

Análise de desempenho de modulação adaptativa em rede de rádio cognitivo com múltiplo acesso *Slotted Aloha*

Ana Paula Teles Ribeiro da Silva e José Marcos Câmara Brito

Resumo— A tecnologia de rádio cognitivo em conjunto com a técnica de modulação adaptativa vem sendo amplamente proposta na literatura como uma solução promissora para melhorar o desempenho das redes de telecomunicações. A definição dos pontos ótimos de comutação é uma questão chave quando se utiliza modulação adaptativa. Neste artigo, analisa-se os pontos ótimos de comutação em uma rede de rádios cognitivos com acesso ao espectro concorrente por meio do protocolo *Slotted Aloha*. Os pontos de comutação ótimos são analisados em função de dois critérios de desempenho: critério do atraso e métrica *power*.

Palavras-Chave— *Modulação Adaptativa, Rádio Cognitivo, Ponto de Comutação Ótimo.*

Abstract— Cognitive radio technology using adaptive modulation techniques has been widely proposed in the literature as a promising solution to improve the performance of telecommunications networks. A key issue in the adaptive modulation technique is finding the optimum switching points between modulations. In this paper, we considered a cognitive radio network with concurrent spectrum access granted through the *Slotted Aloha* protocol. We analyzed the optimum switching points in this network are considering two criteria: delay and power metric.

Keywords— *Adaptive Modulation, Cognitive Radio, Optimum Switching Points.*

I. INTRODUÇÃO

A tecnologia de rádio cognitivo, em conjunto com a técnica de modulação adaptativa, é considerada uma solução promissora para melhorar o desempenho das redes de comunicação sem fio e garantir qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) aos usuários, resolvendo o problema de escassez do espectro e contribuindo para a necessidade por altas taxas de transmissão [1] – [3].

Um ambiente de rádio cognitivo, em geral, é composto por dois tipos de redes, as redes licenciadas, denominadas de redes primárias e as redes não licenciadas, denominadas de redes secundárias. O conceito de rádio cognitivo consiste em um rádio capaz de adaptar seus parâmetros de transmissão com base nas informações coletadas do ambiente de modo a garantir qualidade de serviço de ambas às redes [1] – [5]. A rede pode operar no modo oportunista, onde os usuários secundários (USs) detectam partes do espectro não utilizadas pelos usuários primários (UPs), denominadas de buracos espectrais, e transmitem nestes buracos de forma oportunista, ou no modo

concorrente, onde ambos os usuários, primários e secundários, coexistem na mesma banda de frequência e localidade geográfica e podem transmitir ao mesmo tempo, mas com o US controlando sua potência de transmissão de modo a respeitar um limite de interferência imposto pela rede primária [3] – [5].

A técnica de modulação adaptativa consiste na adaptação da ordem de modulação no transmissor, em função da estimativa do estado de canal feita no receptor [1] – [3] [6] – [10]. Portanto, o receptor irá fazer uma estimativa do canal e enviar ao transmissor através de um canal de retorno e com base nessa informação o transmissor irá escolher a ordem de modulação que resulte no melhor desempenho, segundo um critério definido, para as condições do canal naquele momento.

Determinar o ponto ótimo de comutação entre as modulações é uma questão chave da técnica de modulação adaptativa. Existem diversas propostas na literatura para se determinar os pontos de comutação e as mais comuns são encontrar o ponto de comutação em função de uma taxa de erro de bit alvo (BER - *Bit Error Rate*) [6], ou em função de uma taxa de erro de pacote alvo (PER - *Packet Error Rate*) [9]. Porém, as análises apresentadas em [8] concluem que esses critérios não otimizam alguns parâmetros de desempenho, como vazão e atraso. Contudo, as análises feitas em [8] só se aplicam para alguns tipos específicos de redes sem fio, uma vez que considerou-se um canal sem memória no cômputo dos pontos ótimos de comutação. Para contornar esta limitação, em [10] os autores estenderam as análises de [8] adotando um canal com desvanecimento Rayleigh. Por sua vez, as análises apresentadas em [10] foram generalizadas em [7], onde os autores consideraram um modelo de canal mais genérico, o desvanecimento Nakagami-*m*, e analisaram a influência do modelo de canal na determinação dos pontos ótimos de comutação para os critérios da vazão e do atraso. Finalmente, em [3] os autores consideraram um ambiente de rádio cognitivo com modulação adaptativa, onde o acesso ao meio é feito de forma concorrente por meio da técnica de múltiplo acesso *Slotted Aloha*, em um canal com desvanecimento Rayleigh, considerando apenas o critério da máxima vazão para determinação dos pontos ótimos de comutação.

