

MODELOS DE PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR APLICADOS EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO DA CAPACIDADE DE ENLACES EM REDES SEM FIO EM MALHA

Marlon da Silva

Universidade Federal de Lavras – UFLA
Lavras, MG
marlon.silva@dcc.ufla.br

Edson Luiz França Senne

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Guaratinguetá, SP
elfsenne@feg.unesp.br

Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
São José dos Campos, SP
vijay.nl@inpe.br

RESUMO

Redes sem fio em malha (WMNs) são alternativas econômicas para ampliar a área de cobertura de transmissão de dados em que a instalação não é trivial e há um crescente acréscimo da utilização de dispositivos móveis que a acessa. Desta forma, exige-se da rede uma alta capacidade de transmissão, de modo a atender de uma forma satisfatória a demanda, considerando as limitações físicas da rede. O objetivo deste trabalho é propor três modelos distintos de Programação Matemática: (i) maximização da soma da capacidade dos enlaces; (ii) maximização da capacidade mínima e (iii) maximização da soma das potências dos enlaces. Estes objetivos consideram o melhor aproveitamento das capacidades dos enlaces, levando-se em conta a rede como um todo e os enlaces de modo individual. Para obter soluções satisfatórias para cada modelo, será utilizado o algoritmo VNS.

PALAVRAS-CHAVE: Redes sem fio em malha, capacidade de transmissão de enlaces, Variable Neighborhood Search, Programação Não-Linear.

Área principal: TEL&SI - PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações

ABSTRACT

Wireless mesh networks (WMNs) are economic ways to grow the network coverage of data transmission where the installation is not trivial and exists an increased growing of the use of mobile devices that access it. A high transmission capacity is required for the network, in order to service satisfactorily the demand, considering the physical network constraints. The objective of this work is to propose three different Mathematical Programming models: (i) maximization of the sum of link capacities; (ii) maximization of the minimum link capacity and (iii) maximization of the sum of link powers. These objectives consider the best efficiency of the link capacities, taking into account the network as a whole and the links individually. To obtain satisfactory solutions for each model, VNS algorithm will be used.

KEYWORDS: Wireless Mesh Networks, Transmission Link Capacity, Variable Neighborhood Search, Non-Linear Programming.

Main area: TEL&SI - OR in Telecommunications and Information Systems

1. Introdução

O emprego de redes sem fio em malha (ou redes *mesh*) como alternativa para ampliar a área de cobertura de uma rede está cada vez maior, sobretudo em áreas cuja instalação de pontos de acesso (ou APs – *Access Points*) é mais complexa (Akyldiz *et al.*, 2005). Como se trata de uma alternativa econômica, indústrias, edifícios comerciais, *campi* universitários e outras instituições estão adotando redes sem fio em malha para integrar diferentes pontos de acesso a um custo de instalação e manutenção relativamente baixo em relação a outros tipos de tecnologia de rede sem fio.

Entretanto, para a instalação de redes sem fio em malha, é necessário que haja, primeiramente, um planejamento adequado, para evitar problemas que possam comprometer o desempenho da rede, com o conseqüente não atendimento de exigências das aplicações utilizadas pelos seus usuários (Silva *et al.*, 2012). Para isto, o planejamento de redes leva em conta medidas de desempenho que avaliam uma rede sem fio de modo quantitativo, como, por exemplo, a taxa de perda de pacotes ou o atraso médio.

A principal característica em uma rede sem fio em malha é o fato de somente alguns dispositivos, denominados *gateways*, estarem ligados diretamente a uma rede externa. Os demais dispositivos, denominados roteadores, recebem o sinal da rede a partir de um *gateway* ou a partir de outro roteador. Todos os dispositivos estão ligados por conexões virtuais conhecidas como enlaces ou *links*. A Figura 1 ilustra um exemplo de uma rede sem fio em malha, contendo os seus principais componentes. Para efeitos de ilustração, na figura, os gateways estão representados por dispositivos de cor preta, enquanto que os roteadores estão representados por dispositivos de cor cinza.

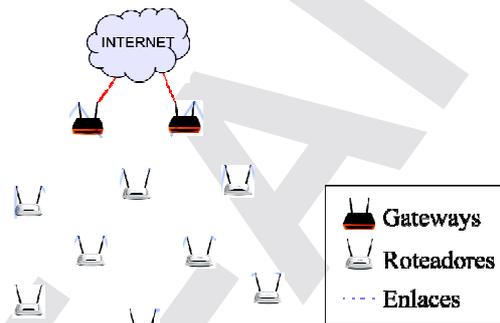


Figura 1 – Uma rede sem fio em malha e seus componentes

A rede sem fio em malha também deve ser capaz de prover um bom tráfego de dados. O tráfego se torna importante devido às aplicações, como multimídia e transmissões ao vivo, que requerem agilidade nesse tráfego. Para evitar imprevistos durante o funcionamento de tais aplicações, a utilização de modelos para o planejamento da infraestrutura de uma rede sem fio em malha.

