

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

Celso Barbosa Carvalho<sup>1</sup> e José Ferreira de Rezende<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) – COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

{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.*

**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.*

## 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 [Ye et al. 2007, Ye et al. 2010] tratam da

---

\*Este trabalho recebeu recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ, FINEP, UFAM, FAPEAM, SECT/AM e RNP.

atribuição de canais como um tema isolado, outros trabalhos utilizam abordagens conjuntas que também envolvem roteamento como forma de gerenciar a atribuição de canais [Avallone and Akyildiz 2007, Ko et al. 2007].

Pesquisas recentes [Chandra et al. 2008, Yuan et al. 2007, Li and Zhang 2009] 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 capacidade 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 consideremos roteamento multi-caminho, atribuição e escolha conjunta de largura de canais. O modelo estendido tem como base nossos trabalhos anteriores [Carvalho and de Rezende 2010a, Carvalho and de Rezende 2010b] 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 [Ye et al. 2007, Ye et al. 2010, Sridhar et al. 2009, A. Das 2009] 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 [Jr. et al. 2010] 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 Usuários Primários (*Primary Users-PRs*) da rede. Assim como nos trabalhos anteriores, não é tratado o roteamento em conjunto com a atribuição de canais.

Em [Rad and Wong ] é elaborado um modelo LP que envolve ambos o roteamento e a atribuição de canais em WMNs. Em [Rad and Wong 2007] 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

[Rad and Wong 2006] utilizam uma abordagem algorítmica para tratar do problema. Nestes trabalhos, os autores consideram apenas a existência de canais ortogonais todos de mesma largura.

Em [Chandra et al. 2008] realizam-se experimentos e identificam-se as vantagens de estreitar a largura do canal em redes locais IEEE 802.11 [IEEE 2007]. 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 [Li and Zhang 2009] 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 [Yuan et al. 2007], o trabalho desconsidera que os canais ao utilizarem diferentes larguras possuem diferentes alcances de transmissão. Além disto, em [Li and Zhang 2009] é elaborado um modelo de interferência entre enlaces que não considera a existência dos Conjuntos Independentes (*Independent Sets-ISs*) e, que assim, pode gerar valores sub-ótimos de capacidade.

Em nossas propostas anteriores [Carvalho and de Rezende 2010a, Carvalho and de Rezende 2010b] 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 [Ye et al. 2007, Ye et al. 2010, Sridhar et al. 2009, A. Das 2009, Rad and Wong, Rad and Wong 2007], estes não consideram a possibilidade de alteração de largura de canal em seus modelos LP. Em comparação ao trabalho de [Li and Zhang 2009] 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 [Ye et al. 2007, Ye et al. 2010] para modelar os ISs 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 [Li and Zhang 2009, Ye et al. 2010] nossa contribuição é estender o modelo LP de fluxo máximo para determinar a capacidade de WMNs IEEE802.11 através do roteamento, atribuição e adaptação conjunta de largura de canais.

### 3. Modelo de Simulação

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 sensibilidade 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 [IEEE 2007]. 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) [Chandra et al. 2008]) 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  $w_{\varpi}$  e o modo de transmissão  $m_n$ <sup>1</sup>. 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),  $CW = [1, 31] * t_{slot}$  é a janela de contenção<sup>2</sup>. As variáveis  $t_{slot} = 20\mu s$ ,  $DIFS = 50\mu s$  e  $SIFS = 10\mu s$  assumem valores conhecidos no 802.11 [IEEE 2007]. As variáveis  $T_{data}$  e  $T_{ack}$  representam, respectivamente, os tempos de transmissão dos quadros de dados e quadro de reconhecimento (*acknowledgment-ACK*) ambos chamados de  $T_{\alpha}$  na Equação (3)<sup>3</sup>.

Na Equação (3) e Tabela 1 [IEEE 2007],  $T_{pr}$ ,  $T_{si}$  and  $T_{sym}$  representam, respectivamente, os tempos de transmissão do pré-amplio 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  $L_{\alpha}$  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  $L_{ACK}$  (14 *bytes*) de um quadro de ACK.

