

LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE ACESSO NUMA REDE EM MALHA SEM FIO: MODELOS E OTIMIZAÇÃO

Lucas Barcelos Mendes

Coordenadoria de Engenharia Elétrica, Campus Vitória
Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)
Av. Vitória, nº 1729 – Bairro Jucutuquara, 29040-780, Vitória, ES – Brasil
barcelosmendes_lucas@hotmail.com

Mário Mestria

Coordenadoria de Engenharia Elétrica, Campus Vitória
Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)
Av. Vitória, nº 1729 – Bairro Jucutuquara, 29040-780, Vitória, ES – Brasil
mmestria@ifes.edu.br; mmestria@uol.com.br

RESUMO

Este trabalho propõe a modelagem e solução do problema de localização de dispositivos em uma rede em malha sem fio para instâncias que simulam redes reais. Dois modelos distintos são abordados: o primeiro considera fixa a capacidade de transmissão de dados de um dispositivo em malha para os clientes atendidos por ele; o segundo propõe um decaimento dessa capacidade com o aumento da distância do dispositivo para o cliente. As soluções do problema consistem em minimizar os custos de instalação e determinar a localização de pontos de acesso e roteadores em malha, garantindo a cobertura de todos os clientes da rede. Também são discutidos os efeitos dos diferentes parâmetros nas redes sobre as qualidades das soluções.

PALAVRAS CHAVE. Redes em malha sem fio. Otimização. Planejamento.

Tópicos: Outras Aplicações em PO; Programação Matemática; Otimização Combinatória.

ABSTRACT

This paper proposes the modelling and solution to the problem of locating devices in a wireless mesh network, based on instances that simulate real nets. Two different models are approached: the first considers a fixed capacity of data transmission from a mesh device to the mesh clients assigned to it; the second proposes a decline of that capacity with the increase of the distance from the device to the client. The solutions of problem consist in minimizing the installation costs and in determining the location of mesh access points and mesh routers, guaranteeing the coverage of all clients. In addition, this paper discusses the effects of different parameters in network at quality of solutions.

KEYWORDS. Wireless mesh networks. Optimization. Planning.

Paper topics: Other Applications in OR; Mathematical Programming; Combinatorial Optimization.

1. Introdução

Na Engenharia muitas aplicações requerem tomar decisões para localizar facilidades num determinado ponto do espaço com a finalidade de adquirir melhor aproveitamento destas escolhas e com o objetivo de minimizar custos operacionais. O termo facilidade aqui mencionado é bastante genérico e vai além do sentido mais amplo da palavra. Ou seja, neste sentido, podemos incluir nesta classificação da palavra facilidade os termos como [Current et al. 2002]: aeroportos, portos marítimos, fábricas, armazéns, escolas, hospitais, pontos de ônibus, estações de metrô, centros de comutação eletrônica, sirenes de alerta de emergência, dentre outras. Especificamente, este trabalho se delimita ao problema de localização de pontos de acesso à rede em malha sem fio, facilidade citada em [Amaldi et al. 2008].

Há quatro componentes que descrevem problemas de localização [Farahani e Hekmatfar 2009]: os clientes, que são assumidos já estar localizados em pontos ou nas rotas, as facilidades que serão localizadas, um espaço nos quais os clientes e as facilidades estarão localizados, e uma métrica padrão que indica distância, tempo ou custo entre clientes e facilidades. O termo “problemas de localização” refere-se à modelação, a formulação e a solução de uma classe de problemas que podem ser descritos como a localização de facilidades em algum dado espaço. Implantação, posicionamento e alocação são frequentemente usados como sinônimos para localização.