Por se tratar de uma rede sem fio, um modelo de planejamento deve considerar as condições de sinal dos enlaces. Estas condições são importantes para determinar a qualidade de transmissão dos dados. Um sinal sem fio pode sofrer tanto interferências provocadas por dispositivos próximos quanto o ruído causado por elementos presentes no ambiente de transmissão, como o caso de edifícios, árvores, indivíduos e outros elementos da natureza.

Tanto a interferência quanto o ruído são importantes, pois, dependendo de como eles podem afetar interferências, os níveis de potência a serem consumidos devem ser regulados para que a transmissão de dados pelos enlaces seja assegurada. No entanto, a regulação de níveis de potência não é trivial. Níveis de potência muito baixos não asseguram sequer a transmissão de dados para outros dispositivos, enquanto que níveis muito altos podem provocar interferência em dispositivos vizinhos, além de causar possíveis problemas de saúde em indivíduos próximos a eles.

Os níveis de potência são determinantes para estimar a capacidade de transmissão que cada enlace é capaz de ter (neste artigo, será denominado apenas como *capacidade de enlace*).

Cada capacidade é determinada em função do nível de potência do enlace, das potências dos enlaces vizinhos e do ruído presente no ambiente. Portanto, é importante obter um conjunto de valores, denominada configuração física, para os níveis de potência que privilegiem o melhor aproveitamento possível das capacidades de enlace da rede.

No entanto, a configuração física deve obedecer a condições que restringem o funcionamento ideal da transmissão dos sinais da rede. Além dos limites de potência já citados, a capacidade dos enlaces obedece a um determinado modelo de degradação de sinal, baseado na razão entre o sinal emitido e a soma entre os níveis de interferência causados por outros sinais próximos e o nível de ruído presente no ambiente. Esta relação é representada pelo modelo SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) – o que torna a estimativa da capacidade de enlaces uma função não-linear.

Com base neste contexto, o objetivo deste artigo é propor diferentes modelos de otimização para um melhor aproveitamento da capacidade de enlaces em uma rede sem fio em malha, utilizando modelos de Programação Não-Linear. Serão propostos três modelos distintos:

- maximização da capacidade total de transmissão da rede;
- maximização do menor valor de capacidade entre os enlaces da rede;
- minimização da potência máxima.

Por se tratar de modelos cuja solução é complexa de se obter por métodos exatos, diferentes estratégias de solução serão adotadas para cada modelo e, em seguida, comparadas as formas de avaliar o comportamento desses modelos.

A estrutura do trabalho está descrita a seguir: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica do trabalho, tendo como base alguns trabalhos científicos. A Seção 3 apresenta os modelos de otimização propostos para um melhor aproveitamento da capacidade dos enlaces da rede. Os resultados computacionais obtidos na utilização dos algoritmos de obtenção de soluções para os problemas são apresentados na Seção 4. As conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros são descritas na Seção 5.

2. Trabalhos Relacionados

Para estimar, de forma realística, a capacidade de transmissão de dados de um enlace de uma rede sem fio é necessário admitir a existência de ruídos causados por elementos externos presentes no ambiente (chuva, vento, árvores, edifícios, dentre outros) e de interferências provocadas por conflitos causados por outros sinais presentes na mesma faixa da largura de banda. A existência destes fatores pode reduzir significativamente os níveis de qualidade do sinal, podendo até comprometer a transmissão. Por esta razão, os estudos sobre a estimativa da capacidade de transmissão dos enlaces de uma rede sem fio têm recebido uma atenção especial (Gupta e Kumar, 2000).

Weber e Andrews (2012) afirmam que a capacidade de enlaces é uma métrica de desempenho que mede a intensidade espacial de transmissões sucessivas, sujeito a restrições oriundas das características da rede, como a quantidade de antenas em um AP, a tecnologia empregada nos APs e a degradação do sinal em função da interferência entre canais ou em função da distância entre os APs.

Johansson e Xiao (2006) apontam para a importância de utilizar modelos físicos para estimar a degradação do sinal em uma rede sem fio e mostra que a capacidade de um enlace pode ser estimada por uma equação logarítmica, denominada equação de Shannon. Para estabelecer esta equação, seja Q uma razão que estabelece o nível do sinal em uma transmissão sem fio, dada por:

$$Q = \frac{S}{N + I} \quad (1)$$

sendo S o nível de sinal do enlace, N o ruído existente no ambiente e I a interferência

provocada por outros dispositivos que podem estar em um mesmo nível de frequência do sinal emitido para o enlace. Então, a equação de Shannon é representada a partir da função logarítmica:

$$\kappa = W \log_2(1 + Q) \quad (2)$$

sendo κ a capacidade do enlace, W é o tamanho da faixa de frequência da largura de banda. Esta equação calcula a capacidade do enlace em função do modelo físico de degradação SINR, que leva em conta tanto o ruído existente, quanto a interferência de outros sinais. A equação de Shannon é não-linear (Wu e Kung, 2006) e sua presença em um modelo de otimização dificulta a utilização de métodos exatos de solução.

