

Um algoritmo de seleção de canal em redes mesh sem fio cognitivas

Ricardo Seiti Yoshimura e Juliano João Bazzo

Resumo — A escassez do espectro de frequência tem sido pauta das agências reguladoras de vários países e de esforços de órgãos de padronização para criar sistemas com capacidade de atuar de forma secundária em espectros já licenciados, como nos chamados *white spaces*. Tal proposta pode ser implantada por meio de sistemas mesh sem fio, os quais oferecem inúmeras vantagens, como escalabilidade, auto-recuperação e auto-gerenciamento. Todavia, a complexidade no tratamento de desempenho devido ao seu próprio caráter dinâmico constitui-se num desafio à engenharia. Este artigo avalia a capacidade de uma rede mesh sem-fio, operando em diferentes canais de frequência de TV e propõe uma estratégia para a escolha e distribuição das mesmas.

Palavras-Chave — rádio cognitivo, redes mesh sem fio, white space, seleção de canal.

Abstract — Frequency spectrum starvation has been ground to discussions in regulator commissions within many countries and in standardization groups as well, in order to design systems with the ability to act as secondary users in licensed frequencies, as in the so called white spaces. Such proposal can be deployed with the use of wireless mesh networks (WMN), which offers many advantages, as the scalability, auto-healing and auto-management properties. However, the complexity over the performance evaluation due to its own dynamic characteristics is a great challenge to engineering. This paper evaluates the capacity of a WMN in different frequency TV channels and proposes a way to select and to distribute the frequencies.

Keywords — cognitive radio, wireless mesh networks, white space, channel selection.

I. INTRODUÇÃO

A escassez do espectro de frequência e seu consequente custo elevado têm motivado diversos trabalhos de pesquisa com o objetivo de maximizar a eficiência espectral, mas apesar de todo o esforço, medições realizadas na cidade de San Diego nos EUA mostraram que a utilização do espectro nas faixas de frequência licenciadas abaixo de 3 GHz foi de apenas 7% [1], refletindo-se também em outros centros urbanos. Desta forma, o uso oportuno do espectro por outros usuários tornou-se foco de muitas agências reguladoras de telecomunicações, como é o caso da FCC (Federal Communications Commission) nos EUA para a faixa de frequências UHF, com o uso de um paradigma comumente referenciado como *white space* [10]. Por meio dele, outros usuários poderiam transmitir num canal licenciado que esteja desocupado em termos de ausência do sinal. Tal propósito pode ser alcançado por meio de sistemas de rádio cognitivo, capazes de realizar, dentre outras funções, a obtenção do conhecimento do ambiente operacional de rádio e a possibilidade de reagir a estas informações por meio do ajuste

dinâmico e autônomo de seus parâmetros operacionais e protocolos.

Redes sem fio ad hoc poderiam se beneficiar desta solução, cujas características intrínsecas referentes à escalabilidade, auto-recuperação e auto-gerenciamento oferecem as condições adequadas para o uso oportuno e dinâmico do espectro.

Seguindo esta tendência, redes mesh sem fio (WMN) representam uma proposta factível para que as funcionalidades de rádio cognitivo sejam implementadas na mesma, cujos atributos de ambas as tecnologias resultam em um sistema altamente resiliente e de baixo custo.

Em uma WMN, há um elemento central, o gateway, denotado como o elemento intermediário entre os nós da rede privada ad hoc e a Internet. O dimensionamento adequado de uma WMN reflete sobremaneira na capacidade sistêmica que uma rede pode oferecer. Desta forma, a vazão por nó fica atrelada a parâmetros como número de gateways para uma dada quantidade n de nós, relação dos nós para com os seus vizinhos, raio de cobertura, entre outros.

Um dos trabalhos pioneiros na análise de capacidade foi realizado por Gupta e Kumar em [2], onde os autores mostraram, de forma analítica, os limites de vazão inferior $\Omega(\cdot)$ e superior $O(\cdot)$, tal que o aumento da densidade do número de nós resulta numa redução da vazão total acumulada. Kleinrock e Silvester em [3] mostraram que seis nós vizinhos é uma condição ideal para um nó maximizar sua vazão, uma vez que ele ofereceria o melhor compromisso entre potência de transmissão, reuso do canal e número médio de saltos, embora em [4] foi demonstrado que não é possível encontrar uma densidade ótima para uma situação genérica.