De acordo com [Amaldi et al. 2008], redes em malha sem fio são amplamente reconhecidas como uma solução promissora e rentável para fornecer conectividade sem fio para usuários móveis. Os autores reforçam que eventualmente a rede em malha sem fio pode competir com tecnologias de acesso de banda larga com fio e que tal sucesso se deve, principalmente, à alta flexibilidade do paradigma de rede em malha, que tem muitas vantagens em termos de capacidade de autoconfiguração e custo de instalação reduzido. Em uma configuração tradicional de LAN (*Local Area Network*) sem fio 802.11 [IEEE 802 1999], Conjuntos de Serviços Básicos (CSB) estão ligados via Ethernet LAN. Tal arquitetura de rede fixa limita a flexibilidade de implantação da rede e aumenta seus custos. Assim, a mobilidade do CSB e rede de múltiplos saltos são necessárias [Wang e Lim 2008].

Segundo [Akyildiz et al. 2005] uma tendência para redes em malha sem fio será a rede composta por uma infraestrutura que inclui roteadores de malha e *backbones* cabeados e sem fios, e ainda uma rede cliente em malha sem fio. Clientes de malha podem acessar a rede por meio de roteadores de malha, bem como acessar diretamente com outros clientes da malha. Enquanto a infraestrutura fornece conectividade com outras redes, como a Internet, Wi-Fi, Wi-MAX, redes celulares e sensores, as capacidades de roteamento de clientes proporcionam melhor conectividade e cobertura dentro da rede em malha sem fio.

Em [Amaldi et al. 2008], foram propostos modelos de otimização para a cobertura e planejamento topológico de redes em malha sem fio com várias interfaces de rádio e múltiplos canais ortogonais disponíveis em cada interface. Os modelos matemáticos propostos pelos autores baseado em programação linear visam minimizar o custo total de instalação em conjunto com a otimização do número e da localização de roteadores e pontos de acesso à malha e ainda na designação de canal, tendo em vista tanto os requisitos de conectividade locais e de múltiplos saltos. Neste trabalho, os autores fornecem melhores soluções para um conjunto de instâncias reais de porte médio e discutem o efeito dos diferentes parâmetros sobre as características das soluções. Além disso, os autores apresentam uma heurística para resolver instâncias de grandes portes com precisão de 5% em relação ao custo da solução ótima. As instâncias foram avaliadas através de simulações em nível de sistema com o simulador ns-2 [ISI 2014].

No trabalho de [Silva et al. 2010], o planejamento de uma rede em malha, além de tentar satisfazer as necessidades dos clientes, oferece um serviço de qualidade, levando em conta a minimização de custos e a verificação do respeito a uma taxa tolerada de perda de pacotes. Através do problema de *p*-medianas capacitado, são escolhidos *p gateways* e, usando uma verificação dos clientes que ainda não estão cobertos pela rede, novos APs (*Access Points*) são ativados para compor a topologia inicial. É utilizado o algoritmo de simulação de Monte Carlo

aplicado ao modelo hipercubo para determinar a taxa atual de perda de pacotes e se os valores do parâmetro de QoS (*Quality of Service*) fornecidos pelo algoritmo são maiores do que a taxa tolerada que se espera atingir. A topologia da rede, então, deve ser alterada de modo a incluir novos APs.

No trabalho de [Santos et al. 2011], foi proposta uma solução a partir da implementação de heurísticas GRASP para o problema de localização de pontos de acesso numa rede em malha sem fio, o qual é tratado como um problema de localização de p-medianas capacitado baseado na estrutura de uma nova rede que será implantada. O objetivo do trabalho foi maximizar a quantidade de usuários atendidos pela rede com um número fixo de pontos de acesso, levando-se em consideração as seguintes restrições: quantidade máxima de clientes que cada um dos AP será atendido, distância máxima permitida entre o AP e o cliente atendido, distância máxima entre dois APs, quantidade máxima de saltos entre os APs e o *gateway* e quantidade mínima de APs. Os autores consideraram que as antenas transmissoras são onidirecionais, irradiando o sinal igualmente em todas as direções e ainda todas as antenas possuem o mesmo custo e o mesmo alcance de transmissão.