**Tabela 1. Tempos da camada física OFDM para as larguras de canal de 5, 10 e 20MHz [IEEE 2007].**

Parametro	20MHz	10MHz	5MHz
$T_{pr}$	16 $\mu s$	32 $\mu s$	64 $\mu s$
$T_{si}$	4 $\mu s$	8 $\mu s$	16 $\mu s$
$T_{sym}$	4 $\mu s$	8 $\mu s$	16 $\mu s$

<sup>1</sup>Combinação entre modulação e taxa de codificação de canal, conforme mostrado na Tabela 2 [IEEE 2007].

<sup>2</sup>Nos cálculos do trabalho, e assim como em [Chandra et al. 2008], utilizamos o valor médio da janela de contenção, o qual possui o valor  $16 * t_{slot}$ .

<sup>3</sup>Foi considerada a mesma taxa de transmissão para ambos os pacotes de dados e de ACK.

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 [IEEE 2007].

**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) [Gu 2005],  $S_{min}(W)$  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 ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  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  $B1 = 10$  MHz e  $B2 = 20$  MHz, para um dado modo de transmissão (e.g  $m_1$ ) e seu respectivo valor de  $SNR_{min}$ , a relação assume o valor  $R \cong -3$  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 [IEEE 2007].

**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 fórmula de perda de propagação log-distância, foram utilizadas no modelo de simulação deste artigo para determinar a máxima distância  $d$  de separação entre em roteador fonte e um destino. De acordo com a Equação (6) em [Rappaport 2001], 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 ( $\simeq 3 \cdot 10^8$  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  $w_1 = 10$  MHz,  $w_2 = 20$  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  $w_2 = 5$  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 uma 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 [Carvalho and de Rezende 2010a, Carvalho and de Rezende 2010b], 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  $w_\varpi$  ( $\varpi = 1, \dots, |W|$ , onde  $W$  é o conjunto de larguras de canal disponíveis). Para cada largura de canal  $w_\varpi$ , pode-se dividir a banda total disponível em  $B_{TOT}/w_\varpi$  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  $w_\varpi$  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:**  $E = \{e_{i,j,c_d^{w_\varpi}}\}_{|N| \times |N| \times |C|}$ ,  $\forall e_{i,j,c_d^{w_\varpi}} \in \{0, 1\}$ . O valor 1 representa que dois vértices  $i$  e  $j$  estão no alcance de transmissão um do outro no canal  $c_d$  de largura  $w_\varpi$ . 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  $w_\varpi$  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[MATLAB 2007] 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  $w_\varpi$  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  $a_{n,m,c_d^{w_\varpi}}$  de atribuição de canais.

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

Subject to:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

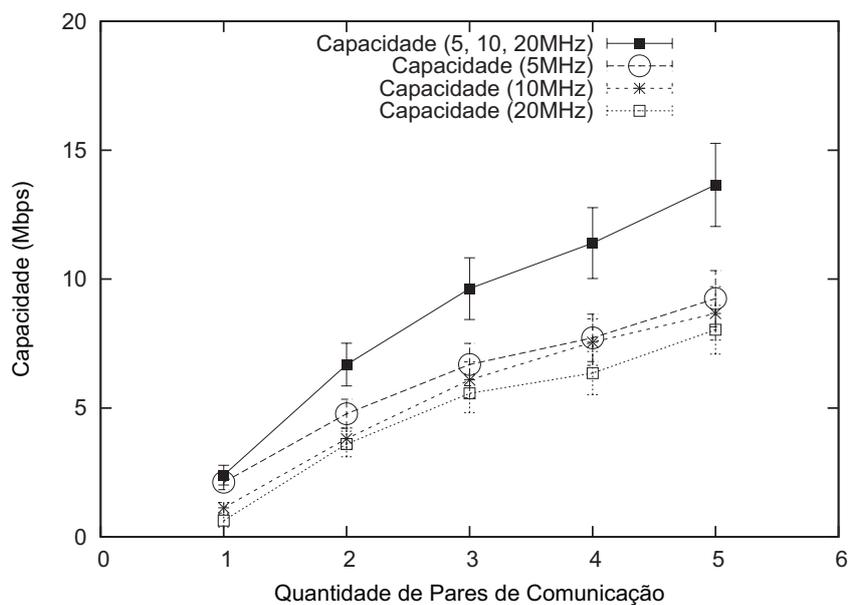
$$a_{i,j,c_d^{w\varpi}} \in \{0, 1\} \quad (19)$$