Em [5] Jun e Sichitiu propuseram uma técnica para o cálculo a capacidade de uma WMN e concluíram que a capacidade assintótica de cada nó n decresce com o número de nós tal que $O(1/n)$. Os resultados mostraram que a vazão é inferior em relação aos resultados de uma rede ad-hoc de topologia aleatória, que é da ordem de $O(W/\sqrt{n})$ [2]. A razão pela qual isto ocorre é devido à presença de gateways incorporados ao sistema, que agem como gargalos de tráfego e que, de fato, o aumento de sua densidade na rede ocasionaria uma melhora na capacidade. É de se esperar, portanto, que o número de gateways e seu correto posicionamento são parâmetros essenciais para a otimização da rede tal que a mesma possa garantir um limiar de vazão, conforme demonstrado por [6], o qual propõe um algoritmo para se atingir tais objetivos.

Já em [7] uma técnica analítica para se estimar a conectividade e a capacidade, cuja metodologia faz uso de uma

Ricardo Seiti Yoshimura e Juliano João Bazzo, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações - CPqD, Campinas, Brasil, E-mails: {rseiti, jbazzo}@cpqd.com.br. Este trabalho foi financiado com recursos do FUNTEL.

distribuição estatística de nós, facilita o cálculo da região de inibição da transmissão entre os nós.

Uma vez que os gateways já estão posicionados, o objetivo deste artigo é elaborar uma estratégia para a distribuição das frequências ao longo de toda a rede, tal que possa disponibilizar um compromisso entre o uso da frequência e a vazão em cada nó, com reduzido tráfego de controle na rede.

II. RESTRIÇÕES NA TRANSMISSÃO NÓ-A-NÓ EM UMA WMN

Numa mesma potência de transmissão, o uso de uma dada frequência é um dos fatores que tem influência direta no raio de cobertura de um equipamento transmissor, bem como na interferência para com os outros. Neste sentido, considerando-se que não haja obstruções ao longo do caminho e fazendo uso do modelo de propagação no espaço livre de Friss [9], o aumento do raio de cobertura pode reduzir o número de saltos necessários entre os nós que a informação deve percorrer entre a fonte e o destino. Nestas circunstâncias, supondo que cada nó seja gerador de um tráfego de carga G e de que o mesmo repasse a carga ao próximo nó, é de se esperar que o acúmulo da carga total seja menor, principalmente em torno do gateway, conforme mostrado pelas Fig. 1 e 2.

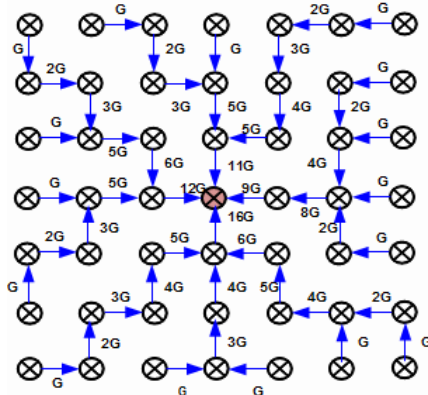


Fig. 1. O alcance de transmissão se restringe ao nó vizinho mais próximo, para um fluxo de dados em direção ao gateway. O sentido oposto do fluxo prevê resultados semelhantes

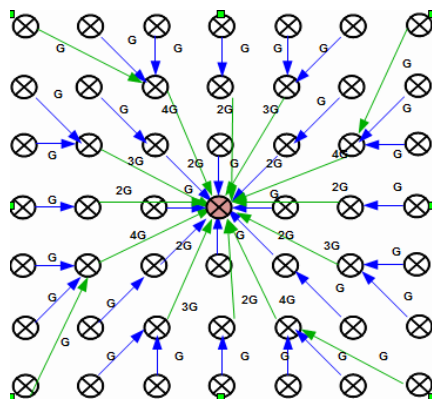


Fig. 2. O alcance de transmissão pode cobrir não somente os nós vizinhos imediatos. Observa-se uma redução da carga total a ser repassada por nó

Todavia, há o aumento da região de inibição da transmissão entre os nós quando se considera um único canal de frequência em esquema RTS/CTS, o que tende a deteriorar o desempenho da rede. Jun em [5] denota esta região como domínio de colisão, pelo qual num esquema RTS/CTS o domínio de

colisão do m -ésimo enlace é representado pelo conjunto de enlaces formado pelo m -ésimo enlace e todos os demais que devem permanecer inativos para que a transmissão seja bem sucedida.