No modelo proposto por Yuan et al. (2006), uma abordagem baseada na Teoria dos Jogos foi utilizada para resolver de forma aproximada o problema não-convexo da capacidade dos enlaces. Esta abordagem leva em conta o modelo SINR para encontrar uma solução para o problema de controle de potência. A ideia dos autores foi maximizar a capacidade dos enlaces com o objetivo de maximizar a vazão. Os autores argumentam que, devido à interferência, o problema de controle de potência é um problema de otimização não-convexa, inerentemente difícil de resolver. Os autores então discutem que sob certas condições (RS # 1) o problema de controle de potência pode ser resolvido de forma eficiente por técnicas de programação geométrica e, por meio de uma transformação logarítmica do vetor de potências, o problema torna-se um problema de otimização convexa.

Modelos de otimização não-convexa também ocorrem em outras aplicações de tecnologia de redes. Em Lee et al. (2005), por exemplo, um modelo não-convexo é descrito para distribuir taxas de alocação de dados para usuários de Internet. Os autores ressaltam que modelos baseados em funções côncavas, quando aplicados em situações realísticas, podem levar a instabilidades e alto congestionamento da rede. Os autores apontam que, neste caso, um modelo não-convexo é mais adequado, embora difícil de ser resolvido.

O modelo de otimização proposto neste trabalho inclui restrições não-lineares por utilizar a equação (1) para calcular a capacidade dos enlaces em função do modelo físico de degradação SINR, que leva em conta tanto o ruído existente, quanto a interferência provocada por outros sinais. Assim, pretende-se utilizar a meta-heurística VNS (*Variable Neighborhood Search*) como método de solução.

3. Modelagem Proposta

A proposta neste trabalho define diferentes modelos que visam aproveitar da melhor forma possível a capacidade de todos os enlaces da rede. O objetivo de apresentar diferentes modelos é verificar qual destes maximiza a disponibilidade de largura de banda e o modelo adequado no qual os dados poderão ser mais bem aproveitados durante o tráfego ao longo da rede.

Independente do modelo considera-se o seguinte: seja uma rede sem fio em malha representada por um grafo (\mathbf{N}, \mathbf{L}) , em que \mathbf{N} é o conjunto de dispositivos da rede (ou *Access Points* – APs) e \mathbf{L} o conjunto de enlaces ou *links* que compõe a conexão de dados entre os dispositivos, respeitando-se a área de cobertura de cada um deles. Um exemplo de uma rede representada como um grafo pode ser visto na Figura 2. Neste exemplo, à esquerda, temos um exemplo de uma rede sem fio em malha e, ao lado, sua respectiva representação no formato de grafo.

A partir dos conjuntos que compõem o grafo, dado que a rede seja composta por N APs e L enlaces, seja $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ o conjunto de potências emitidas pelos APs da rede, ou seja, cada valor p representa quanto cada AP consome para o envio dos dados. Os valores das potências dos APs são importantes para determinar a capacidade dos enlaces, representada pelo conjunto de variáveis $\mathbf{k} = \{k_1, k_2, \dots, k_L\}$.

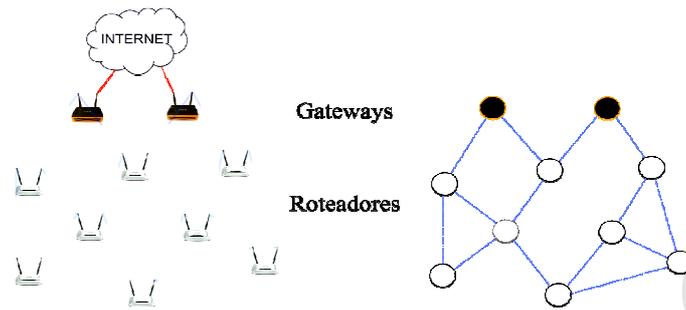


Figura 2 – Principais elementos de uma rede sem fio em malha no formato de grafo

Como forma de representar as configurações físicas da rede, alguns parâmetros são utilizados como limitantes quantitativos da rede. Nos modelos, são utilizados parâmetros que representam o funcionamento dos dispositivos, como a potência máxima P_n de um dado AP n e a frequência da largura de banda, representada por W . Neste trabalho, será restringido o uso de uma única faixa de frequência.

Por outro lado, existem parâmetros que representam as condições do meio em que os dados serão trafegados, como o coeficiente de ruído, representado por σ , e a matriz G de coeficientes de interferência entre os dispositivos da rede. Considerando dois APs, m e n , elemento G_{mn} é calculado em função da distância entre os APs m e n (representado por d_{mn}) e do expoente de degradação de sinal η (Tang *et al.*, 2009). Logo, o elemento G_{mn} é dado pela equação:

$$G_{mn} = \frac{1}{d_{mn}^\eta} \quad (3)$$

A partir destes elementos, em todos os modelos, o objetivo é encontrar uma configuração de valores relacionados à potência consumida pelos enlaces que aprimore da melhor forma possível a capacidade de todos os enlaces da rede. Para isto, serão observados três diferentes tipos de função-objetivo, de modo a avaliar em qual das estratégias propostas, a seguir, será mais eficiente em termos de maior capacidade para o tráfego de dados de modo a distribuir de modo equilibrado para a rede. Deve-se notar que a capacidade de enlace é estimada em função da potência do enlace e da potência dos enlaces vizinhos que causam interferência.