O objetivo deste trabalho é modelar e implementar método de solução para o problema de localização de pontos de acesso numa rede em malha sem fio com base em modelos apresentados na literatura. A otimização baseia-se no atendimento total da demanda dos clientes com minimização dos custos de instalação. Não obstante, são analisados e discutidos os efeitos dos diferentes parâmetros das redes sobre as características das soluções obtidas.

O artigo é organizado como segue. Na segunda seção, há uma breve apresentação dos dispositivos e suas disposições dentro de uma rede em malha sem fio; na seção 3, são discutidos os modelos analisados neste trabalho, com suas devidas formulações matemáticas de função objetivo e restrições; na quarta seção, os resultados obtidos são discutidos com base nos conhecimentos existentes das redes em malha sem fio e dos resultados contidos na literatura e na seção 5 contém uma visão geral do que foi abordado em todo o trabalho e são propostas outras possíveis abordagens para o problema.

2. Descrição da Rede em Malha Sem Fio

As *Wireless Mesh Networks* (WMNs) são compostas, basicamente, por três categorias de aparelhos: Pontos de Acesso em Malha (PAMs), Roteadores em Malha (RM) e Clientes em Malha (CMs). Numa conexão em rede, a configuração buscada é tal qual a apresentada na Figura 1, como consta na diagramação apresentada por [Amaldi et al. 2008]. Representa-se na figura, ainda, a *backbone* de dados do sistema. Os aparelhos PAM são os que apresentam conexão por *links* com fio à *backbone*. Os demais aparelhos que permitem aos clientes o acesso à rede são os RMs. Devido a fatores como a presença de tal conexão por fio, os PAMs apresentam um custo mais elevado de instalação que os RMs.

A determinação da localização ótima de cada aparelho PAM ou RM leva em consideração um conjunto de locações possíveis, ou locações candidatas para instalação de tais aparelhos, os quais devem ser dispostos de forma a atender todos os CMs da rede, proporcionando o menor custo possível de instalação.

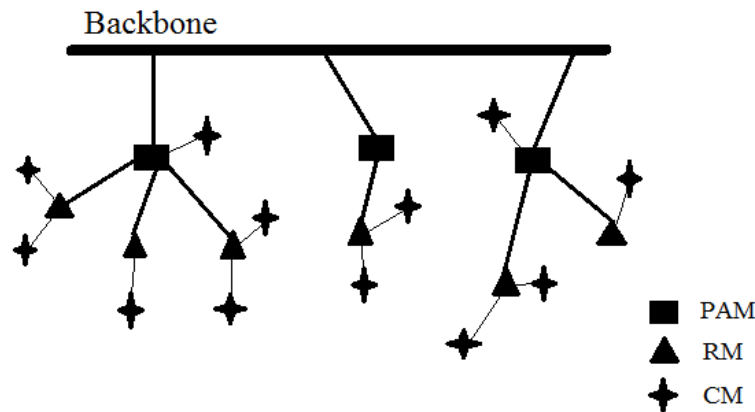


Figura 1 - Diagramação de uma Rede em Malha Sem Fio, adaptado de [Amaldi et al. 2008]

3. Modelagem

Primeiramente, neste trabalho, abordaremos o problema de localização de pontos de acesso em uma rede em malha sem fio através de um modelo que considera fixa a taxa de transmissão de dados dos aparelhos pertencentes à malha, a despeito das distâncias entre o ponto de transmissão e o ponto de recepção do sinal. A este modelo damos o nome de Modelo de Transmissão em Taxa Fixa, ou MTTF.

Apesar de ser um modelo passível de utilização para WMNs mais simples que permitam as aproximações matemáticas necessárias para se considerar uma taxa fixa de transmissão, posteriormente, neste estudo, abordamos o Modelo de Taxa Adaptativa (MTA), que prevê o decaimento da potência do sinal de dados com a distância para o ponto de transmissão. Este modelo é uma aproximação melhor das redes práticas.