Em [7] uma técnica analítica para se estimar a conectividade e a capacidade foi demonstrada, assumindo-se um número finito de nós aleatoriamente distribuídos em uma área quadrada e modelados segundo uma distribuição poissoniana, fazendo uso da tecnologia IEEE 802.11b e da técnica CSMA - RTS/CTS. A metodologia inicial consiste no cálculo do grau de conectividade entre os nós da rede, o que leva em consideração não só a probabilidade de um conjunto de nós estarem isolados como a interação de um nó para com os outros. Esta interação, denotada pelo número médio de terminais vizinhos n_v dentro do alcance de transmissão, além da distância média d_m percorrida em um salto, são fundamentais para se compreender como se pode extrair algum benefício entre a dualidade do raio de cobertura e o problema do uso do canal por mais de um usuário.

A determinação da capacidade faz uso destes parâmetros e o cálculo da mesma baseia-se no conceito de domínio de colisão de Jun. Considerando que todos os nós são geradores de tráfego e possuem a possibilidade de repassar o tráfego de outros nós, nota-se que a carga maior de tráfego se concentra geralmente próximo ao gateway, o que indica a presença de um domínio de colisão crítico. Portanto, a capacidade nominal de uma rede WMN fica em função da somatória de cargas dentro do domínio de colisão crítico.

Num cenário realístico, a região do domínio de colisão tende a abranger uma área maior que a região de cobertura dentre os nós envolvidos na transmissão. Em [7] por exemplo o modelo analítico adota o domínio de colisão crítico como sendo em até três vezes a área coberta de um nó e assim será também definida esta métrica no artigo.

III. CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

O cenário de simulação que segue tem o objetivo de se verificar o comportamento da rede com o aumento do raio de cobertura. Os nós são igualmente espaçados na forma geométrica de treliça, cujo gateway se encontra no centro da mesma. A Tab. 1 mostra os parâmetros da rede Wi-Fi utilizados na simulação com o software NS-2. O componente de software que implementa o protocolo OLSR foi descrito em [8]. Para as frequências de operação mencionadas no item 15 da Tabela 1, a distância máxima para garantir a conexão dos nós é a seguinte: $d_{800MHz} = 1882,87$, $d_{600MHz} = 2510,50$ e $d_{400MHz} = 3765,75$ m

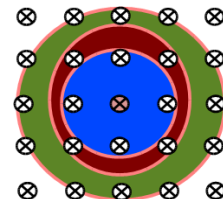


Fig. 3. Representação do alcance de transmissão de um dos nós (no caso o Gateway) para cada frequência

Desta forma, a distância entre os nós, 1.600m, foi escolhida estrategicamente para que garanta a conexão na maior frequência de operação do sistema, 800MHz. A Fig. 3

mostra os nós cobertos para as frequências mencionadas. As frequências pontuais utilizadas na simulação não necessariamente estarão disponíveis no sistema, mas são importantes nesta análise por representarem diferentes graus de conectividade e de inibição da transmissão.

