

Roteamento, Atribuição e Adaptação Conjunta de Largura de Canais em Redes em Malha sem Fio IEEE 802.11

Celso Barbosa Carvalho, José Ferreira de Rezende

GTA - PEE - COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Caixa Postal 68.504 – 21.945-970 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil
{celso,rezende}@gta.ufrj.br

Abstract

Wireless Mesh Networks (WMNs) have become increasingly important due to its use as a network backbone or access to last mile users. In this context, increase the capacity of WMNs is a necessary topic. A large number of researches in this area consider the use of joint routing and channel assignment in order to increase the capacity in these networks. Recent studies show that the throughput performance of WMNs can be improved with the use of transmission channels of different widths. In this paper we extend a Linear Programming (LP) model and we consider joint routing, channel assignment and channel width adaptation in order to increase the capacity of WMNs. The results show an improvement of the capacity in networks that use the investigated approach.

Keywords: Wireless mesh networks, routing, channel assignment, channel width adaptation, capacity

Resumo

As redes em malha sem fio (Wireless Mesh Networks - WMNs) têm ganho considerável importância devido a sua crescente utilização como backbone de rede ou para acesso a usuários de última milha. Neste contexto, o aumento da capacidade das WMNs trata-se de uma questão de grande interesse. Uma grande parte das pesquisas nesta área considera o uso de roteamento e atribuição conjunta dos canais como forma de aumentar a capacidade destas redes. Estudos recentes mostram que o desempenho de vazão das WMNs pode ser melhorado com a utilização de canais de transmissão de diferentes larguras. Neste artigo estendemos um modelo de Programação Linear (Linear Programming-LP) e consideramos o roteamento, a atribuição e a adaptação conjunta de largura

dos canais de comunicação como forma de aumentar a capacidade das WMNs. Os resultados mostram um aumento da capacidade para as redes que utilizam a abordagem investigada.

Palavras-chave: Redes em malha sem fio, roteamento, atribuição de canais, adaptação de largura de canal, capacidade

1. INTRODUÇÃO

As redes em malha sem fio (WMNs - *Wireless Mesh Networks*) têm sido cada vez mais utilizadas como solução para acesso sem fio a usuários de última milha ou como *backbone* de rede. Sendo assim, torna-se cada vez mais necessário aumentar a capacidade destas redes. Neste sentido, o roteamento e a atribuição de canais têm sido tema de diversas pesquisas. O uso do roteamento permite escolher caminhos, entre um par de roteadores origem e destino, que sofrem menor interferência. A atribuição de canais permite associar um canal específico a um enlace ou fluxo e desta forma eliminar ambas as interferências intra e inter-fluxo. Alguns trabalhos [18, 19] tratam da atribuição de canais como um tema isolado, outros trabalhos utilizam abordagens conjuntas que também envolvem roteamento como forma de gerenciar a atribuição de canais [1, 9].

Pesquisas recentes [4, 20, 10] mostram que a vazão das redes sem fio podem ser melhoradas ao utilizar canais de comunicação de diferentes larguras. Nesta situação, ao se utilizar canais de comunicação de menores larguras pode-se dividir a banda total de frequência em uma quantidade maior de canais não sobrepostos de maior ca-

pacidade conjunta, com maior alcance de comunicação e maior alcance de interferência. Em contrapartida, utilizar canais de maior largura permite aumentar a capacidade de um enlace individual e diminuir a distância de interferência.

No presente trabalho consideramos WMNs com múltiplos canais de diferentes larguras e roteadores equipados com múltiplos rádios de comunicação. Nosso estudo examina cenários de WMNs, tais como as do tipo TDMA (*Time Division Multiple Access*), onde há a atribuição de canais livre de conflito o que evita a interferência entre enlaces. No artigo estendemos uma formulação de Programação Linear (*Linear Programming-LP*) e consideramos roteamento multi-caminho, atribuição e escolha conjunta de largura de canais. O modelo estendido tem como base nossos trabalhos anteriores [2, 3] e que considera a existência de canais com diferentes larguras (ex: 5, 10 e 20MHz) e com diferentes alcances de transmissão/interferência. O modelo LP pode ser utilizado para determinar a capacidade das WMNs com as características comentadas.

Para abordar o tema em estudo, o artigo é organizado conforme a seguir: A Seção 2 lista trabalhos relacionados com atribuição de canais, roteamento e adaptação de largura de canal; a Seção 3 apresenta, respectivamente, os modelos de capacidade dos enlaces, alcances de transmissão, modelo de matrizes e modelo LP utilizados para simular as redes estudadas; a Seção 4 mostra os cenários de redes simulados e os resultados obtidos. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões e relaciona trabalhos futuros.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Em [18, 19, 16, 17] elaboram-se modelos LP para atribuir canais com o objetivo de determinar a capacidade de WMNs com múltiplos canais. No entanto, estes trabalhos elaboram modelos LP que tratam da atribuição de canais como um tema isolado e, portanto, não abordam o uso de roteamento em conjunto.

Os autores em [8] propõem um algoritmo distribuído para realizar a atribuição de canais em cenários de Redes de Rádios Cognitivos (*Cognitive Radio Networks-CRNs*). O trabalho tem como objetivo reduzir as interferências com os Usuário Primários (*Primary Users-PRs*) da rede. Assim como nos trabalhos anteriores, não é tratado o roteamento em conjunto com a atribuição de canais.

Em [14] é elaborado um modelo LP que envolve ambos o roteamento e a atribuição de canais em WMNs. Em [13] desenvolve-se um modelo não linear inteiro e, em seguida, são aplicadas técnicas de linearização para realizar a atribuição de canais e determinar a capacidade da rede. Os mesmos autores em [12] utilizam uma abordagem al-

gorítmica para tratar do problema. Nestes trabalhos, os autores consideram apenas a existência de canais ortogonais todos de mesma largura.

