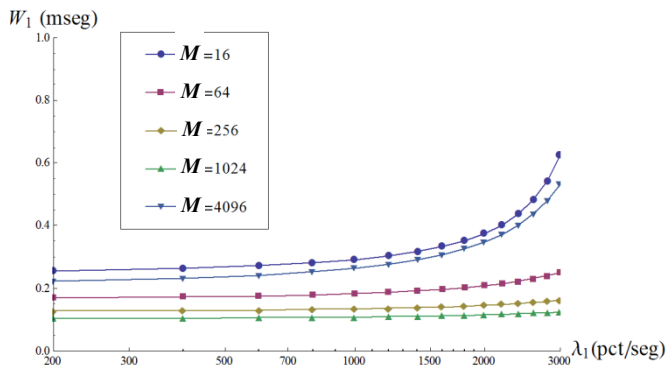


Figura 3: Atraso médio do usuário primário em função da taxa de chegada de pacotes λ_1 , para diversas ordens de modulação.

Como era esperado, para baixas taxas de chegada de pacotes, o atraso praticamente não varia com a taxa de chegada, pois o atraso é dominado pelo tempo de serviço, que depende, à princípio, apenas da taxa de transmissão. Com o aumento da taxa de chegada de pacotes, o tempo de espera na fila, que cresce com a taxa de chegada, começa a ser relevante, fazendo o atraso total crescer. Basicamente, quanto maior a ordem da modulação, menor será o atraso, pois mais rapidamente os pacotes são transmitidos. Entretanto, percebe-se pela Fig. 3 que para ordem $M = 4096$, o atraso é maior do que aqueles para as ordens $M = 64, 256$ e 512 . Isso acontece porque o aumento da ordem de modulação leva a um aumento da

probabilidade de erro de bit, dado que o valor de SNR está fixado ($SNR = 26\text{dB}$). Conseqüentemente, há um aumento no número de retransmissões, o que causa um maior atraso.

Na Fig. 4 são apresentadas curvas de atraso médio do secundário em função da taxa de chegada de pacotes do primário λ_1 .

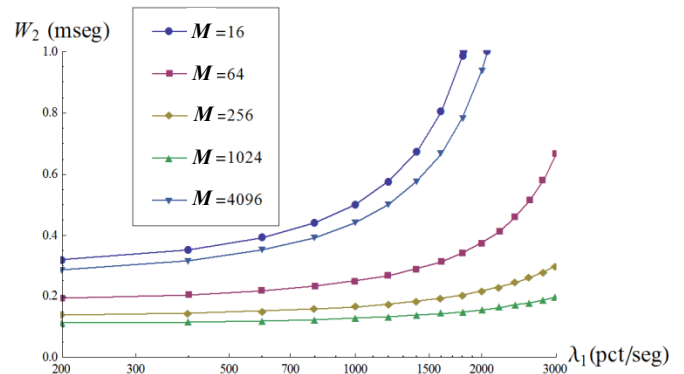


Figura 4: Atraso médio do usuário secundário em função da taxa de chegada de pacotes λ_1 do usuário primário. A taxa de chegada de pacotes do secundário está fixada em 1000 pct/seg.

Igualmente como ocorre na rede primária, o atraso médio do usuário secundário para baixas taxas de chegadas de pacotes primários é praticamente invariante com λ_1 . Isso ocorre por que baixos valores de λ_1 significam que o canal está sendo pouco utilizado pelo usuário primário, e, portanto, estando praticamente todo o tempo disponível para o usuário secundário. Entretanto, nota-se também que o atraso na rede secundária é em geral maior do que o atraso na rede primária, para as mesmas ordens de modulação. Isto se deve ao fato do usuário primário ter prioridade de acesso ao canal. Nota-se também que para taxas λ_1 médias e altas, o atraso do usuário secundário cresce com o aumento dessas taxas de chegadas, devido a uma menor disponibilidade do canal para uso do usuário secundário.

Outra característica do atraso do usuário secundário também observada no comportamento do atraso do usuário primário é o fato da ordem de modulação $M = 4096$ resultar em um maior atraso do que aquele observado em modulações de ordens inferiores ($M = 64, 256$ e 512), devido aos mesmos motivos citados anteriormente.

Na Fig. 5 são apresentadas as curvas da métrica $\text{Power}_{\text{sec}}$ do usuário secundário em função da taxa de chegada de pacotes da rede primária λ_1 , para diferentes ordens de modulação. Como esperado para o cenário considerado, a métrica $\text{Power}_{\text{sec}}$ cai com o aumento de λ_1 , pois o atraso do usuário secundário aumenta com o aumento de λ_1 . No entanto, observa-se também que, mantida fixa a taxa de chegada de pacotes do usuário primário e a relação sinal-ruído, o comportamento da métrica *Power* em função da ordem da modulação M não é monotônico. Para melhor ilustrar essa característica, a Fig. 6 mostra a métrica $\text{Power}_{\text{sec}}$ em função da ordem de modulação M , para diferentes valores de taxa de chegada de pacotes λ_1 .

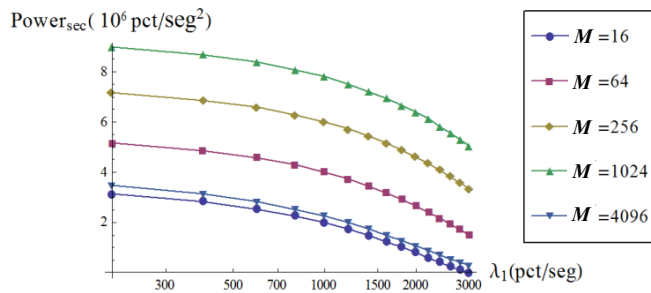


Figura 5: $Power_{sec}$ do usuário secundário em função da taxa de chegada de pacotes do primário λ_1 , para diferentes ordens de modulação.