Tabela 1: Parâmetros do Cenário de Simulação

#	Parâmetro	Valor
1	Modelo de Propagação	Friss ($G_r=1$, $G_t=1$)
2	Distância entre os nós (d)	1600m
3	Potência de Transmissão	30dBm
4	Sensibilidade do Receptor	-96dBm
5	Capacidade do Enlace	6Mbps
6	Tecnologia de Transmissão	Wi-Fi 802.11
7	Tamanho do buffer	125 kbytes
8	Tempo de simulação	30 segundos
10	Tempo de chamada	30 segundos
11	Gerador de tráfego	CBR
12	Tamanho do pacote	1000 bytes
13	Camada de transporte	TCP Reno
14	Tamanho da treliça	(7,7), (9,9), (11,11), (13,13)
15	Frequências de Operação	400, 600 e 800MHz

IV. ANÁLISE DA CAPACIDADE EM MÚLTIPLAS FREQUÊNCIAS

Considere o cenário da Fig. 4, que ilustra uma distribuição de nós em treliça com distâncias igualmente espaçadas entre eles, inseridos dentro de uma área quadrada de lado l , onde o círculo menor e maior representam, respectivamente, a área de cobertura dos domínios de colisão críticos para 800 e 400MHz. A redução da frequência ocasionaria um aumento do raio de cobertura e, por conseguinte, um aumento da área do domínio de colisão crítico.

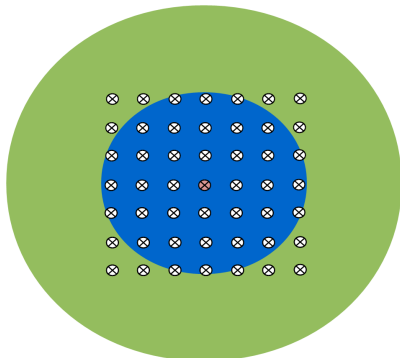


Fig. 4. Os domínios de colisão críticos para cada frequência envolvem praticamente o mesmo número de nós

Supondo um canal cuja frequência seja operada em 800 MHz, note que na ocasião em que uma informação é originada do gateway para um nó qualquer, o domínio de colisão crítico cobre praticamente todo o grid de nós. Observe agora que

embora a redução da frequência ocasione um aumento do domínio de colisão crítico, praticamente o mesmo número de nós estão envolvidos nas frequências inferiores a 800 MHz, o que indica que do ponto de vista do domínio de colisão crítico nenhum canal poderia se beneficiar. Todavia, o aumento do raio de cobertura em canais de frequência menores implica num menor número de saltos até o gateway, o que justifica o ganho em vazão, conforme os resultados exibidos pela Fig. 5 para 48 nós, fazendo uso da metodologia analítica de [7] e de resultados de simulações.

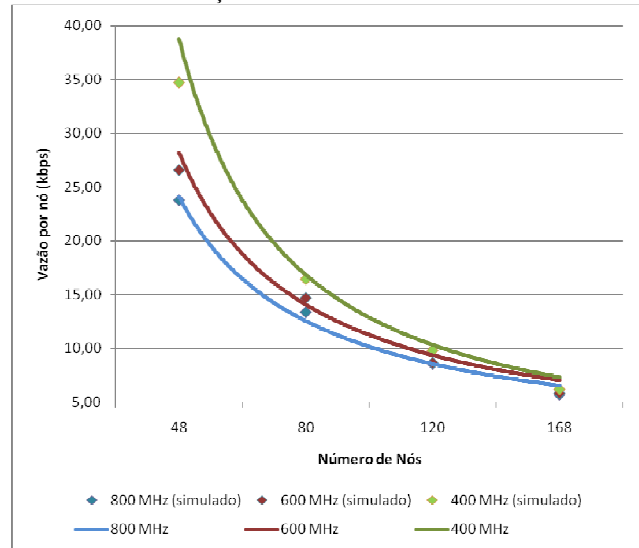


Fig. 5. Resultados de simulação e da metodologia analítica (em linha contínua) mostram o ganho em vazão por nó obtido em canais de frequência menores, sob determinadas condições

Observe que à medida que o número de nós cresce, há um declínio do ganho obtido entre as diferentes frequências, uma vez que o domínio de colisão dos outros canais de frequência começa a abranger um maior número de nós em relação ao caso de 800 MHz, conforme ilustrado na Fig. 6.