Em [4] realizam-se experimentos e identificam-se as vantagens de estreitar a largura do canal em redes locais IEEE 802.11 [7]. No trabalho é desenvolvido um mecanismo dinâmico de adaptação da largura de canal para melhorar o desempenho de uma rede local e, portanto, não é empregada a possibilidade de alteração da largura de canal em cenários de WMNs.

A pesquisa desenvolvida em [10] elabora um modelo e uma heurística de roteamento que envolvem programação linear em cenários de WMNs. Este trabalho, utiliza a possibilidade de dividir a banda total de frequências em diversos canais de diferentes larguras. No entanto, e assim como em [20], o trabalho desconsidera que os canais ao utilizarem diferentes larguras possuem diferentes alcances de transmissão. Além disto, em [10] é elaborado um modelo de interferência entre enlaces que não considera a existência das cliques de interferência (*Interference Cliques-ICs* [21]) e, que assim, pode gerar valores sub-ótimos de capacidade.

Em nossas propostas anteriores [2, 3] propomos métrica de roteamento e a possibilidade de alterar a largura de canal com o objetivo de aumentar a vazão das WMNs. Na proposta atual, aplicamos abordagem baseada em LP para determinar a capacidade das redes com as mesmas características.

Em relação aos trabalhos de [18, 19, 16, 17, 14, 13], estes não consideram a possibilidade de alteração de largura de canal em seus modelos LP. Em comparação ao trabalho de [10] nosso modelo LP considera em suas restrições, alcances de transmissão e capacidades dos enlaces dependentes da largura de canal utilizada. Além disto, tomamos como base a proposta de [18, 19] para modelar os ICs através da atribuição de canais livre de conflito, considerando a interferência par a par entre os enlaces da rede, conforme representado na Equação (13) da Seção 3.4.

Considerando os dois parágrafos anteriores e com base em [10, 19] nossa contribuição é estender o modelo LP de fluxo máximo para determinar a capacidade de WMNs IEEE 802.11 através do roteamento, atribuição e adaptação conjunta de largura de canais.

3. MODELAGEM DO SISTEMA

Nas Subseções a seguir apresentamos a modelagem utilizada para simular WMNs no trabalho. A Subseção 3.1 apresenta os cálculos utilizados para representar os tempos de transmissão e capacidade dos enlaces ao empregarem múltiplas larguras de canal e diferentes modulações. A Subseção 3.2 apresenta os cálculos de sensibi-

lidade mínima utilizados para determinar os alcances de comunicação entre roteadores e o alcance de interferência entre os enlaces da rede. Na Subseção 3.3 apresentamos o modelo de matrizes, utilizados para representar a existência de enlaces, as suas capacidades e as interferências existentes. Por fim, na Subseção 3.4 explicam-se as equações do modelo LP utilizado para determinar a capacidade da rede.

3.1. CAPACIDADE DOS ENLACES EM REDES 802.11 MULTI-TAXA E MULTI-LARGURA DE CANAL

A modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) do 802.11 permite a utilização das larguras de canal de 5, 10 e 20MHz [7]. A seguir são apresentados os cálculos dos tempos de transmissão e capacidade dos enlaces na camada de Controle de Acesso ao Meio (*Medium Access Control-MAC*), ao serem empregados canais com diferentes larguras. As equações a seguir (Equações (1) e (2) [4]) foram utilizadas para determinar os valores das matrizes Cap e T e que serão apresentadas na Subseção 3.3.

Na Equação (1), a variável Cap ($bits/s$) é a capacidade obtida na camada MAC do IEEE 802.11 ao utilizar a largura de canal w_{ϖ} e o modo de transmissão m_n . Sendo que m_n representa uma combinação entre modulação e taxa de codificação de canal, conforme mostrado na Tabela 2 [7]. Na mesma equação, L_{data} é o tamanho do pacote de dados em bytes.

$$Cap^{w_{\varpi}, m_n} = (8 \cdot L_{data})/T \quad (1)$$

$$T = CW + DIFS + T_{data} + SIFS + T_{ack} \quad (2)$$

$$T_{\alpha} = T_{pr} + T_{si} + T_{sym} \cdot \text{ceil}\left(\frac{L_{ser} + L_{tail} + 8L_{\alpha}}{N_{DBPS}}\right) + T_{SE} \quad (3)$$

Na Equação (2), $CW = [0, 31] * t_{slot}$ é a janela de contenção. Neste artigo, e assim como em [4], foi utilizado o valor médio da janela de contenção, o qual possui o valor $16 \times t_{slot}$. As variáveis $t_{slot} = 20\mu s$, $DIFS = 50\mu s$ e $SIFS = 10\mu s$ assumem valores conhecidos no 802.11[7]. As variáveis T_{data} e T_{ack} representam, respectivamente, os tempos de transmissão dos quadros de dados da camada MAC e quadro de reconhecimento (*acknowledgment-ACK*) ambos chamados de T_{α} na Equação (3). Nos cálculos deste artigo foi utilizado o mesmo valor de taxa de transmissão para ambos os quadros de dados da camada MAC e quadro de ACK.

Na Equação (3) e Tabela 1 [7], T_{pr} , T_{si} and T_{sym} representam, respectivamente, os tempos de transmissão do

preâmbulo de sincronização, o tempo de transmissão do campo sinal que possui a função de indicar para a camada física qual o modo de transmissão utilizado e o tempo de duração do símbolo OFDM. As variáveis L_{SER} ($16 bits$) e L_{tail} ($6 bits$) representam o tamanho do campo serviço (reservado para aplicações futuras) e o campo *tail* marca o fim de um quadro OFDM. A variável L_{α} assume o valor L_{MAC} ($34 bytes$) mais L_{data} ($bytes$) que correspondem ao cabeçalho MAC mais o campo de dados ou assume o valor L_{ACK} ($14bytes$) de um quadro de ACK.