Este artigo é uma extensão da análise apresentada em [3] considerando agora, para a determinação dos pontos ótimos de comutação, os critérios do atraso e uma métrica de desempenho conhecida como métrica *power*, que relaciona vazão e atraso.

O restante desse artigo é organizado da seguinte forma: na Seção II apresenta-se o modelo do sistema; a demonstração do

Ana Paula Teles Ribeiro da Silva e José Marcos Câmara Brito, Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), Santa Rita do Sapucaí - MG, Brasil, E-mails: anaptrs@gmail.com, asilva@inatel.br, brito@inatel.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Finep, com recursos do Funttel (01.14.0231.00), sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Brasil.

cálculo do atraso e da métrica *power* são apresentados na Seção III; os resultados numéricos são apresentados na Seção IV e, por fim, na Seção V são feitas as conclusões deste trabalho.

II. MODELO DO SISTEMA

A arquitetura da rede segue o modelo apresentado em [3] – [5]. Ambas as redes, primária e secundária, transmitem de maneira concorrente por meio do protocolo *Slotted Aloha*, porém o usuário secundário transmite em uma potência menor, respeitando o limite de interferência imposto pela rede primária. Cada uma das redes possui uma arquitetura do tipo centralizada, ou seja, a rede primária possui um ponto de acesso primário (PAP) e a rede secundária um ponto de acesso secundário (PAS). A rede primária é composta por N_p usuários e dentro de uma janela de tempo (*time slot*) do protocolo *Slotted Aloha*, existem I_p usuários em tentativa de transmissão onde $0 \leq I_p \leq N_p$. Similarmente, a rede secundária possui N_s usuários e dentro de um *time slot* existem J_s usuários secundários em tentativa de transmissão, onde $0 \leq J_s \leq N_s$.

No protocolo *Slotted Aloha*, os terminais só podem tentar transmitir seus pacotes no início de cada *time slot*, e transmitem sem se preocupar com os demais. A probabilidade de um usuário gerar um pacote é de σ_p para rede primária e σ_s para rede secundária. Se um pacote transmitido não for recebido com sucesso, o usuário aguarda o próximo *slot* e tenta retransmitir com probabilidade σ_p para rede primária e σ_s para rede secundária [3] – [5]. Neste trabalho, considerou-se retransmissões ilimitadas, sendo assim, um pacote recebido com erro será retransmitido até obter sucesso na transmissão.

III. CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

A. Critério do atraso

De acordo com [4] [5], o atraso médio é definido pelo número médio de *slots* necessários para que o pacote de interesse seja transmitido com sucesso.

A probabilidade de um pacote de interesse ser capturado pelo seu ponto de acesso no primeiro *time slot* após sua geração é denominado de p_{op} , para a rede primária, e p_{os} para a rede secundária; estas probabilidades são definidas respectivamente por [4] [5]:

$$p_{op} = \sum_{i=0}^{N_p-1} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p-1}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-1-i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-j} \times \left(\frac{1}{R+1}\right)^i \left(\frac{\gamma}{R+\gamma}\right)^j \quad (1)$$

$$p_{os} = \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s-1} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1-\sigma_p)^{N_p-i} \binom{N_s-1}{j} \sigma_s^j (1-\sigma_s)^{N_s-1-j} \times \left(\frac{1}{R\gamma+1}\right)^i \left(\frac{1}{R+1}\right)^j \quad (2)$$

onde i e j representam o número de estações interferentes em um dado *time slot*, visto que o pacote de interesse está sendo transmitido, R é a razão de captura e γ é a relação entre os níveis de potência média da rede primária e da rede secundária [3] – [5].