3.1. Maximização da soma das capacidades de transmissão

A função-objetivo do primeiro modelo proposto neste trabalho consiste em determinar os níveis de potência de cada enlace da rede que encontre a máxima capacidade total de transmissão. Maximizar a capacidade total dos enlaces é uma estratégia adotada inicialmente por Yuan *et al.* (2006), como componente de um algoritmo recursivo. Porém, neste trabalho, será utilizada a estratégia isoladamente, conforme a função-objetivo, dada por:

$$\text{Maximizar } \sum_{j=1}^L k_j \quad (4)$$

Espera-se que, neste modelo, seja aproveitada a transmissão de dados da melhor forma possível, considerando toda a malha que compõe a rede. No entanto, esta estratégia poderá impactar em aumentar significativamente a potência de um dos enlaces e, conseqüentemente, prejudicar o sinal dos enlaces vizinhos. Para evitar que não haja uma grande discrepância entre os valores das potências dos enlaces e das capacidades dos enlaces, são propostos outros modelos para melhor equilíbrio dos valores das variáveis.

3.2. Maximização da capacidade mínima de transmissão

Uma possível estratégia a ser avaliada é evitar que valores muito baixos para as potências sejam utilizados. Então, a intenção do próximo modelo proposto nesta seção é encontrar uma configuração de potências e capacidades de enlaces que maximize o menor valor de um conjunto de capacidades. Desta forma, a função-objetivo é representada por:

$$\text{Maximizar } \min_{j \in \mathbf{L}} k_j \quad (5)$$

Nota-se que a função-objetivo (5) se trata de uma função mínima. Para linearizar a função-objetivo do modelo, então seja c a variável que represente o menor valor entre as capacidades de transmissão. Portanto, a função (5) pode ser substituída pelos seguintes componentes do modelo:

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar } c && (6) \\ &\text{Sujeito a} \end{aligned}$$

$$c \leq k_j \quad \forall j \in \mathbf{L} \quad (7)$$

$$c \geq 0 \quad \forall j \in \mathbf{L} \quad (8)$$

3.3. Maximização da soma das potências

Outra maneira factível de aproveitar a capacidade de enlaces é maximizar a soma das potências da rede, admitindo-se a hipótese de que, quanto maior a potência emitida pelos dispositivos da rede, maior tenderá a ser a capacidade. No entanto, esta hipótese deverá ser levada em conta caso haja baixa interferência. Desta forma, utiliza-se esta abordagem a título de comparação com as demais que envolvem o cálculo da capacidade de enlaces. Logo, a função-objetivo para este problema é dada pela soma das potências consumidas por todos os enlaces da rede, definida pela expressão:

$$\text{Maximizar } \sum_{j=1}^L p_j \quad (9)$$

3.4. Conjunto de restrições

Em todos os três modelos apresentados, algumas restrições são consideradas, de modo a representar o controle de potência da rede. Estas restrições buscam manter os níveis de potência emitidos dentro das limitações dos dispositivos. Além disso, é importante que os níveis de potência satisfaçam o cálculo das capacidades em função da razão entre sinal e a soma da interferência e do ruído, mais especificamente ao modelo SINR.

O modelo SINR contribui para manter o equilíbrio entre os níveis de potência dos enlaces, pois se a potência de um dispositivo for muito alta, este dispositivo poderá causar grande interferência nos outros. Logo, os modelos propostos obedecem às seguintes restrições:

$$\sum_{j \in \mathbf{L}} p_j \leq P_n \quad \forall n \in \mathbf{N} \quad (10)$$

$$k_j = W \log_2 \left(1 + \frac{G_{mn} p_j}{\sigma + \sum G_{un} p_i} \right) \quad \forall j \in \mathbf{L} \quad (11)$$

$$p_j \geq 0, k_j \geq 0 \quad \forall j \in \mathbf{L} \quad (12)$$

A restrição (10) limita o controle de potência empregado para a transmissão em um enlace. Esta restrição garante que a potência consumida por todos os enlaces que têm o nó n como emissor não pode ser maior do que a potência máxima P_n que este dispositivo é capaz de transmitir.

A restrição (11) calcula a capacidade do enlace em função do valor do SINR, enquanto que a restrição (12) assegura a não-negatividade das variáveis. Para ilustrar melhor o mecanismo da restrição, a Figura 3 mostra as variáveis correspondentes aos valores das potências consumidas pelos enlaces e os elementos da matriz de coeficientes de interferência \mathbf{G} , considerando que o enlace j corresponde ao par emissor/receptor de APs (m,n) e o enlace θ corresponde ao par de APs (u,v) .