Tabela 1. Tempos da camada física OFDM para as larguras de canal de 5, 10 e 20MHz [7]

Parâmetro	20MHz	10MHz	5MHz
T_{pr}	16 μs	32 μs	64 μs
T_{si}	4 μs	8 μs	16 μs
T_{sym}	4 μs	8 μs	16 μs

A variável N_{DBPS} (coluna 4 da Tabela 2) representa o número de bits de informação transmitidos em um símbolo OFDM e seus valores dependem do modo de transmissão empregado [7].

Tabela 2. Modos de transmissão da camada física OFDM 802.11

Modo	Modulação	Taxa de Codificação	N_{DBPS}
m_1	BPSK	1/2	24
m_2	BPSK	3/4	36
m_3	QPSK	1/2	48
m_4	QPSK	3/4	72
m_5	16-QAM	1/2	96
m_6	16-QAM	3/4	144
m_7	64-QAM	2/3	192
m_8	64-QAM	3/4	216

3.2. ALCANCES DOS SINAIS TRANSMITIDOS COM DIFERENTES LARGURAS DE CANAL

A mudança de largura de canal causa variações na sensibilidade mínima do receptor para cada um dos modos de transmissão da camada física OFDM do IEEE802.11. Os cálculos desta subseção foram utilizados para determinar o valor, em metros (Equação 7), do alcance de transmissão e interferência dos roteadores da rede. Estes valores de alcance foram utilizados para determinar a existência de enlaces de comunicação e a existência de interferência entre enlaces, representados respectivamente pelas matrizes E e IN da Subseção 3.3.

Conforme a Equação (4) [15], $S_{min}(W)$ representa a mínima sensibilidade de um receptor, $SNR_{min}(W)$ é

a mínima razão sinal-ruído requerida para a recepção do sinal para um dado modo de transmissão/recepção, K é a constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$), T_0 (290K) representa a temperatura absoluta, a variável B (Hz) representa a largura do canal de comunicação, NF (W) é a figura de ruído que expressa o valor de deterioração do sinal causada pelo circuito do receptor. Sendo assim, ao utilizar a Equação (5), podemos estimar a redução no valor de sensibilidade mínima do receptor, obtido ao reduzir a largura de canal do valor $B2$ para o valor $B1$. Exemplificando, se $B1 = 10\text{MHz}$ e $B2 = 20\text{MHz}$, para um dado modo de transmissão (e.g m_1) e seu respectivo valor de SNR_{min} , a relação assume o valor $R \cong -3\text{dB}$. Sendo assim, a cada vez que dividimos a largura de canal por dois, reduzimos em 3 dB o valor da sensibilidade mínima para o mesmo modo de transmissão.

$$S_{min} = SNR_{min} \cdot K \cdot T_0 \cdot B \cdot NF \quad (4)$$

$$R = 10 \cdot \log_{10}(S_{min}^{B1}/S_{min}^{B2}) \quad (5)$$

A partir desta redução de 3 dB no valor de sensibilidade mínima para um certo modo de transmissão, pode-se montar a Tabela 3 também encontrada em [7].

Tabela 3. Valores de Sensibilidade Mínima para Larguras de Canal de 5, 10 e 20MHz

Modo	Larguras de Canal		
	20MHz	10MHz	5MHz
m_1	-82	-85	-88
m_2	-81	-84	-87
m_3	-79	-82	-85
m_4	-77	-80	-83
m_5	-74	-77	-80
m_6	-70	-73	-76
m_7	-66	-69	-72
m_8	-65	-68	-71

$$PL = P_T - P_R = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi f d_0}{c}\right) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (6)$$

$$d = 10^{\frac{P_T - P_R - 20 \cdot \log_{10}(4 \cdot \pi \cdot f \cdot d_0 / c)}{10 \cdot n}} \quad (7)$$

Os valores da Tabela 3 aplicados a formula de perda de propagação log-distância, foram utilizadas no modelo do sistema deste artigo para determinar a máxima distância d de separação entre um roteador fonte e um destino. De

acordo com a Equação (6) em [6], pode-se derivar a Equação (7), onde P_T é a potência de transmissão (utilizamos o valor 17 dBm) e P_R é a potência de recepção (aplicamos os valores de sensibilidade mínima da Tabela 3). A subtração $P_T - P_R$ representa a perda de propagação do sinal no meio. A variável f denota a frequência do sinal (utilizamos o valor 2.4GHz), d_0 é a distância de referência (aplicado o valor 1m), c é a velocidade da luz no vácuo ($\cong 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$), n é o expoente de perda de propagação (utilizamos o valor 2.5). Ao aplicar a Equação (7), podemos estimar o aumento proporcional no alcance de transmissão que é obtido ao empregar larguras de canal de valores menores. Nós chamamos $d^{w_1, m_n} / d^{w_2, m_n}$ a razão entre os alcances de transmissão obtidos ao utilizar as larguras de canal w_1 e w_2 , ambos utilizando a mesma modulação m_n . Neste caso, se fizermos $w_1 = 10\text{MHz}$, $w_2 = 20\text{MHz}$ e $m_n = 1$ (Tabela 3), verificamos um alcance de transmissão em torno de 1.32 vezes maior para os canais de 10MHz. Os mesmos cálculos anteriores com $w_2 = 5\text{MHz}$ geram um alcance de transmissão de aproximadamente 1.74 vezes maior para o canais de largura 5MHz. Com estes resultados, percebe-se que ao utilizar larguras de canal menores é possível reduzir o número de saltos para um comunicação fim-a-fim, em contra partida, aumenta-se o alcance de interferência entre os enlaces das rotas existentes.