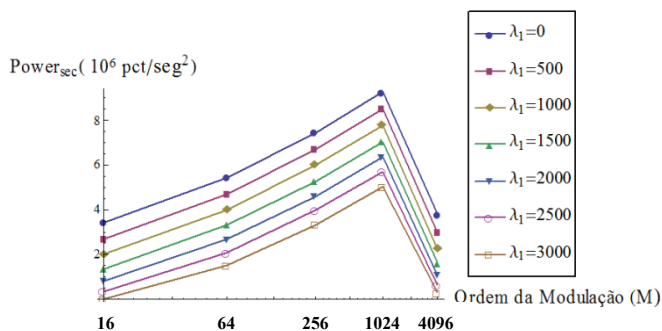


Figure 6: Métrica $Power_{sec}$ do usuário secundário em função da ordem de modulação, para várias taxas de chegada de pacotes λ_1 do usuário primário.

As curvas da Fig. 6 mostram que o valor da métrica $power$ cresce com o aumento da ordem da modulação até uma certa ordem ($M = 1024$, no cenário investigado), quando, então, o valor da métrica $power$ cai. O crescimento parcial da $power$ com o aumento da ordem da modulação é esperado, pois ao aumentarmos a ordem, temos uma diminuição do tempo de serviço. No entanto, lembrando que a relação sinal-ruído é mantida fixa, ao aumentarmos a ordem da modulação ocorre também um aumento na probabilidade de erro de pacotes na rede secundária, o que acarreta um aumento no número de retransmissões e, conseqüentemente, no atraso, como já discutido. Esse aumento no atraso explica a queda no valor da $power$ quando passamos da ordem $M = 1024$ para ordem $M = 4096$.

Os resultados da Fig. 6 mostram, portanto, que para o cenário e configuração adotados nesse artigo, é possível escolher uma ordem de modulação que maximiza a razão vazão/atraso da rede secundária. Deve-se ressaltar que um aspecto importante do cenário adotado foi a manutenção do valor relação sinal-ruído, enquanto a ordem da modulação era alterada.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo do desempenho de uma rede de rádios cognitivos com acesso oportunista ao canal. A análise foi feita com base na métrica $power$, definida como sendo a razão entre a vazão e o atraso de pacotes. Empregou-se um cenário com apenas um usuário primário e

um usuário secundário, que foram modelados por meio de filas do tipo M/G/1, com prioridade de acesso ao canal para o usuário primário. Foi suposto sensoriamento espectral perfeito, de forma que a interferência mútua entre os usuários não foi considerada. O sistema de transmissão permite a retransmissão de pacotes, sem limites para o número de retransmissões. Valores da métrica $power$ foram calculados para diferentes ordens de modulação das transmissões dos usuários primário e secundário, enquanto que a relação sinal-ruído em ambos usuários era mantida fixa. Os resultados mostraram que, nesse cenário, a ordem da modulação pode ser ajustada de forma a maximizar a razão entre vazão e atraso. Ou seja, enquanto que ordens de modulação mais elevadas podem levar a um menor atraso, pois o tempo de serviço é menor, ordens maiores significam também enlaces menos robustos, exigindo um maior número de retransmissões. Portanto, a maximização da eficiência espectral efetiva, ou seja, levando-se em conta também o número de retransmissões, não será necessariamente atingida com o aumento da ordem da modulação.

Como continuação desse trabalho, o cenário de investigação deverá ser incrementado, tornando-o mais realista. Primeiramente, será assumido o sensoriamento espectral imperfeito, o que faz aparecer a interferência entre os enlaces primário e secundário. Além disso, ao considerar o sensoriamento imperfeito, o tempo de sensoriamento afetará o desempenho do mesmo e a vazão máxima disponível ao terminal secundário. Avaliaremos também os efeitos da imposição de um limite ao número de retransmissões, e a possibilidade de empregarmos ordens de modulação diferentes nos enlaces primário e secundário.

REFERÊNCIAS

- [1] Haykin S. "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, No. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [2] J.Mitola, "Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio," Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2000.
- [3] A. Giessler, J. Hanle, A. König, and E. Pade, "Free Buffer Allocation – An Investigation by Simulation," *Computer Network*, pp. 191–208, 1978.
- [4] L. Kleinrock, "On Flow Control in Computer Networks," *International Conference on Communications*, vol. II, Toronto, Ontario, pp. 27.2.1–27.2.5
- [5] L. Kleinrock, "Power and Deterministic Rules of Thumb for Probabilistic Problems in Computer Communications," *International Conference on Communications*, Boston, Massachusetts, Jun. 1979, pp. 43.1.1–43.1.10.
- [6] Cho K. and Yoo D, "On the General BER Expression of One-and Two-Dimensional Amplitude Modulations", *IEEE Trans. on Communications*, vol. 50, No. 7, July 2002.
- [7] T. Hung, T.Q. Duong, H. Zepernick, "Average waiting time of packets with different priorities in cognitive radio networks," *2010 5th IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC)*, pp.122,127, 5-7 May 2010.
- [8] L. Kleinrock, "Queuing systems – Vol. 2: Computer Applications," Wiley, 1976.