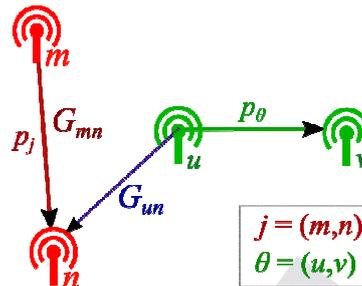


Figura 3 - Exemplo de extração dos valores relacionados às potências e aos coeficientes em um cenário de interferência

4. Metodologia

Todos os modelos propostos são de Programação Não-Linear, uma vez que o cálculo das capacidades k resulta de equações logarítmicas em função do conjunto de potências \mathbf{p} , conforme a restrição (11). Observa-se também que tratam-se de modelos de otimização contínua.

Como forma de aferir os resultados obtidos para o subproblema de maximização da capacidade dos enlaces, propõe-se resolver tais problemas utilizando a meta-heurística VNS (*Variable Neighborhood Search*), visto em Hansen *et al.* (2010). VNS é um método de busca local que consiste em explorar o espaço de soluções por meio de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança, ou seja, vizinhanças gradativamente mais distantes da solução corrente, focalizando a busca em torno de uma nova solução se e somente se um movimento de melhora é realizado. Neste trabalho, será utilizado como critério de parada um número máximo de iterações. A Tabela 1 mostra os elementos utilizados no algoritmo VNS aplicado a este subproblema.

Tabela 1 – Elementos utilizados no algoritmo VNS

Elemento	Descrição
\mathbf{p}_0	Solução inicial
\mathbf{p}	Solução corrente
\mathbf{p}'	Solução vizinha à corrente
\mathbf{p}''	Solução obtida pela busca local
\mathbf{p}_f	Solução final fornecida pelo VNS
K	Número da estrutura de vizinhança
R	Quantidade de estruturas de vizinhança disponíveis
$Imax$	Máximo de iterações
$f(\mathbf{p})$	Valor da função-objetivo para a solução \mathbf{p} , com os

O VNS utiliza algumas funções que são utilizadas durante a execução da meta-heurística. Para este caso, são utilizadas a função *Vizinho*(\mathbf{p} , k) (Algoritmo 1), que consiste em buscar um vizinho da solução corrente \mathbf{p} a partir da k -ésima estrutura de vizinhança. Especificamente, são utilizadas seis estruturas de vizinhança, que dependem das operações *Altera*(\mathbf{p} , r), que altera um valor de posição aleatória p_i em r repetidas vezes, e *Troca*(\mathbf{p} , r), que troca dois valores do vetor de potências \mathbf{p} em r vezes.

 Algoritmo 2 – Função *Vizinho* (\mathbf{p}, k)

Seja $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_L]$ uma solução do subproblema;
 $\mathbf{p}' \leftarrow \mathbf{p}$;
selecione (k) **faça**
 caso 1
 Altera ($\mathbf{p}', 2$);
 caso 2
 Troca ($\mathbf{p}', 1$);
 caso 3
 Altera ($\mathbf{p}', 4$);
 caso 4
 Troca ($\mathbf{p}', 2$);
 caso 5
 Altera ($\mathbf{p}', 6$);
 caso 6
 Troca ($\mathbf{p}', 3$);
fim
retorna \mathbf{p}'

Outra função importante a ser utilizada no VNS é a busca local realizada sobre o vizinho escolhido. O Algoritmo 2 mostra o procedimento de busca adotado para este problema, considerando os elementos do problema.

 Algoritmo 2 – Função *BuscaLocal* (\mathbf{p})

$\mathbf{p}'' \leftarrow \mathbf{p}$;
repita
 $ok \leftarrow 0$;
 $j \leftarrow 0$;
 Tome um número aleatório $x \in [-1, 1]$;
 enquanto ($j \leq L$) **faça**
 $j \leftarrow j + 1$;
 $p'_j \leftarrow p_j + x$;
 se ($(f(\mathbf{p}') > f(\mathbf{p}''))$) **então**
 $\mathbf{p}'' \leftarrow \mathbf{p}'$;
 $ok = 1$;
 fim
 $p'_j \leftarrow p_j$;
 fim
 $\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p}''$;
até ($ok = 1$);

Por sua vez, o Algoritmo 3 mostra o algoritmo VNS aplicado ao subproblema de maximização da capacidade dos enlaces. Ao final da execução da meta-heurística VNS, tem-se o conjunto \mathbf{k} de capacidades dos enlaces.

Algumas funções são utilizadas dentro do algoritmo VNS para a obtenção de soluções para os modelos. A função *Vizinho*(\mathbf{p}, i) consiste na busca de um vizinho do conjunto de potências corrente \mathbf{p} a partir da i -ésima estrutura de vizinhança. Em cada estrutura de vizinhança, podem ser realizadas operações de alteração ou troca entre valores de elementos do conjunto de soluções.

5. Resultados Computacionais

Os algoritmos para resolução dos modelos foram implementados na linguagem de programação C++, em um equipamento com processador com quatro núcleos de 2,5 GHz em cada núcleo, memória RAM de 4 GB.