3.3. MODELO DE MATRIZES DO SISTEMA

Tal como em [2, 3], modelamos uma rede sem fio estática através de um grafo $G(V, E)$ formado por um conjunto de vértices (roteadores sem fio) $V = \{v_i\}_{1 \times |V|}$ e um conjunto de arestas (enlaces) $E = \{e_{i,j,c}\}_{|V| \times |V| \times |C|}$. As arestas podem ser estabelecidas em um conjunto de canais C . Existe um conjunto de demandas $F = \{f_k\}_{k \times |K|}$ cada uma, originada em um vértice v_o e com destino a um vértice v_d .

Assume-se uma banda total de frequência (B_{TOT}) dividida em um conjunto de canais ortogonais de largura w_ϖ ($\varpi = 1, \dots, |W|$, onde W é o conjunto de larguras de canal disponíveis). Para cada largura de canal w_ϖ , pode-se dividir a banda total disponível em B_{TOT}/w_ϖ canais ortogonais de igual largura, e que formam o conjunto $C^{w_\varpi} = \{c_d^{w_\varpi}\}_{1 \times |C^{w_\varpi}|}$. Neste caso, a quantidade total de canais disponíveis em todas as larguras de canal existentes é dado por $C = \bigcup_{\varpi=1}^{|W|} C^{w_\varpi}$, sendo que canais de diferentes larguras w_ϖ podem ser parcialmente sobrepostos um ao outro.

Para exemplificar o modelo, para uma banda total de frequência B_{TOT} de valor 40 MHz e larguras de canal $W = \{w_1, w_2\}$ de 10 e 20 MHz. Para os canais de 20 MHz, tem-se dois canais não sobrepostos que formam o conjunto $C^{w_1} = \{c_1^{w_1}, c_2^{w_1}\}$. A mesma banda total de frequência é dividida em quatro canais não sobrepostos de 10 MHz que compõe o conjunto $C^{w_2} = \{c_1^{w_2}, \dots, c_4^{w_2}\}$.

Nota-se que o canal $c_1^{w_1}$ de largura 20 MHz é sobreposto aos canais $c_1^{w_2}$ e $c_2^{w_2}$ de largura 10 MHz.

A seguir relacionamos as demais notações utilizadas neste artigo:

- **Matriz de Enlaces:** $E = \{e_{i,j,c_d^{w_\varpi}}\}_{|V|\times|V|\times|C|}$, $\forall e_{i,j,c_d^{w_\varpi}} \in \{0, 1\}$. O valor 1 representa que dois vértices i e j estão no alcance de transmissão um do outro no canal c_d de largura w_ϖ . Um elemento $e_{i,j,c_d^{w_\varpi}}$ assume o valor 1, caso a distância entre os vértices i e j ($d_{i,j}$), seja menor ou igual a um valor de distância determinado a partir da Equação (7). Para determinar este valor de distância, atribuímos o valor 17 dBm para P_T . Para a variável P_R utilizamos o valor de sensibilidade mínima do modo de transmissão de maior alcance (*ex* : $m_1 = -88$ dBm para a largura de 5MHz) para a largura de canal w_ϖ em questão.
- **Matriz de Atribuição de Canais:**
 $A = \{a_{i,j,c_d^{w_\varpi}}\}_{|V|\times|V|\times|C|}$, $\forall e_{i,j,c_d^{w_\varpi}} \in \{0, 1\}$. Se $a_{i,j,c_d^{w_\varpi}} = 1$, o canal $c_d^{w_\varpi}$ foi atribuído para a comunicação entre os vértices i e j .
- **Matriz de Tempos de Transmissão:**
 $T = \{t_{i,j,c_d^{w_\varpi}}\}_{|V|\times|V|\times|C|}$, $\forall e_{i,j,c_d^{w_\varpi}} \in \mathbb{R}$, representa o tempo de transmissão de um pacote de dados e respectiva recepção do pacote de reconhecimento (ACK) no canal $c_d^{w_\varpi}$. Os valores dos elementos desta matriz são calculados a partir da Equação (2).
- **Matriz de Capacidades:**
 $CAP = \{Cap_{i,j,c_d^{w_\varpi}}\}_{|V|\times|V|\times|C|}$, $\forall e_{i,j,c_d^{w_\varpi}} \in \mathbb{R}$, representa a capacidade do enlace, em *Mbits/s*, e é dada pela Equação (1).
- **Matriz de Interferências:** $IN = \{in_{i,j,c_d^{w_\varpi},u,v,c_g^{w_\gamma}}\}_{|E|\times|E|\times|C|}$, $\in \{0, 1\}$. Esta matriz representa a existência de interferência entre enlaces. O valor 1 indica que os enlaces $e_{i,j}$ e $e_{u,v}$, não podem ser atribuídos simultaneamente aos canais $c_d^{w_\varpi}$ e $c_g^{w_\gamma}$, uma vez que os vértices $(i \wedge u) \vee (i \wedge v) \vee (j \wedge u) \vee (j \wedge v)$ estão no alcance de interferência nos canais comentados. Considerou-se que a distância de interferência entre vértices é calculada da mesma forma que a distância de comunicação, utilizada para dar valores para a Matriz de Enlaces (considerado que a distância de comunicação é igual a distância de interferência).

O modelo de matrizes anterior foi codificado em um programa escrito em linguagem Matlab [11] e que foi utilizado para simular WMNs, onde os roteadores são capazes de alterar dinamicamente a largura do canal de comunicação. A partir da execução do programa matlab gerou-se como saída um conjunto de dados que serve como

entrada para o modelo LP apresentado na Subseção 3.4. Este conjunto de dados continha, por exemplo, informações sobre o número de roteadores da rede, a quantidade de interfaces de rádio de cada roteador, a capacidade de cada enlace e cada restrição de interferência representada pela matriz IN da Subseção 3.3.