Seja $P_{op}(K_p=k)$ e $P_{os}(K_s=k)$ a probabilidade do pacote de interesse ser capturado com sucesso no k -ésimo *time slot* após sua transmissão para as redes primária e secundária, respectivamente, onde $k \geq 1$. Seguindo análise presente em [4] [5] as funções massa de probabilidade de K_p e de K_s , respectivamente, são definidas por:

$$\begin{cases} P_{op}(K_p=1) = p_{op} \\ P_{op}(K_p > 1) = (1-p_{op})(1-p_{op}\sigma_p)^{k-2} p_{op}\sigma_p, \quad k=2,3,\dots \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{os}(K_s=1) = p_{os} \\ P_{os}(K_s > 1) = (1-p_{os})(1-p_{os}\sigma_s)^{k-2} p_{os}\sigma_s, \quad k=2,3,\dots \end{cases} \quad (4)$$

O atraso médio das redes pode ser definido pelo valor esperado das variáveis aleatórias K_p e K_s , conforme [4] [5]. As expressões para cálculo do atraso médio para cada rede é deduzida em [4] [5], resultando nas expressões simplificadas:

$$D_{op} = 1 + \frac{1-p_{op}}{p_{op}\sigma_p} \quad (5)$$

$$D_{os} = 1 + \frac{1-p_{os}}{p_{os}\sigma_s} \quad (6)$$

Para contabilizar os erros do canal como em [4], basta ponderar as expressões p_{op} e p_{os} pela taxa média de pacotes recebidos com sucesso em cada modulação (\overline{PSR}_n), cujo cálculo é apresentado em [3]. Logo, a probabilidade de um pacote de interesse ser capturado pelo seu ponto de acesso no primeiro *time slot* passa a ser definida, para as redes primária e secundária, por [3]:

$$p_{pm} = p_{op} \overline{PSR}_n(\Delta_p) \cong p_{op} e^{-w_{0n}/\Delta_p} \quad (7)$$

$$p_{sn} = p_{os} \overline{PSR}_n(\Delta_s) \cong p_{os} e^{-w_{0n}/\Delta_s} \quad (8)$$

onde w_{0n} é uma constante para cada modo de modulação n definida em [3], Δ_p e Δ_s são a relação sinal-interferência média da rede primária e secundária, respectivamente, e são dadas por [3] – [5]:

$$\Delta_p = \frac{1}{(I_p-1) + J_s/\gamma} \quad (9)$$

$$\Delta_s = \frac{1}{I_p\gamma + (J_s-1)} \quad (10)$$

Considerando que o pacote de interesse está sendo transmitido e que I_p e J_s representam o número médio de estações interferentes em um dado *time slot*, as Equações (7) e (8) podem ser rescritas como:

$$p_{pm} \cong p_{op} e^{-w_{0n}(I_p+J_s/\gamma)} \quad (11)$$

$$p_{sn} \cong p_{os} e^{-w_{0n}(I_p\gamma+J_s)} \quad (12)$$

Em um sistema de modulação adaptativa onde o tamanho do pacote é fixo, para se calcular o atraso é preciso levar em consideração a duração do *slot*.

A duração do *slot* para cada ordem de modulação n é definida por:

$$\tau_n = \frac{n_p}{\beta_n \cdot BW} \quad (13)$$

onde n_p é o número de bits no pacote transmitido, β_n é a eficiência de largura de faixa da modulação corrente, em bps/Hz, e BW é a largura de faixa do canal, em Hz.

Sendo assim, o tempo médio para se transmitir um pacote de interesse com sucesso em uma dada modulação, para as redes primária e secundária, respectivamente, são calculados por:

$$D_{pn} \cong \left(1 + \frac{1 - p_{pn}}{p_{pn} \sigma_p}\right) \cdot \tau_n \quad (14)$$

$$D_{sn} \cong \left(1 + \frac{1 - p_{sn}}{p_{sn} \sigma_s}\right) \cdot \tau_n \quad (15)$$

B. Métrica Power

A métrica *power* foi inicialmente proposta por Giessler em [11] e vem sendo empregada em vários estudos [2] [12]. A métrica *power* é uma medida de desempenho da rede definida pela razão entre vazão e atraso, dada em pacotes/segundo².