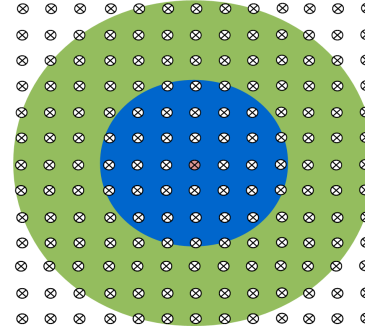


Fig. 6. O domínio de colisão crítico de frequências inferiores a 800 MHz abrangem um número maior de nós em relação à mesma, conforme o cenário acima para 168 nós

V. UM ALGORITMO DE SELEÇÃO DE CANAL EM REDES MESH SEM FIO COGNITIVAS

Tendo em mente o comportamento de desempenho descrito na seção anterior, pode-se adotar uma estratégia em termos de protocolo para a distribuição dos canais de frequência em toda uma rede, onde diversos gateways podem estar envolvidos. Desta forma, a seguinte metodologia é proposta:

Assumindo-se o uso do maior canal de frequência, o *gateway* envia uma mensagem de broadcast a todos os nós em torno de seu raio de alcance. O conteúdo da mensagem inclui um contador de índice $i = 1$, uma identificação ID da solicitação e requisita uma resposta dos nós ouvintes.

O nós ouvintes respondem a solicitação indicando seu endereço MAC na rede e o valor do índice i , seguido da atualização de uma tabela contendo o ID da solicitação e o valor do índice i . Em seguida, o contador do índice i é incrementado e a mensagem é repassada aos nós dentro de seu raio de alcance num esquema de *flooding*.

Os nós que recebem a nova mensagem verificam em suas tabelas se uma requisição semelhante já havia sido enviada, por meio do ID na tabela. Em caso afirmativo, o nó ignora a mensagem e não toma ação alguma. Caso contrário, o procedimento do item anterior é reiterado até que toda a rede tenha sido mapeada. Note que o índice i é uma maneira aproximada de se descrever o número de saltos necessários para a informação de um nó chegar até o *gateway*, tal que

$$I_s = \sum_{n=0}^{N_s} (i = s) \quad (1)$$

descreve o número total de nós N_s que estão localizados a aproximadamente s saltos do *gateway*. A Fig. 7 e a tabela abaixo auxiliam a interpretar a ideia em uma rede:

Tabela 2: Descrição dos nós em função do número de saltos

#	Descrição	Valor
⊗	Gateway	
⊗	Nós a 1 salto do Gateway	$I_1 = 4$
⊗	Nós a 2 saltos do Gateway	$I_2 = 6$
⊗	Nós a 3 saltos do Gateway	$I_3 = 4$

Fig. 7. Esboço de nós em função do número de saltos

O *gateway*, então, envia as informações recebidas de todos os roteadores a um servidor remoto, tal que ele possa concentrar de todos os *gateways* as informações. Uma aplicação remota em funcionamento a partir de uma requisição de um *gateway* qualquer realiza a seguinte comparação nó-a-nó:

$$N_t \cdot i < N_t^{vizinho} \cdot i^{vizinho} \quad (2)$$

onde $N_t^{vizinho}$ e $i^{vizinho}$ são respectivamente o número total de nós e o número de saltos até o *gateway* vizinho. N_t é facilmente calculado por meio de

$$\sum_{i=1}^k I_i \quad (3)$$

onde k é o maior número de saltos que a rota de um nó até o *gateway* pode descrever.

Caso a comparação acima seja verdadeira, o *gateway* incluirá o referido nó para que a comunicação entre ambos seja a rota padrão. Do contrário, o *gateway* não modificará o status do nó porém decrementará o número de nós distantes dos s saltos em $I_s = I_s - 1$.

Note que a métrica de decisão envolve o número total de nós num mesmo canal de frequência e o número de saltos que um nó está distante do *gateway*, o que de fato são parâmetros essenciais para a otimização de uma rede.

Sabendo-se que α é o número aproximado de nós dentro do domínio de colisão crítico com exceção dos nós vizinhos imediatos ao *gateway*, tal que

$$\alpha = I_2 + I_3 + I_4 \quad (4)$$

e que β é o número de nós que estão aproximadamente entre cinco e oito saltos além do *gateway*, i.e.

$$\beta = I_5 + I_6 + I_7 + I_8 \quad (5)$$

podemos declarar que o *gateway* que possuirá o menor canal de frequência será o que obtiver o maior valor da diferença $(\alpha - \beta)$, de maneira a se constituir a distribuição mais semelhante à da Fig. 4. Uma vez configurado desta forma para um *gateway*, os demais seguem procedimento equivalente para os canais de frequência restantes.