3.4. MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR (*Linear Programming-LP*)

Nesta seção descreveremos nossa extensão do modelo LP de fluxo máximo para o roteamento, atribuição e adaptação conjunta de largura de canais em WMNs. Na Equação (8) temos a função objetivo, onde queremos maximizar a soma dos valores das demandas de 1 até $|K|$. As restrições de (9) até (11) representam a lei de conservação de fluxo, onde a variável $x_{i,j,c_d^{w_\varpi},f_k}$ significa o valor de fluxo escoado entre os vértices i e j no canal c_d de largura w_ϖ para a demanda f_k . A primeira restrição representa o valor da demanda f_k em um vértice intermediário na rota entre o par origem v_o e destino v_d . As restrições (10) e (11), representam, respectivamente, os valores das demandas originadas e terminadas em vértices que são fonte $v_i = v_o$ e destino $v_i = v_d$. A restrição (12) representa o valor de fluxo $x_{i,j,c_d^{w_\varpi},f_k}$ escoado entre os vértices i e j , caso o canal $c_d^{w_\varpi}$ seja atribuído ao enlace $e_{i,j}$, através do valor 1 da variável $a_{i,j,c_d^{w_\varpi}}$. A restrição (13) significa que somente um dos enlaces $e_{i,j}$ ou $e_{u,v}$ pode ser atribuído, respectivamente, aos canais $c_d^{w_\varpi}$ ou $c_g^{w_\gamma}$, uma vez que existe interferência (representada pela Matriz de Interferências da Subseção 3.3) entre estes enlaces nos canais comentados. A restrição (14) representa que a quantidade de enlaces atribuídos a um vértice v_i , não pode ultrapassar o seu número total de rádios de comunicação $q(R)$. Ambas as restrições (15) e (16) representam o limite inferior dos valores de fluxos nos enlaces. A restrição (17) representa a capacidade dos enlaces. A restrição (18) representa o limite inferior dos valores de demanda e, por fim, a restrição (19) representa os possíveis valores da variável $a_{i,j,c_d^{w_\varpi}}$ de atribuição de canais.

$$Max : \sum_{k=1}^{|K|} f_k \quad (8)$$

Subject to:

$$\sum_{\varpi=1}^{|W|} \sum_{d=1}^{|C^{W_\varpi}|} x_{j,i,c_d^{w_\varpi},f_k} - \sum_{\varpi=1}^{|W|} \sum_{d=1}^{|C^{W_\varpi}|} x_{i,j,c_d^{w_\varpi},f_k} = 0, \forall v_i \neq \{v_o, v_d\}, \forall f_k \quad (9)$$

$$\sum_{\varpi=1}^{|W|} \sum_{d=1}^{|C^{W_\varpi}|} x_{j,i,c_d^{w_\varpi},f_k} - \sum_{\varpi=1}^{|W|} \sum_{d=1}^{|C^{W_\varpi}|} x_{i,j,c_d^{w_\varpi},f_k} = -f_k, \forall v_i = v_o, \forall f_k \quad (10)$$

$$\sum_{\varpi=1}^{|W|} \sum_{d=1}^{|C^{W\varpi}|} x_{j,i,c_d^{w\varpi},f_k} - \sum_{\varpi=1}^{|W|} \sum_{d=1}^{|C^{W\varpi}|} x_{i,j,c_d^{w\varpi},f_k} = f_k, \forall v_i = v_d, \forall f_k \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^{|K|} x_{i,j,c_d^{w\varpi},f_k} = Cap_{i,j,c_d^{w\varpi}} \cdot a_{i,j,c_d^{w\varpi}}, \forall c_d^{w\varpi} \in C, \forall e_{i,j,c_d^{w\varpi}} = 1 \quad (12)$$

$$a_{i,j,c_d^{w\varpi}} + a_{u,v,c_g^{w\gamma}} \leq 1, \forall in_{i,j,c_d^{w\varpi},u,v,c_g^{w\gamma}} = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{\varpi=1}^{|W|} \sum_{d=1}^{|C^{W\varpi}|} a_{i,j,c_d^{w\varpi}} + a_{j,i,c_d^{w\varpi}} \leq q(R), \forall v_i \quad (14)$$

$$x_{i,j,c_d^{w\varpi},f_k} \geq 0, \forall c_d^{w\varpi} \in C, \forall e_{i,j,c_d^{w\varpi}} = 1 \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^{|K|} x_{i,j,c_d^{w\varpi},f_k} \geq 0, \forall c_d^{w\varpi} \in C, \forall e_{i,j,c_d^{w\varpi}} = 1 \quad (16)$$

$$x_{i,j,c_d^{w\varpi},f_k} \leq Cap_{i,j,c_d^{w\varpi}}, \forall c_d^{w\varpi} \in C, \forall e_{i,j,c_d^{w\varpi}} = 1 \quad (17)$$

$$f_k \geq 0, \forall f_k \quad (18)$$

$$a_{i,j,c_d^{w\varpi}} \in \{0,1\} \quad (19)$$

O modelo LP anterior foi escrito em linguagem GNU-*MathProg* e aplicado ao programa de resolução de modelos lineares *glsol*, ambos parte do GNU *Linear Programming Kit* [5]. A partir da execução do modelo obtivemos os resultados de capacidade apresentados na Seção 4.

4. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta seção obtemos os valores de capacidade da rede utilizando cenários de avaliação onde existem somente canais 5, 10 ou 20MHz, ou quando estas três larguras de canal são utilizadas em conjunto. Para isto aplicamos o modelo LP da Seção 3.4.