Algoritmo 3 – VNS para maximização da capacidade dos enlaces

Entrada: $(\mathbf{p}_0, R, I_{max})$

$\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p}_0$;
enquanto $(iT < I_{max})$ **faça**
 $i \leftarrow 1$;
 enquanto $(i < R)$ **faça**
 $\mathbf{p}' \leftarrow \text{Vizinho}(\mathbf{p}, i)$;
 $\mathbf{p}'' \leftarrow \text{BuscaLocal}(\mathbf{p}')$;
 se $f(\mathbf{p}'') > f(\mathbf{p})$ **então** // ou $f(\mathbf{p}'') < f(\mathbf{p})$, para casos de minimização
 $\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p}''$;
 $i \leftarrow 1$;
 senão
 $i \leftarrow i + 1$;
 fim-se
 fim-enquanto
 $iT \leftarrow iT + 1$;
fim-enquanto
 $\mathbf{p}_f \leftarrow \mathbf{p}$;
 Calcular \mathbf{k} a partir de \mathbf{p}_f pela Equação (11);

Saída: \mathbf{k}

Considera-se que esta WMN utiliza dispositivos do tipo IEEE 802.11s em uma faixa de frequência não-licenciada de 2,4000 a 2,4835 GHz, ou seja, uma banda de 83,5 MHz. Considera-se que será utilizada para W uma frequência de 20 MHz por canal.

Foram realizados dois tipos distintos de testes, com malhas organizadas em grade, ou seja, equidistantes, e malhas aleatórias. Para cada instância, cada algoritmo foi executado 30 vezes, sendo que o critério de parada para o VNS foi o número limitado de iterações – 2 milhões.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos para a execução do algoritmo em WMNs cuja malha está aleatoriamente. Considera-se como legenda o número de APs (N), o número de enlaces (L) e a expressão $\sum i : k_i = 0$ como a quantidade de enlaces que apresentaram resultado nulo, ou seja, enlaces que não serão aproveitados pela rede. Para representar o modelo correspondente aos valores das respectivas soluções, serão utilizados os números das subseções correspondentes aos modelos:

- 3.1 para maximização da soma das capacidades de transmissão;
- 3.2 para maximização da capacidade mínima de transmissão;
- 3.3 para maximização da soma das potências.

Para ilustrar a comparação entre os valores da Tabela 2, a Figura 4 mostra dois gráficos. Nesta figura, são comparados os resultados obtidos para os valores médios (lado esquerdo) e para os valores máximos (lado direito) da soma das capacidades em cada um dos três modelos propostos.

Tabela 2 – Resultados obtidos das capacidades totais para redes de topologia aleatória

N	L	$\sum i : k_i = 0$	Modelo 3.1 (Mb/s)		Modelo 3.2 (Mb/s)		Modelo 3.3 (Mb/s)	
			Média	Maior	Média	Maior	Média	Maior
9	19	3	804,99	833,25	0,18	0,18	546,27	609,62
16	39	0	1096,18	1158,07	566,40	632,32	789,96	863,21
25	77	35	971,74	1006,42	0,43	0,43	843,91	926,68
49	141	64	1519,12	1549,38	1,98	1,98	1419,58	1495,06
100	206	14	3224,43	3278,05	4,46	4,46	3072,77	3225,73

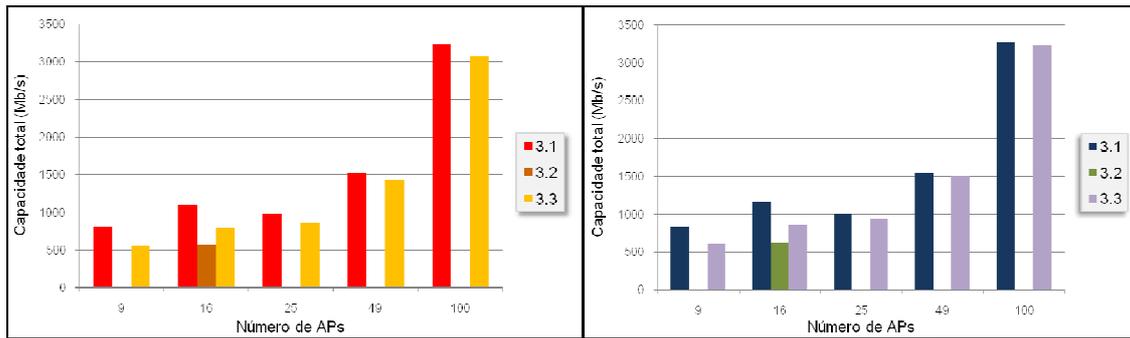


Figura 4 – Comparação das somas das capacidades entre os modelos para cada instância

Pelos resultados apresentados em relação às somas das capacidades da rede, para cada exemplar de rede (instância de dados), o modelo de maximização das somas de capacidade (Modelo 3.1) apresentou-se, obviamente, com uma soma de capacidades maior do que os outros modelos. No entanto, o modelo de maximização das somas de potências consumidas pelos enlaces (Modelo 3.3) apresentou resultados pouco mais próximos se comparados aos resultados obtidos sobre o modelo de maximização de capacidades mínimas (Modelo 3.2).