Em [4] a vazão média da rede é definida pelo número médio de pacotes transmitidos com sucesso em um intervalo de tempo. Contudo, como neste trabalho está sendo considerado um esquema de modulação adaptativa com tamanho de pacote fixo, para se calcular a vazão a ser empregada no cálculo da métrica *power*, faz-se necessário determinar a vazão em função da duração do *slot* em cada ordem de modulação. Partindo das expressões apresentadas em [4], fazendo as adaptações necessárias, as vazões médias para as redes primária e secundária em uma dada modulação, são calculadas, respectivamente, por:

$$V_{pn} \cong \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1 - \sigma_p)^{N_p - i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1 - \sigma_s)^{N_s - j} \times \quad (16)$$

$$i \left(\frac{1}{R+1} \right)^{i-1} \left(\frac{\gamma}{R+\gamma} \right)^j \frac{e^{-w_{0i}/\Delta_p}}{\tau_n}$$

$$V_{sn} \cong \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=0}^{N_s} \binom{N_p}{i} \sigma_p^i (1 - \sigma_p)^{N_p - i} \binom{N_s}{j} \sigma_s^j (1 - \sigma_s)^{N_s - j} \times \quad (17)$$

$$j \left(\frac{1}{R\gamma+1} \right)^j \left(\frac{1}{R+1} \right)^{j-1} \frac{e^{-w_{0j}/\Delta_s}}{\tau_n}$$

Assim, as métricas *power* para as redes primária e secundária, respectivamente, são definidas por:

$$Power_{pn} = \frac{V_{pn}}{D_{pn}} \quad (18)$$

$$Power_{sn} = \frac{V_{sn}}{D_{sn}} \quad (19)$$

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, são apresentados os resultados numéricos dos pontos ótimos de comutação para os critérios do atraso e da métrica *power*, considerando o efeito de captura em um cenário de rádio cognitivo com modulação adaptativa onde as transmissões são feitas de maneira concorrente por meio do protocolo *Slotted Aloha*. Um conjunto de oito modulações foi considerado: B-PSK, 4-PSK e *M*-QAM com $M = 8, 16, 32, 64, 128$ e 256 . O ponto de comutação ótimo é definido pelo ponto de cruzamento entre as curvas. Todos os cálculos foram feitos com o *software* Mathcad.

Seguindo [3] – [5], os gráficos foram traçados em função da carga da rede primária (L_p), definida por: $L_p = N_p \sigma_p$.

O parâmetro Φ é determinado pela razão entre a probabilidade de geração de pacotes da rede secundária em relação à probabilidade de geração de pacotes da rede primária, ou seja:

$$\Phi = \frac{\sigma_s}{\sigma_p} \quad (20)$$

A. Critério do atraso

Inicialmente, analisou-se a influência do parâmetro Φ na determinação dos pontos de comutação ótimos para o critério do atraso, considerando $\Phi = 0.5, 1$ e 5 , e os demais parâmetros foram adotados idênticos aos de [3] – [5], ou seja, $N_p = N_s = 30$, $\gamma = 10$, $R = 3$ [dB], $BW = 1$ MHz e o tamanho do pacote igual a $n_p = 127$ bits para ambas as redes.

As Figuras de 1 a 3 apresentam as curvas de atraso médio da rede primária em função da carga da rede primária (L_p) para $\Phi = 0.5, 1$ e 5 , respectivamente.

Os pontos ótimos de comutação são obtidos pelos pontos de cruzamento das curvas de atraso para as diversas modulações. Porém, alguns pontos são difíceis de visualizar e foram obtidos por meio de um algoritmo executado no *software* Mathcad.

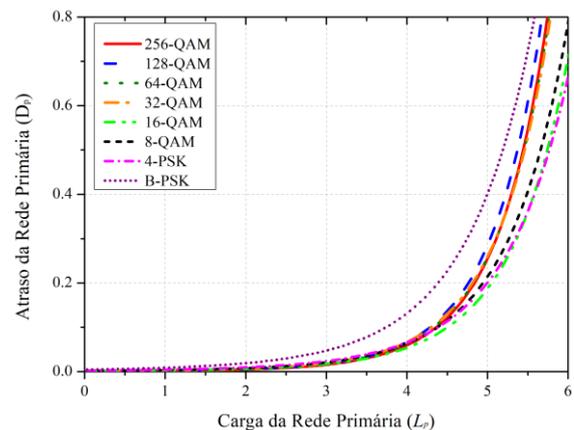


Fig. 1. Atraso médio da rede primária para $\Phi = 0.5$ e $N_p = 30$ e $N_s = 30$.