Como primeiro cenário utilizamos uma área de 450 x 450 metros com 16 roteadores pseudo-aleatoriamente espalhados. O posicionamento dos roteadores utiliza números aleatórios uniformemente distribuídos, porém, utiliza-se um conjunto de valores de posicionamento dos vértices, somente se não existem vértices com grau maior que 4 ao tomar como referência o alcance da largura de canal de 20MHz (largura de canal de menor alcance). Utilizamos índice de perda de propagação no meio com valor 2.85 o que resulta, respectivamente, em alcances de transmissão de $\cong 117$, $\cong 149$ e $\cong 190$ m para as larguras de canal de 20, 10 e 5MHz. Estes valores de alcance significam que temos rotas de até 5, 4 e 3 saltos nas larguras de

canal comentadas. Avaliamos o desempenho do modelo LP em cenários onde foram variados os valores da quantidade máxima de rádios de comunicação dos roteadores (variável $q(R)$) e a quantidade de pares de roteadores origem/destino $|K|$. Para cada configuração de $q(R)$ e $|K|$ foram realizadas 30 execuções do modelo LP com intervalo de confiança 95%. Os resultados são apresentados a seguir:

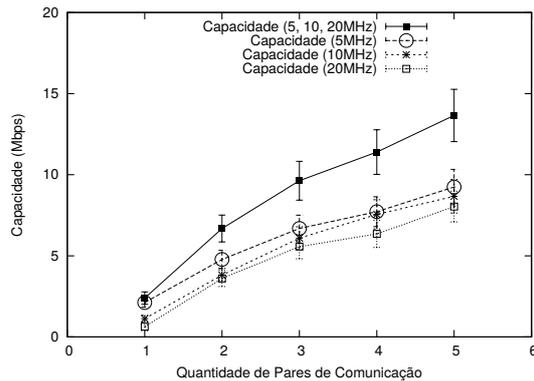


Figura 1. Capacidade com $f_k = 1, \dots, 5$, $B_{TOT} = 40$ MHz e $q(R) = 2$, área de $450\text{m} \times 450\text{m}$ e 16 roteadores

Conforme observado na Figura 1 obtêm-se maiores valores de capacidade ao se utilizar a formulação LP que emprega todas as larguras de canal.

Para a Figura 2 utilizamos os mesmos parâmetros empregados anteriormente, exceto que aumentamos de 2 para 4 o número de rádios de comunicação disponíveis por roteador. Conforme observado, obtivemos maiores valores de capacidade para todas as configurações quando comparado com os resultados obtidos para a Figura 1. A maior quantidade de rádios de comunicação dos roteadores permite estabelecer uma maior quantidade de enlaces de menor largura de canal e, que somados resultam em uma maior capacidade.

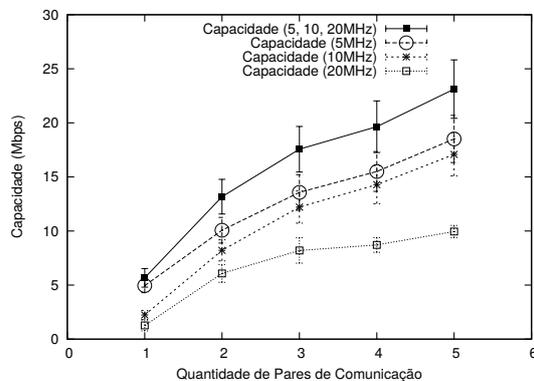


Figura 2. Capacidade com $f_k = 1, \dots, 5$, $B_{TOT} = 40$ MHz e $q(R) = 4$, área de $450\text{m} \times 450\text{m}$ e 16 roteadores

Tabela 4. Exemplo de enlaces ocupados ao utilizar o modelo LP e canais com largura de 5 MHz

Largura de Canal	5MHz
Demanda f_1	-
Demanda f_2	(3,4,16,20,2.6)
	(3,4,31,35,2.6)
	(3,13,26,30,2.8),(13,4,1,5,3.8)
	(3,13,36,40,4.8),(13,4,6,10,3.8)
Demanda f_3	-
Demanda f_4	(7,8,11,15,4.8)
	(7,8,26,30,4.8)
	(7,8,31,35,4.8)
	(7,8,36,40,4.8)

Em um segundo cenário utilizamos uma área de 650 x 650 metros com 25 roteadores pseudo-aleatoriamente espalhados e equipados com 4 rádios de comunicação cada. De acordo com o observado na Figura 3, obtêm-se maiores valores de capacidade ao utilizar o modelo LP onde são utilizadas as larguras de 5, 10 e 20MHz. Observa-se, também, menores valores de capacidade para todas as quantidades de pares de comunicação quando comparado ao resultado obtido na Figura 2 que emprega os mesmos parâmetros. Isto ocorre devido a menor densidade de roteadores existentes no cenário atual. Apesar desta característica, percebe-se que é mantida a conectividade da rede devido ao emprego das larguras de canal mais estreitas e de maior alcance de transmissão.

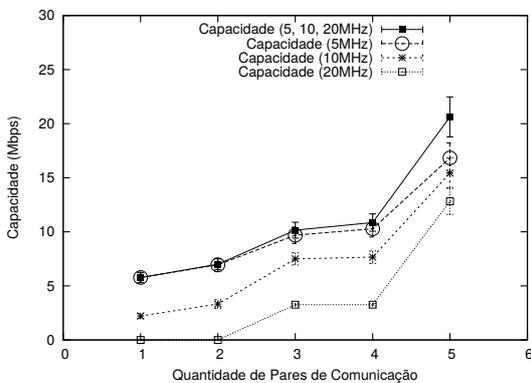


Figura 3. Capacidade com $f_k = 1, \dots, 5$, $B_{TOT} = 40\text{MHz}$, $q(R) = 4$, área de $650\text{m} \times 650\text{m}$ e 25 roteadores

Para exemplificar quais enlaces e canais, podem ser ocupados através do uso modelo LP, utilizamos o mesmo cenário de avaliação empregado para gerar os resultados da Figura 2. Neste cenário utilizou-se uma banda de 40 MHz, 4 interfaces por roteador, área de $450\text{m} \times 450\text{m}$ e 16 roteadores. Para apresentar os dados de enlaces e canais ocupados, fazemos uso das informações contidas nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 e Figura 4.