O modelo LP anterior foi escrito em linguagem GNU-*MathProg* e aplicado ao programa de resolução de modelos lineares *glpsol*, ambos parte do GNU *Linear Programming Kit* [GNU-glpk 2010]. A partir da execução do modelo obtivemos os resultados de capacidade apresentados na Seção 4.

#### 4. Simulações

Nesta seção geramos os valores de capacidade da rede utilizando cenários de simulação 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. Realizamos simulações 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 simulações com intervalo de confiança 95%. Os resultados das simulações são apresentados a seguir:



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

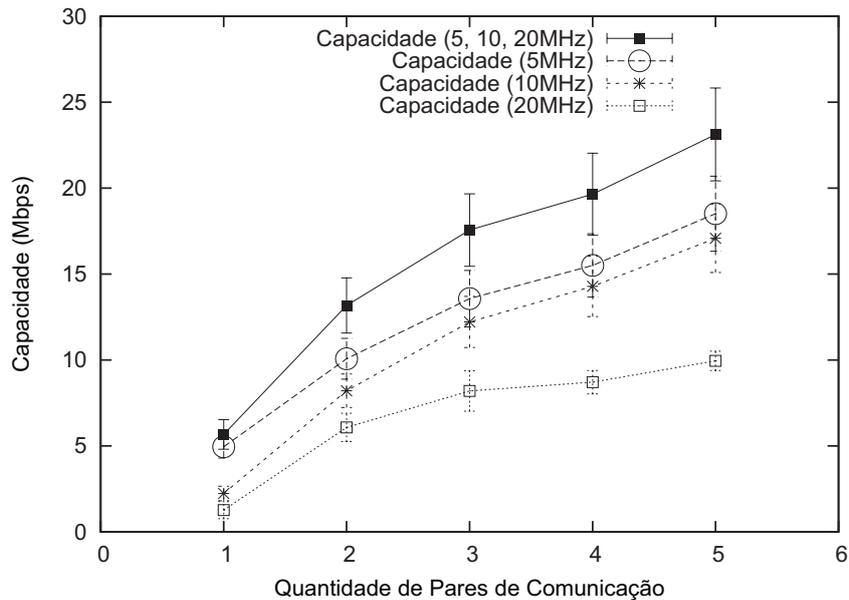
Conforme observado na Figura 1 obtêm-se maiores valores de capacidade ao se utilizar a formulação LP que emprega todas as larguras de canal.

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.

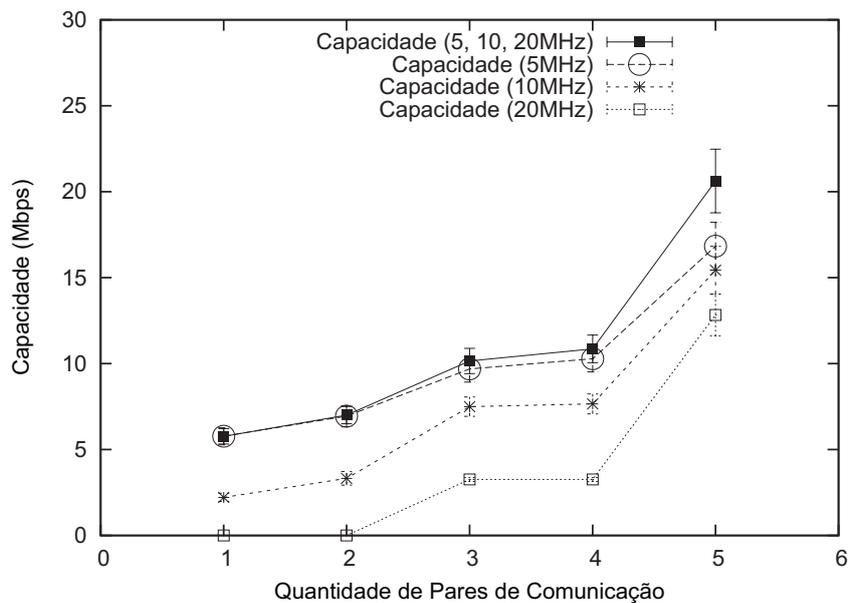
Em um segundo cenário utilizamos uma área de  $650 \times 650$  metros com 25 roteadores pseudo-aleatoriamente espalhados e equipados com 4 rádios de comunicação cada. De acordo com o observado na Figura 3, obtêm-se maiores valores de capacidade ao utilizar o modelo LP onde são utilizadas as larguras 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.