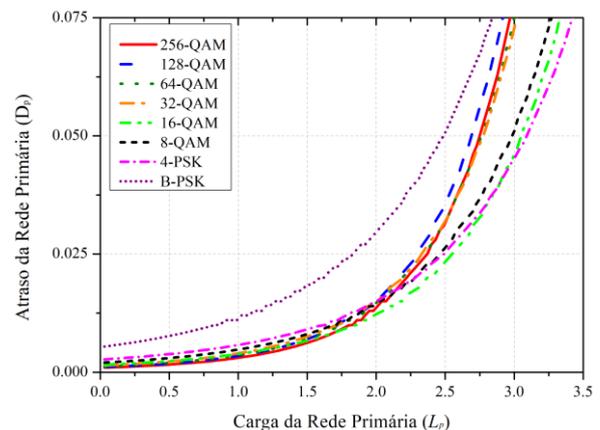


Fig. 2. Atraso médio da rede primária para $\Phi = 1$ e $N_p = 30$ e $N_s = 30$.

Da Figura 1, pode-se observar que o ponto de comutação ótimo entre as modulações ocorre primeiro entre as modulações 256-QAM para 16-QAM em $L_p = 3.54$, e depois de 16-QAM para 4-PSK em $L_p = 5.52$.

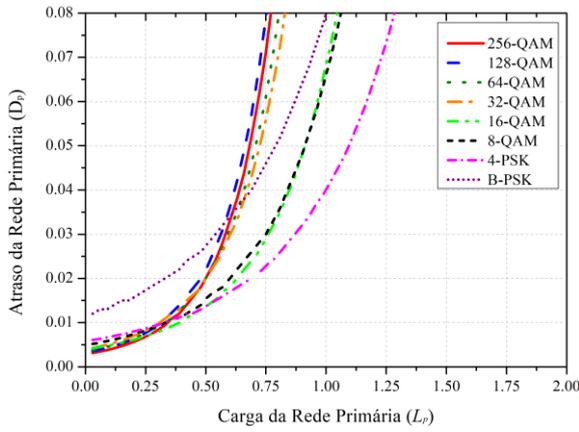


Fig. 3. Atrazo médio da rede primária para $\Phi= 5$ e $N_p = 30$ e $N_s = 30$.

Das Figuras 2 e 3, pode-se observar novamente que o ponto de comutação ótimo ocorre entre as mesmas modulações. Da Figura 2 têm-se a comutação ocorrendo de 256-QAM para 16-QAM, agora em $L_p = 1.71$, e depois de 16-QAM para 4-PSK em $L_p = 2.91$. Da Figura 3, têm-se a comutação ocorrendo de 256-QAM para 16-QAM quando $L_p = 0.27$ e depois de 16-QAM para 4-PSK em $L_p = 0.54$.

Como em [3], analisou-se agora a influência do número de usuários da rede na determinação dos pontos ótimos. A Figura 4 apresenta as curvas de atraso para $\Phi = 1$, alterando a quantidade de UPs para $N_p = 10$, e mantendo $N_s = 30$. A Figura 5 apresenta as curvas de atraso para $\Phi = 1$, alterando agora a quantidade de USs para $N_s = 10$, e mantendo $N_p = 30$.