Para o caso da maximização de capacidades mínimas (Modelo 3.2), somente a rede com 16 APs apresentou resultados mais elevados em relação à aplicação desse modelo em outras redes. Isto pode ser explicado em decorrência da rede com 16 APs ser a única a utilizar todos os enlaces da rede. Isto mostra dois fatores a serem considerados:

- Em todas as execuções dos três modelos, os enlaces que apresentaram capacidade nula foram exatamente os mesmos. Neste caso, como estes enlaces são considerados no modelo, o resultado ficou comprometido;
- No único caso em que não houve capacidade nula, o modelo apresentou resultados relativamente menores em relação aos demais modelos. Isto implica que, apenas tal modelo pode não ser suficiente para evitar grandes discrepâncias entre os valores obtidos, com o objetivo de aprimorar a distribuição das capacidades.

Em relação aos dados estatísticos em torno da média da capacidade de cada um dos enlaces, foram realizadas análises em relação à capacidade média por enlace e qual a maior média de capacidades obtida no modelo. A Tabela 3 mostra os dados obtidos para cada exemplar utilizado no modelo. Como forma de ilustrar a comparação entre tais valores por instância, a Figura 5 mostra um quadro comparativo entre os resultados obtidos.

Assim como ocorrido em relação à soma das capacidades da rede, a média por enlace mostrou que há uma grande diferença entre os valores obtidos pelos modelos 3.1 e 3.3 em comparação ao modelo 3.2. Além disso, constatou-se que, quanto maior o número de APs na rede, a capacidade média por enlace tende a reduzir, embora que não há variações em relação à capacidade de enlace máxima.

Portanto, conclui-se que o modelo de maximização da soma das capacidades dos enlaces obteve resultados com melhor aproveitamento da capacidade da rede em relação aos outros modelos propostos. No entanto, a maximização da soma das potências proporcionou resultados próximos da maximização da soma das capacidades dos enlaces.

Já em relação ao modelo de maximização da menor capacidade de enlaces da rede, os resultados obtidos foram bem inferiores em termos de aproveitamento da capacidade de enlace. Mesmo no caso em que não houve capacidades nulas (rede com 16 APs), seu aproveitamento foi relativamente menor em relação às outras redes. Inclusive, para este caso, não houve uma diferença relevante em relação ao desvio-padrão das capacidades dos enlaces, conforme ilustrado na Figura 6.

Tabela 3 – Dados estatísticos relacionados às capacidades em cada modelo

N	Modelo 3.1(Mb/s)		Modelo 3.2 (Mb/s)		Modelo 3.3 (Mb/s)	
	Média	Maior	Média	Maior	Média	Maior
9	50,31	199,09	0,01	0,08	34,14	174,34
16	28,11	196,07	14,52	82,92	20,25	127,75
25	23,14	153,33	0,01	0,23	20,09	110,57
49	19,73	185,98	0,03	0,14	18,44	185,85
100	16,79	182,31	0,02	3,06	16,00	165,77

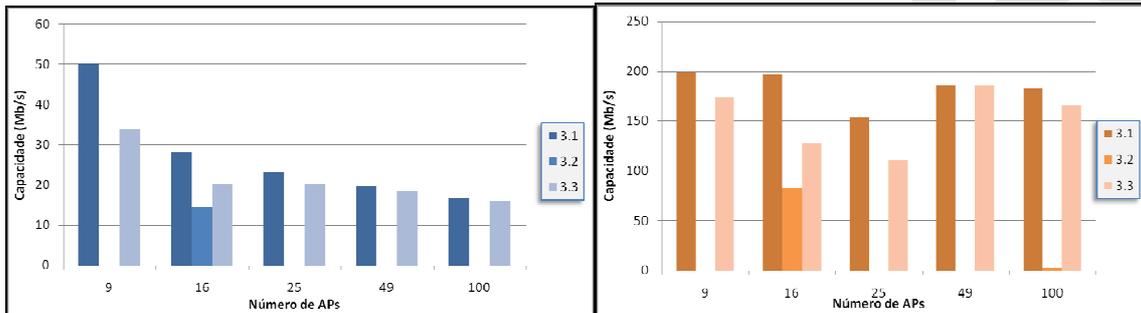


Figura 5 – Comparação das médias e valores máximos das médias de cada capacidade

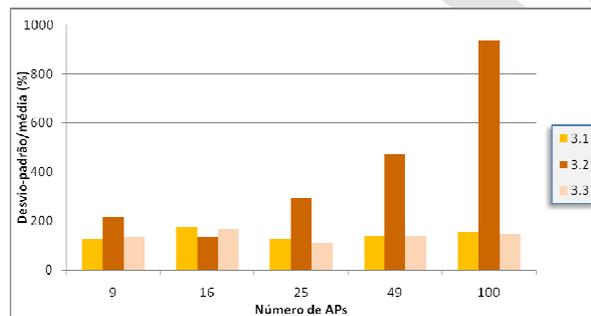


Figura 6 – Proporção entre desvio-padrão e média das capacidades em cada rede testada

Outro ponto a ser destacado nos resultados obtidos é o modelo ter encontrado capacidades nulas. Este fator ocorreu devido às interferências causadas entre enlaces próximos, o que privilegiou a utilização apenas de alguns enlaces da rede. Esta constatação poderá ser aproveitada em um modelo que também considere o fluxo de dados em uma WMN, cuja responsabilidade é da camada de rede.