Para exemplificar quais enlaces, para cada uma das demandas, podem ser ocupados através do modelo LP, utilizamos o mesmo cenário de simulação empregado para gerar os resultados da Figura 2. Para apresentar os dados de enlaces ocupados, fazemos uso das informações contidas na Tabela 4 e Figura 4.

Nas colunas de 2 a 5 da Tabela 4, temos as possíveis configurações de larguras de canal empregadas nas simulações. Na coluna 1 e linhas de 2 até 4 da mesma tabela, temos o conjunto de demandas a serem atendidas. As demandas numeradas de 1 até 4 utilizam, respectivamente, os vértices (1,2), (3,4), (5,6) e (7,8) como origem e destino de cada rota.



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

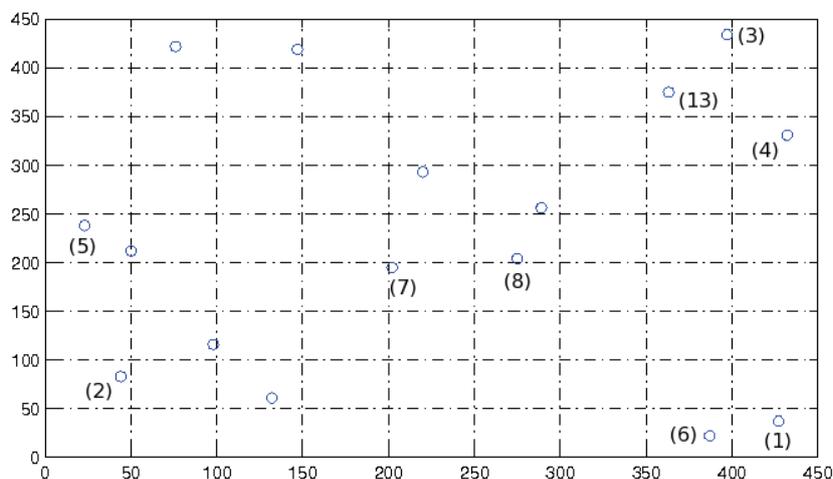


**Figura 3. Capacidade com  $f_k = 1, \dots, 5$ ,  $B_{TOT} = 40\text{MHz}$ ,  $q(R) = 4$ , área de  $650\text{m} \times 650\text{m}$  e 25 roteadores.**

Como conteúdo da tabela, são apresentados um conjunto de dados na forma de uma tupla  $(i, j, f1, f2, cap)$ , onde  $i, j$  são os roteadores do enlace,  $f1, f2$  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 simulada) do canal utilizado no enlace e  $cap$  representa a capacidade (Mbps) escoada no enlace. Optamos por apresentar as frequências inicial e final de cada canal, e não o seu índice (ex:  $c_1$  para canal 1), para facilitar as explicações. Na Figura 4, temos os índices dos roteadores utilizados nos enlaces e que, também, aparecem listados na Tabela 4. Observa-se na Tabela 4 que as demandas 1 e 3 não tiveram fluxos estabelecidos,