Desta maneira, o *gateway* está preparado para enviar uma mensagem de atualização via endereçamento MAC a todos os nós cuja rota entre eles deva ser estabelecida como padrão, junto à configuração de qual canal de frequência tais nós devam operar.

Os nós, ao receberem a mensagem de alteração, atualizam a rota até o *gateway*, modificam o canal de frequência para que esteja em comum acordo ao *gateway* e seta o ID da comunicação entre ambos como ativo.

O algoritmo pode ser ilustrado pela Fig. 8, a qual atribui a cada *gateway* uma determinada quantidade de nós, seguido da seleção do canal de frequência. Note que nós igualmente espaçados não é uma pré-condição, uma vez que a análise pelo domínio de colisão [2][7] leva em consideração o enlace nó-a-nó e não a distância entre eles.

Uma vez realizada as configurações iniciais da rede, a mesma pode ser ajustada dinamicamente, dependendo da demanda de tráfego ou da presença de um usuário primário na rede.

A migração dos nós de um *gateway* a outro em função da demanda de tráfego ocorre se e somente se:

- Capacidade de tráfego medida no *gateway* está igual ou superior a 95%, cuja média foi constatada em pelo menos 1 hora;

- Capacidade de tráfego do(s) *gateway*(s) vizinho está igual ou inferior a 65%.

Sob estas duas condições, o *gateway* com capacidade de tráfego limitada envia uma requisição ao servidor remoto de

modo que o mesmo separe 10% dos nós para migração a gateway vizinho.

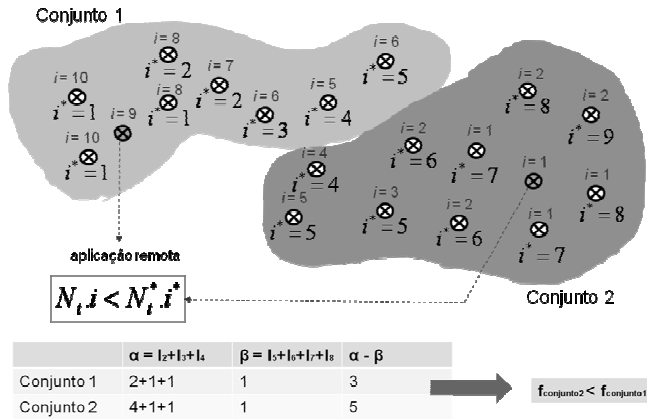


Fig. 8: Exemplo de configuração inicial da rede

A escolha dos nós é feita em duas etapas. Na primeira delas, 10% dos nós mais próximos à fronteira de ambos os gateways são organizados, segundo

$$\min(i - i^{*vizinho}) \quad (6)$$

Eventualmente, há a possibilidade de que existam muitos roteadores próximos às fronteiras de ambos os gateways tal que o resultado da equação em (2) é superior a 10%. Neste caso, os roteadores resultantes em (6) são reavaliados por

$$\min(i) \quad (7)$$

Dentro desta premissa, a intenção é de que sejam migrados aproximadamente 10% dos nós na fronteira de ambos os gateways e com conectividade direta a roteadores do canal vizinho. A Fig. 9 exemplifica o processo.

Note pelo exemplo que eventualmente há a possibilidade de um nó que migrou a outro gateway seja causador de uma quebra de enlace a outros nós. Neste caso, o nó destinado a migrar a outro conjunto realiza antes uma verificação de nós dependentes a ele, e caso algum deles reporte que a comunicação até o gateway obrigatoriamente passe por ele, tal nó dependente também deve ser incorporado ao outro conjunto.