Na coluna 2 de cada uma das tabelas citadas, temos as possíveis configurações de larguras de canal emprega-

Tabela 5. Exemplo de enlaces ocupados ao utilizar o modelo LP e canais com largura de 10 MHz

Largura de Canal	10 MHz
Demanda f_1	-
Demanda f_2	(3,4,1,10,2.7)
	(3,4,11,20,2.7)
	(3,4,21,30,2.7)
	(3,4,31,40,2.7)
Demanda f_3	-
Demanda f_4	(7,8,1,10,6.9)
	(7,8,11,20,6.9)
	(7,8,21,30,6.9)
	(7,8,31,40,6.9)

Tabela 6. Exemplo de enlaces ocupados ao utilizar o modelo LP e canais com largura de 20 MHz

Largura de Canal	20MHz
demanda f_1	-
	(3,13,21,40,7.1),(13,4,1,20,7.1)
demanda f_2	-
demanda f_3	-
	(7,8,1,20,7.1)
demanda f_4	(7,8,21,40,7.1)

Tabela 7. Exemplo de enlaces ocupados ao utilizar o modelo LP ao utilizar e canais com largura de 5, 10 ou 20 MHz

Largura de Canal	5,10 e 20MHz
demanda f_1	-
demanda f_2	(3,4,16,20,2.6)
	(3,4,36,40,2.6)
	(3,13,11,15,4.8),(13,4,1,10,4.8)
	(3,13,31,35,4.8),(13,4,21,30,4.8)
demanda f_3	-
demanda f_4	(7,8,1,10,6.9)
	(7,8,11,20,6.9)
	(7,8,21,30,6.9)
	(7,8,31,40,6.9)

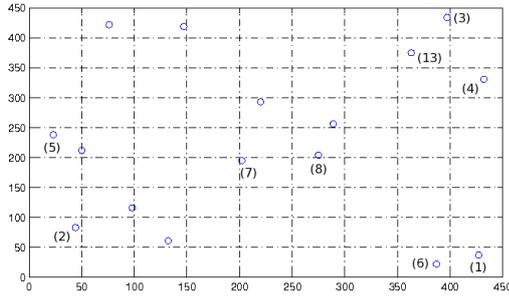


Figura 4. Posicionamento dos roteadores utilizado no exemplo de ocupação dos enlaces e canais

das. Na coluna 1 e linhas de 2 até 5 de cada tabela, temos o conjunto de demandas $F = \{f_k\}_{k \times |K|}$ a serem atendidas. Para as demandas numeradas de f_1 até f_4 , foram utilizados como par origem-destino, respectivamente, os vértices (1,2), (3,4), (5,6) e (7,8). Como conteúdo da tabela, são apresentados um conjunto de dados na forma de uma tupla $(i, j, freq1, freq2, cap)$, onde i, j são os roteadores do enlace, $freq1$ e $freq2$ são as frequências inicial e final (em MHz dadas em valores inteiros no intervalo de 1 a 40 MHz, que é o valor de banda utilizada) do canal utilizado no enlace e cap representa a capacidade (Mbits/s) escoada no enlace.

Utilizamos a linha 3 e coluna 2 da Tabela 4 como exemplo de leitura dos dados contidos nas tabelas 4 a 7. Neste caso, a demanda f_2 tem como origem o roteador 3 e como destino o roteador 4. Para esta demanda foram estabelecidas 4 rotas entre o par de roteadores origem/destino. A primeira rota, por exemplo, possui 01 salto e ocupa o canal com $freq1 = 16$ e $freq2 = 20$. A terceira rota, por exemplo, possui 02 saltos, sendo que o primeiro salto (enlace) é estabelecido entre os roteadores 3 e 13 no canal com $freq1 = 26$ e $freq2 = 30$ e o segundo salto é estabelecido entre os roteadores 13 e 4 no canal no canal com $freq1 = 1$ e $freq2 = 5$.

Optamos por apresentar as frequências inicial e final de cada canal, e não o seu índice (ex: c_1 para canal 1), para facilitar a visualização da concorrência entre os enlaces na ocupação dos canais.

Na Figura 4, temos os índices i dos roteadores utilizados nos enlaces os quais, também, aparecem nas tuplas das Tabelas de 4 a 7. Observa-se nestas tabelas que as demandas 1 e 3 não tiveram fluxos estabelecidos, uma vez que o modelo LP tem como objetivo maximizar a capacidade durante o período de um *slot* de tempo em uma rede do tipo TDMA, sem se preocupar com que todas as demandas sejam atendidas neste mesmo *slot*.

Observamos que para o fluxo 4, é obtido o mesmo valor de capacidade para os enlaces ao utilizar o modelo LP somente com canais de largura 10MHz (Tabela 5) e ao

empregar o modelo LP para selecionar entre as larguras de 5, 10 e 20 MHz (Tabela 7). Neste caso, a largura de canal de valor 10 MHz é a que proporciona o maior valor de capacidade agregada através dos 4 enlaces (cada roteador é equipado com 4 rádios) estabelecidos entre os roteadores 7 e 8. Para a largura de 20MHz (Tabela 6) são estabelecidos somente 2 enlaces embora existam 4 rádios de comunicação. Nesta caso, foi utilizado o total de banda disponível (40 MHz) somente com o estabelecimento de 2 enlaces entre os roteadores 7 e 8. Para a largura de 5 MHz (Tabela 4), apesar de terem sido estabelecidos um total de 4 enlaces, suas capacidades somadas possuem valor inferior a capacidade somada de 4 enlaces de 10 MHz.