**Tabela 4. Exemplo de enlaces ocupados ao utilizar o modelo LP**

Largura de Canal	5MHz	10MHz	20MHz	5,10 e 20MHz
$f_1$	-	-	-	-
$f_2$	(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)	(3,4,1,10,2.7) (3,4,11,20,2.7) (3,4,21,30,2.7) (3,4,31,40,2.7)	(3,13,21,40,7.1),(13,4,1,20,7.1)	(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)
$f_3$	-	-	-	-
$f_4$	(7,8,11,15,4.8) (7,8,26,30,4.8) (7,8,31,35,4.8) (7,8,36,40,4.8)	(7,8,1,10,6.9) (7,8,11,20,6.9) (7,8,21,30,6.9) (7,8,31,40,6.9)	(7,8,1,20,7.1) (7,8,21,40,7.1)	(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 para uma das simulações com  $f_k = 4$ ,  $B_{TOT} = 40\text{MHz}$ ,  $q(R) = 4$ , área de  $450\text{m} \times 450\text{m}$  e 16 roteadores.**

uma vez que o modelo LP tem como objetivo maximizar a capacidade durante o período de um *slot* de tempo de uma rede do tipo TDMA, sem se preocupar 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 e ao empregar o modelo LP para selecionar entre as larguras de 5, 10 e 20 MHz. 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 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, 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, 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, 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 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

- A. Das, R. Vijayakumar, S. R. (2009). 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)*, Globecom'09.
- Avallone, S. and Akyildiz, I. (2007). A channel assignment algorithm for multi-radio wireless mesh networks. In *Computer Communications and Networks, 2007. ICCCN 2007. Proceedings of 16th International Conference on*, pages 1034–1039.
- Carvalho, C. B. and de Rezende, J. F. (2010a). Roteamento em redes em malha sem fio ieee 802.11 com adaptação de largura de canal. In *XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC 2010)*, pages 161–174.
- Carvalho, C. B. and de Rezende, J. F. (2010b). Routing in IEEE 802.11 wireless mesh networks with channel width adaptation. In *Med-Hoc-Net 2010 (Med-Hoc-Net'2010)*, Juan-les-Pins, France.
- Chandra, R., Mahajan, R., Moscibroda, T., Raghavendra, R., and Bahl, P. (2008). A case for adapting channel width in wireless networks. volume 38, pages 135–146, New York, NY, USA. ACM.
- GNU-glpk (2010). Glpk (gnu linear programming kit). <http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>.
- Gu, Q. (2005). *RF Systems Design of Transceivers for Wireless Communications*. Springer, New York.
- IEEE (2007). Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Standard 802.11.

- Jr., P. R. W., Fonseca, M., Munaretto, A., Viana, A. C., and Ziviani, A. (2010). 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)*.
- Ko, B.-J., Misra, V., Padhye, J., and Rubenstein, D. (2007). Distributed channel assignment in multi-radio 802.11 mesh networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE*, pages 3978–3983.
- Li, L. and Zhang, C. (2009). Optimal channel width adaptation, logical topology design, and routing in wireless mesh networks. volume 2009. Hindawi Corporation.
- MATLAB (2007). *version 7.5 (R2007b)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- Rad, A. and Wong, V. Joint logical topology design, interface assignment, channel allocation, and routing for multi-channel wireless mesh networks. *IEEE Wireless Communication, 2007:4432–4440*.
- Rad, A. and Wong, V. (2006). Logical topology design and interface assignment for multi-channel wireless mesh networks. In *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE*, pages 1–6.
- Rad, A. and Wong, V. (2007). 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.
- Rappaport, T. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Sridhar, S., Guo, J., and Jha, S. (2009). Channel assignment in multi-radio wireless mesh networks: a graph-theoretic approach. In *Proceedings of the First international conference on COMMunication Systems And NETWORKS, COMSNETS'09*, pages 180–189, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.
- Ye, F., Chen, Q., and Niu, Z. (2007). End-to-end throughput-aware channel assignment in multi-radio wireless mesh networks. In *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07. IEEE*, pages 1375–1379.
- Ye, F., Roy, S., and Niu, Z. (2010). Flow Oriented Channel Assignment for Multi-Radio Wireless Mesh Networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010.
- Yuan, Y., Bahl, P., Chandra, R., Chou, P. A., Ferrell, J. I., Moscibroda, T., Narlanka, S., and Wu, Y. (2007). Knows: Kognitiv networking over white spaces. In *Proceedings of IEEE DySPAN 2007*.