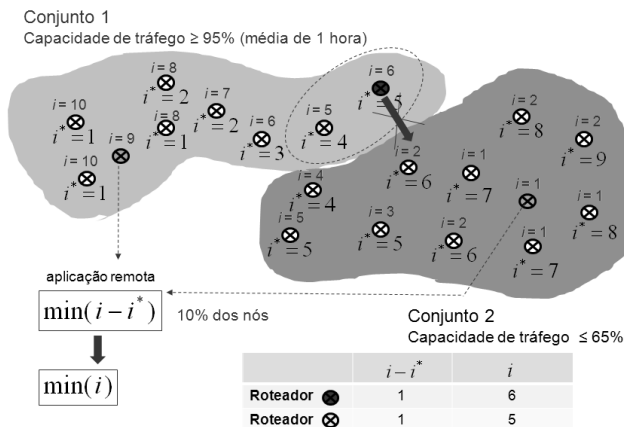


Fig. 9: Atribuição de nós a um determinado gateway em função da demanda de tráfego

VI. CONCLUSÕES

O uso oportunista do espectro tem se revelado como uma maneira viável para um melhor aproveitamento do mesmo. Todavia, até então não havia sido elaborada uma estratégia para a escolha das frequências na faixa de UHF bem como uma maneira de distribuí-las ao longo de toda a rede.

O presente trabalho conclui que o uso de canais de frequência mais baixos podem disponibilizar maiores ganhos em termos de vazão, desde que o número de nós envolvidos no domínio de colisão crítico seja aproximadamente igual ao de outros canais de frequência, o que pode ser obtido quando os nós estão confinados em uma área tal que o domínio de colisão crítico do canal de maior frequência cubra praticamente a totalidade desta área. A partir desta afirmação, uma metodologia de reduzida complexidade e tráfego de controle foi proposta, para a distribuição de frequências ao longo de toda rede mesh, levando em consideração os principais indicadores de desempenho de uma WMN: número de nós, número de saltos de um nó até o gateway e o domínio de colisão crítico. Além disso, a rede possui flexibilidade para que seja otimizada dinamicamente do ponto de vista da demanda de tráfego na rede. Para trabalhos futuros, é de interesse investigar a eficácia do algoritmo frente a outros trabalhos semelhantes por meio de simulações, bem como ajustes do ambiente de simulação, como por exemplo utilizar um modelo de propagação que leve em conta o sombreamento, o desvanecimento Rayleigh e a distribuição não uniforme dos nós, de modo a propiciar um cenário mais próximo da realidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o governo brasileiro que através do FUNTEL – Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações financiou o Projeto Redes de Acesso Sem Fio Avançadas – RASFA, conduzido pelo CPqD.

REFERÊNCIAS

- [1] R.V. Prasad, P. Pawelczak e J. Hoffmeyer, "Cognitive Functionality in Next Generation Wireless Networks: Standardization Efforts", *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, Apr. 2008, pp. 72-78.
- [2] P. Gupta, P.R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks", *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388-404, Mar. 2000.
- [3] L. Kleinrock e J. Silvester, "Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number", *Proc. of the IEEE Nat. Telecom. Conf.*, Birmingham, Alabama, Dec. 1978, pp. 4.3.1-4.3.5.
- [4] E.M.B. Royer, P.M.M. Smith e L.E. Moser, "An analysis of the optimum node density for ad-hoc mobile networks", *IEEE International Conference on Communications*, vol. 3, Jun. 2001, pp. 857-861.
- [5] J. Jun e M.L. Sichitiu, "The Nominal Capacity of Wireless Mesh Networks", *IEEE Wireless Comm.*, vol. 10, no. 5, pp. 8-14, Oct. 2003.
- [6] F.L. Figueiredo, "Capacidade e Roteamento em Redes Metropolitanas Sem-fio Híbridias", Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Computação) – Depto. de Comunicações, Unicamp, Campinas, 2008.
- [7] E. Miorando and F. Granelli, "On Connectivity and Capacity of Wireless Mesh Networks", *IEEE Int. Conf. on Comm.*, pp. 91, Jun. 2007.
- [8] F.J. ROS, Módulo de Software para OLSR: UM-OLSR, <http://maximum.dif.um.es/um-olsr/html/>
- [9] T.S. Rappaport, *Wireless Communications – Principles and Practice*, Prentice Hall, 2nd edition, 2002.
- [10] Q.H. Mahmoud, *Cognitive Networks – towards self-aware networks*, John Wiley & Sons, Ltd., 2007.