Para o fluxo 2 e canais de 20 MHz (Tabela 6), observa-se que são utilizados 2 saltos para comunicação entre os roteadores 3 e 4. Isto ocorre, uma vez que ao utilizar o roteador 13 como intermediário da rota, emprega-se um modo de transmissão mais veloz quando comparado ao modo de transmissão que seria utilizado para uma comunicação direta entre os roteadores 3 e 4. Ainda para o fluxo 2 e canais de 5 MHz (Tabela 4), embora obtenha-se maior capacidade com o emprego do roteador 13 como intermediário, somente 2 enlaces utilizam este roteador devido a limitação de número de rádios de comunicação (menor ou igual a 4).

Observa-se na Tabela 7 que o modelo LP, ao selecionar entre todas as possíveis larguras de canal, escolhe enlaces que possuem as larguras de 5 e 10 MHz. Com o objetivo de aumentar a capacidade, o modelo LP utiliza o roteador 13 como intermediário da rota, até o limite de sua quantidade de rádios de comunicação.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentamos uma formulação LP para roteamento, atribuição e adaptação conjunta de largura de canais em WMNs com tecnologia IEEE 802.11. Conforme observado, a utilização da mudança dinâmica da largura do canal de comunicação pode aumentar a capacidade das redes estudadas. Neste sentido, é possível aproveitar o balanceamento entre o uso de canais de menor largura e que possuem maior alcance de transmissão e, também, utilizar os canais mais largos, os quais possuem menor alcance de transmissão e favorecem o reuso espacial de frequências. Como trabalhos futuros pretendemos propor algoritmos para tratar do problema de alocação de canais nos cenários estudados.

Referências

- [1] S. Avallone and I.F. Akyildiz. A channel assignment algorithm for multi-radio wireless mesh networks.

- In *Computer Communications and Networks, 2007. ICCCN 2007.*, pages 1034–1039, 2007.
- [2] Celso Barbosa Carvalho and José Ferreira de Rezende. Roteamento em redes em malha sem fio iee 802.11 com adaptação de largura de canal. In *XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC 2010)*, pages 161–174, 2010.
- [3] Celso Barbosa Carvalho and José Ferreira de Rezende. Routing in iee 802.11 wireless mesh networks with channel width adaptation. In *Med-Hoc-Net 2010 (Med-Hoc-Net'2010)*, 2010.
- [4] Ranveer Chandra, Ratul Mahajan, Thomas Moscibroda, Ramya Raghavendra, and Paramvir Bahl. A case for adapting channel width in wireless networks. In *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, pages 135–146, 2008.
- [5] GNU-glpk. Glpk (gnu linear programming kit). <http://www.gnu.org/software/glpk>, 2010.
- [6] Qizheng Gu. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, 2001.
- [7] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Standard 802.11, 2007.
- [8] Paulo R. Walenga Jr., Mauro Fonseca, Anelise Munaretto, Aline Carneiro Viana, and Artur Ziviani. Zap: Um algoritmo de atribuição distribuída de canais para mitigação de interferências em redes com rádio cognitivo. In *XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC 2010)*, 2010.
- [9] Bong-Jun Ko, V. Misra, J. Padhye, and D. Rubenstein. Distributed channel assignment in multi-radio 802.11 mesh networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*, pages 3978–3983, 2007.
- [10] Li Li and Chunyuan Zhang. Optimal channel width adaptation, logical topology design, and routing in wireless mesh networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009, 2009.
- [11] MATLAB. version 7.5 (r2007b), 2007.
- [12] A.H.M. Rad and V.W.S. Wong. Logical topology design and interface assignment for multi-channel wireless mesh networks. In *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE*, pages 1–6, 2006.
- [13] A.H.M. Rad and V.W.S. Wong. Joint channel allocation, interface assignment and mac design for multi-channel wireless mesh networks. In *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*, pages 1469–1477, 2007.
- [14] A.H.M. Rad and V.W.S. Wong. Joint logical topology design, interface assignment, channel allocation, and routing for multi-channel wireless mesh networks. *IEEE Wireless Communication*, 2007:4432–4440, 2007.
- [15] Theodore Rappaport. *RF Systems Design of Transceivers for Wireless Communications*. Springer, 2005.
- [16] Srikrishna Sridhar, Jun Guo, and Sanjay Jha. Channel assignment in multi-radio wireless mesh networks: a graph-theoretic approach. In *Proceedings of the First international conference on Communication Systems And NETWORKS*, pages 180–189, 2009.
- [17] Srikrishna Sridhar, Jun Guo, and Sanjay Jha. Static channel assignment in multi-radio multi-channel 802.11 wireless mesh networks: issues, metrics and algorithms. In *Proceedings of the 49th IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom)*, 2009.
- [18] Fei Ye, Qing Chen, and Zhisheng Niu. End-to-end throughput-aware channel assignment in multi-radio wireless mesh networks. In *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07. IEEE*, pages 1375–1379, 2007.
- [19] Fei Ye, Sumit Roy, and Zhisheng Niu. Flow oriented channel assignment for multi-radio wireless mesh networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010, 2010.
- [20] Yuan Yuan, Paramvir Bahl, Ranveer Chandra, Philip A. Chou, John Ian Ferrell, Thomas Moscibroda, Srihari Narlanka, and Yunnan Wu. Knows: Cognitive networking over white spaces. In *Proceedings of IEEE DySPAN 2007*, 2007.
- [21] Hongqiang Zhai and Yuguang Fang. Impact of routing metrics on path capacity in multirate and multiph wireless ad hoc networks. In *Proceedings of the Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Network Protocols*, pages 86–95. IEEE Computer Society, 2006.