6. Conclusões

Este trabalho propôs três diferentes alternativas para melhor aproveitamento das capacidades de transmissão de enlace em redes sem fio em malha. Espera-se que tais modelos possam contribuir para que WMNs possam oferecer estrutura capaz de garantir que a transmissão em termos de camada física da rede seja assegurada.

Pode ser notado, a partir dos testes realizados, que houve melhor aproveitamento da capacidade dos enlaces da rede a partir da maximização soma das capacidades, muito embora que houve resultados próximos ao adotar a maximização da soma das potências consumidas pelos enlaces. Notou-se também que este modelo, com base em seus objetivos, detectou que alguns enlaces da rede podem não ser aproveitados, uma vez que a utilização destes pode reduzir o desempenho de enlaces vizinhos.

No entanto, para garantir outros funcionamentos importantes para uma WMN, é necessário incorporar outros elementos da rede no modelo. Nessa linha, pretende-se, como trabalhos futuros, utilizar o modelo que apresentou melhores resultados – neste caso, o modelo de maximização da soma das capacidades – incorporados em um modelo de otimização *cross-layer* para o aprimoramento de parâmetros de qualidade de serviço (QoS) em uma rede sem fio em

malha, como o atraso médio, o *jitter* e a perda de pacotes. Futuramente, juntamente com estas linhas, pretende-se utilizar tais modelos como quadro comparativo a simuladores de rede, de modo a analisar o desempenho do fluxo de dados em relação às capacidades.

Outra sugestão para trabalhos futuros é a utilização de outras estratégias para resolver o problema, uma vez que são modelos de Programação Não-Linear Não-Convexa, cuja obtenção de uma solução satisfatória é complexa. Dependendo da modelagem a ser proposta, sugere-se também a utilização de modelos de otimização multiobjetivo, dado que o problema de aproveitamento das capacidades de transmissão dos enlaces seja combinado com a otimização de mais alguma métrica de rede – o que também requer esforço computacional elevado.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à FAPEMIG pelo auxílio financeiro concedido para a apresentação do trabalho no evento. O terceiro autor agradece à FAPESP pelo auxílio financeiro para a participação do evento.

Referências

- Akyildiz, I. F.; Wang, X. e Wang, W.** Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks ISDN Systems*, vol. 47, no. 4, pp. 445–487, mar. 2005.
- Andreev, K. e Boyko, P.** IEEE 802.11s mesh networking NS-3 model. *Workshop on ns3.*, pp. 43, 2010.
- Gupta, P.; Kumar, P. R.** The capacity of wireless networks. *Information Theory, IEEE Transactions on*, v. 46, n. 2, p. 388–404, Mar 2000.
- Hansen, P.; Mladenovic, N.; Pérez, J. M.** Variable neighbourhood search: methods and applications. *Annals of Operations Research*, Springer US, v. 175, n. 1, p. 367–407, 2010.
- Johansson, M.; Xiao, L.** Cross-layer optimization of wireless networks using nonlinear column generation. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 5, n. 2, p. 435–445, feb. 2006.
- Lee, J.-W.; Mazumdar, R.; Shroff, N.** Non-convex optimization and rate control for multi-class services in the Internet. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, v. 13, n. 4, p. 827–840, 2005.
- Mhatre, V.** Enhanced wireless mesh networking for NS-2 simulator. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 37, no. 3, pp. 69-72, 2007.
- NS-3 Project.** Network Simulator ns-3. Disponível em: <<https://www.nsnam.org/docs/release/3.19/tutorial-pt-br/ns-3-tutorial.pdf>>, 2013.
- Silva, M.; Senne, E. L. F.; Vijaykumar, N. L.** Wireless mesh networks planning based on parameters of quality of service. In *Proceedings of 1st International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*, vol. 1, pp. 441–446, Vilamoura, 2012.
- Tang, J.; Xue, G.; Zhang, W.** Cross-layer optimization for end-to-end rate allocation in multi-radio wireless mesh networks. *Wirel. Netw.*, Kluwer Academic Publishers, Hingham, v. 15, n. 1, p. 53–64, jan. 2009.
- Weber, S.; Andrews, J. G.** Transmission capacity of wireless networks. *CoRR*, abs/1201.0662, 2012.
- Wu, Y.; Kung, S.Y.** Distributed utility maximization for network coding based multicasting: a shortest path approach. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 24, n. 8, p. 1475–1488, 2006.
- Yuan, J.; Li, Z.; Yu, W.; Li, B.** A cross-layer optimization framework for multihop multicast in wireless mesh networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 24, n. 11, p. 2092–2103, nov. 2006.