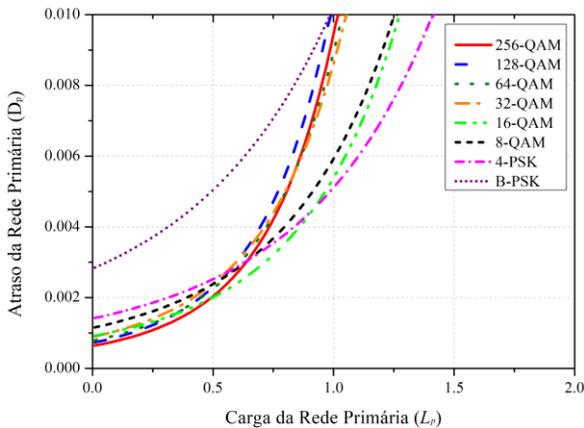


Fig. 4. Atrazo médio da rede primária para $\Phi= 1$ e $N_p = 10$ e $N_s = 30$.

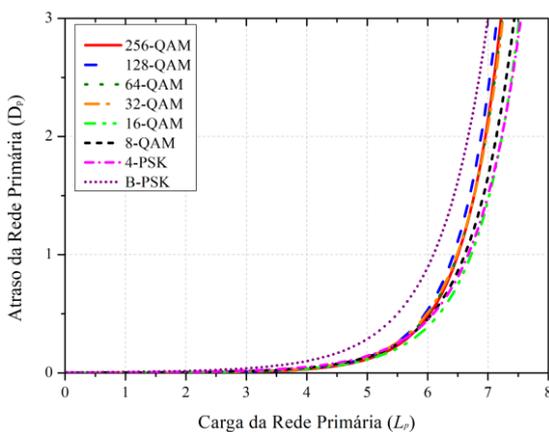


Fig. 5. Atrazo médio da rede primária para $\Phi= 1$ e $N_p = 30$ e $N_s = 10$.

Das Figuras 4 e 5, têm-se novamente a comutação ocorrendo entre as mesmas modulações. Da Figura 4 têm-se as comutações ocorrendo de 256-QAM para 16-QAM quando $L_p = 0.49$ e depois de 16-QAM para 4-PSK em $L_p = 0.92$. Da Figura 5 têm-se as comutações ocorrendo de 256-QAM para 16-QAM em $L_p = 4.86$ e depois de 16-QAM para 4-PSK em $L_p = 7.26$.

A Figura 6 apresenta a curva de atraso da rede secundária para $\Phi = 0.5$, $N_p = N_s = 30$, para os oito modos de modulação em função da carga da rede primária (L_p).

Da Figura 6 é possível perceber que as curvas de atraso não se cruzam, sendo a modulação 256-QAM a que possui o melhor desempenho em termos de atraso.

A investigação da rede secundária foi feita para as mesmas considerações apresentadas na rede primária, porém, não houve cruzamento entre as curvas. Desta forma, a análise dos pontos de comutação ótimos do ponto de vista da rede secundária é irrelevante, com a modulação 256-QAM sempre resultando no menor atraso, e os demais resultados não serão apresentados neste artigo.

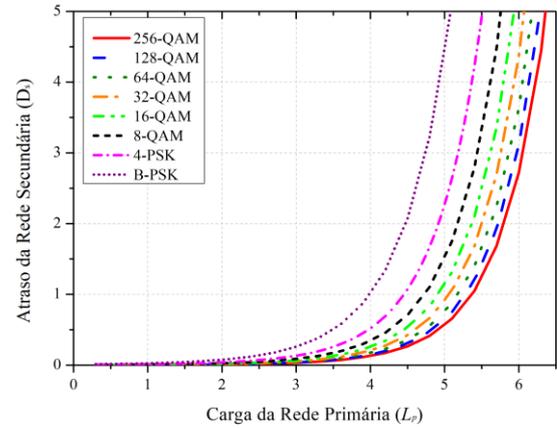


Fig. 6. Atrazo médio da rede secundária para $\Phi= 0.5$ e $N_p = 30$ e $N_s = 30$.

B. Métrica Power

Para análise dos pontos de comutação ótimos pelo critério da métrica *power*, considerou-se novamente os mesmos parâmetros [3] – [5].

As Figuras de 7 a 9 apresentam as curvas de métrica *power* da rede primária em função da carga da rede primária (L_p) para $\Phi = 0.5$, 1 e 5, respectivamente.

Das Figuras 7 a 9, pode-se observar que as comutações ocorrem entre as mesmas modulações encontradas para o critério do atraso. Para $\Phi = 0.5$, a comutação ocorre primeiro entre as modulações 256-QAM para 16-QAM em $L_p = 3.54$ e depois de 16-QAM para 4-PSK em $L_p = 5.55$. Da Figura 8, onde $\Phi = 1$, a comutação ocorre primeiro entre as modulações 256-QAM para 16-QAM em $L_p = 1.74$ e depois de 16-QAM para 4-PSK em $L_p = 2.91$. Finalmente para $\Phi = 5$, a comutação ocorre entre as modulações 256-QAM para 16-QAM em $L_p = 0.33$ e depois de 16-QAM para 4-PSK em $L_p = 0.57$.

Como no critério do atraso, analisou-se também a influência do número de usuários das redes na determinação dos pontos de comutação, porém o mesmo comportamento foi observado, a comutação ocorre entre as mesmas modulações. A Tabela I sintetiza os resultados dessas análises.

Na análise da rede secundária, novamente não houve cruzamento entre as curvas e por esse motivo seus resultados não serão apresentados neste artigo.

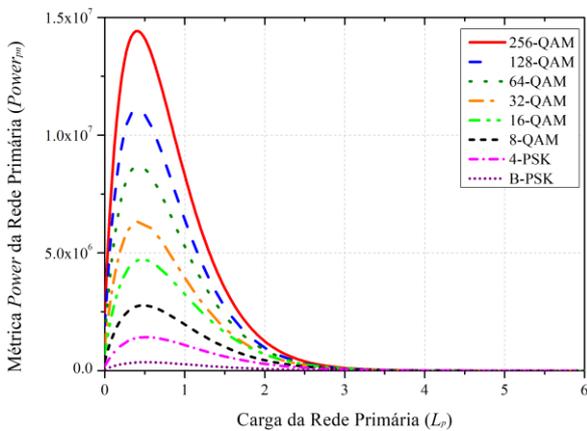


Fig. 7. Métrica Power da rede primária para $\Phi=0.5$ e $N_p = 30$ e $N_s = 30$.

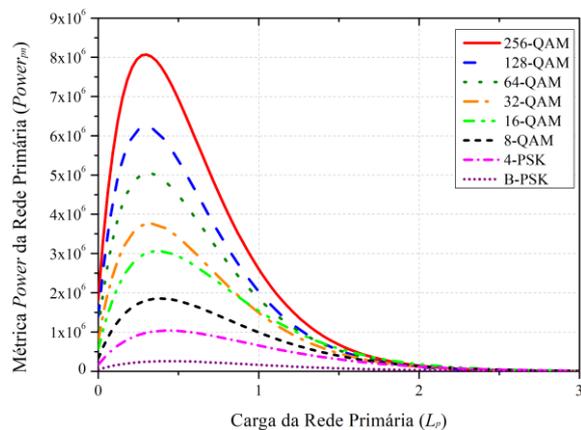


Fig. 8. Métrica Power da rede primária para $\Phi=1$ e $N_p = 30$ e $N_s = 30$.

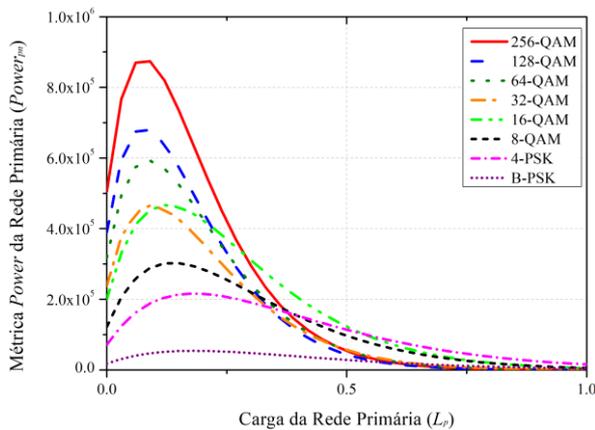


Fig. 9. Métrica Power da rede primária para $\Phi=5$ e $N_p = 30$ e $N_s = 30$.

TABELA I. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE USUÁRIO NA DETERMINAÇÃO DOS PONTOS ÓTIMOS DE COMUTAÇÃO PARA CRITÉRIO DA MÉTRICA POWER

N_p	N_s	Comutação de	Ponto Ótimo de Comutação (L_p)
10	30	256 para 16-QAM	0.55
		16-QAM para 4-PSK	0.97
30	10	256 para 16-QAM	4.86
		16-QAM para 4-PSK	7.29

V. CONCLUSÕES

Neste artigo analisou-se os pontos ótimos de comutação de um sistema com modulação adaptativa operando em uma rede de rádios cognitivos com o acesso ao meio concorrente utilizando múltiplo acesso *Slotted Aloha* sob desvanecimento Rayleigh. Para a definição dos pontos ótimos de comutação consideraram-se os critérios do atraso e da métrica *power*.

Ao final da investigação pode-se concluir que o uso da técnica de modulação adaptativa neste cenário pode maximizar o desempenho da rede primária em termos de atraso e métrica *power*, mas é irrelevante do ponto de vista da rede secundária.

Além disso, para a rede primária pode-se concluir também que os pontos ótimos de comutação são dependentes do critério de desempenho, do tráfego da rede secundária (Φ), e do número de usuários nas redes. Porém, as comutações que otimizam o atraso e a métrica *power* da rede primária ocorrem sempre entre as mesmas modulações.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Foukalas, T. Khattab, and H. V. Poor, "Adaptive modulation in multi-user cognitive radio networks over fading channels," in *8th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks (CROWNCOM)*, 2013, pp. 226–230.
- [2] A. P. T. R. da Silva, and J. M. C. Brito, "Influence of the Channel Model in the Optimum Switching Points in a Cognitive Radio Network Combined with Adaptive Modulation," in *IEEE 3rd International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, May 2016, pp. six pages.
- [3] A. P. T. R. da Silva, and J. M. C. Brito, "Analysis of Adaptive Modulation Performance in Networks with Multiple Access Slotted Aloha," in *The 31st International Conference on Information Networking (ICOIN 2017)*, Da Nang, Vietnam, Jan. 2017, pp. 210–215.
- [4] A. J. Faria, "Contribuições à análise de desempenho de protocolos de múltiplo acesso em sistemas de rádios cognitivos," Dissertação (Mestrado), Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Santa Rita do Sapucaí, MG, 2014.
- [5] Z. Yang, "Investigations of multiple access protocols in cognitive radio networks," Ph.D. dissertation, Dept. of Elect. and Comput. Eng., Stevens Inst. of Technology, Hoboken, NJ, 2010.
- [6] M.-S. Alouini and A. J. Goldsmith, "Adaptive Modulation over Nakagami Fading Channels," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 13, no. 1–2, May 2000, pp. 119–143.
- [7] A. P. T. R. da Silva, and J. M. C. Brito, "Analysis of the Optimum Switching Points in an Adaptive Modulation System in a Nakagami-*m* Fading Channel Considering Throughput and Delay Criteria," in *The International Journal on Advances in Telecommunications (IARIA 2016)*, vol.9, pp. 44–54.
- [8] J. M. C. Brito and I. S. Bonatti, "Analysing the optimal threshold level for adaptive modulation in the wireless ATM networks," *Proc Iasted Int. Conf. Wirel. Opt. Commun. Banf Can.*, Jul. 2002, pp. 510–515.
- [9] Q. Liu, S. Zhou, and G. B. Giannakis, "Cross-Layer combining of adaptive Modulation and coding with truncated ARQ over wireless links," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 3, no. 5, Sep. 2004, pp. 1746–1755.
- [10] M. S. Y. Bandiri and J. M. C. Brito, "Analyzing the Optimum Switching Points for Adaptive Modulation in Wireless Networks with Rayleigh Fading," *6th IEEE Lat.-Am. Conf. Commun.*, pp. six pages.
- [11] A. Giessler, J. Hänle, A. König, and E. Pade, "Free buffer allocation — An investigation by simulation," *Comput. Netw.* 1976, vol. 2, no. 3, pp. 191–208, Jul. 1978. T.B.
- [12] Bergamo R. T. and Cardieri P., "Métrica de Eficiência em Redes de Rádio Cognitivo com Fila e Retransmissão Garantida," *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT2013.*, pp. five pages, Sep. 2013.