3.1. Modelo de Transmissão em Taxa Fixa (MTTF)

Para modelagem e otimização do problema, define-se um conjunto S de locações candidatas (LCs) a receber um aparelho da rede *Mesh*. Este conjunto é dado por $S = \{1, \dots, m\}$. Além disso, o conjunto $I = \{1, \dots, n\}$ denota os clientes *Mesh* que serão atendidos pela rede em questão.

O custo de instalação de um PAM ou RM à locação j do conjunto de LCs são c_j e $(p_j + c_j)$, respectivamente, com $j \in S$. Isso porque p_j refere-se ao custo adicional de instalação de um PAM com relação ao RM. Devido a alguns fatores, como a conexão por fio ao *backbone*.

A demanda de dados gerada por cada cliente é denotada por d_i , com $i \in I$. A capacidade máxima da interface de acesso de LC j é dada por v_j (com $j \in S$), ou seja, v_j é a capacidade máxima de tráfego de dados entre um aparelho *mesh* instalado em LC j e todos os clientes atendidos por ele. A capacidade de tráfego suportada por cada *link* sem fio entre LC j e LC l é dada por u_{jl} , com j e $l \in S$. Em outras palavras, esta é a capacidade máxima de transferência de dados entre duas LCs conectadas. A máxima capacidade de transferência de dados entre um PAM e ao *backbone* da rede é referida por M .

Além dos parâmetros já apresentados, a modelagem do problema possui ainda parâmetros de cobertura, de conectividade e variáveis de decisão. Estes parâmetros são elucidados a seguir.

O parâmetro de cobertura a_{ij} é definido para cada par $i \in I$ e $j \in S$ como:

$$a_{ij} \begin{cases} 1 \text{ se PAM ou RM em } j \text{ cobre Cliente Mesh } i \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

O parâmetro de conectividade b_{jl} é definido para todo j e $l \in S$ como:

$$b_{ij} \begin{cases} 1 \text{ se CS } j \text{ e } l \text{ podem ser conectados por link sem fio} \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

Já as variáveis de decisão incluem: a variável x_{ij} de atribuição do cliente $i \in I$ à LC j , com $j \in S$.

$$x_{ij} \begin{cases} 1 \text{ se Cliente Mesh } i \text{ é atribuído à LC } j \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

A variável z_j que indica utilização de LC j , com $j \in S$.

$$z_i \begin{cases} 1 \text{ se PAM ou RM é instalado em } j \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

A variável w_j que permite a diferenciação entre PAM e RM caso haja um aparelho *mesh* instalado em $j \in S$.

$$w_{ij} \begin{cases} 1 \text{ se PAM é instalado em } j \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

A variável y_{jl} (j e $l \in S$), referente à conexão sem fio entre duas LCs.

$$y_{ij} \begin{cases} 1 \text{ se PAM ou RM em } j \text{ cobre cliente } i \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

É utilizada ainda a variável f_{jl} para indicação da taxa de transferência de dados nos *links* sem fio entre duas LCs – *link* (l,j). Além disso, uma variável específica f_{jN} indica a taxa de transferência de dados nas conexões com fio entre PAM j e a *backbone* da rede.

A partir da determinação desses parâmetros, o problema de otimização da localização dos pontos de acesso à rede em malha sem fio pode ser modelado em função objetivo e restrições. Baseando-se no modelo proposto por [Amaldi et al. 2008], a função objetivo e as restrições utilizadas para modelar o MTTF neste trabalho são apresentadas a seguir:

$$\min \sum_{j \in S} (c_j z_j + p_j w_j) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in S} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I, \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq z_j a_{ij} \quad \forall i \in I, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} d_{ij} x_{ij} + \sum_{l \in S} (f_{lj} - f_{jl}) - f_{jN} = 0 \quad \forall j \in S, \quad (4)$$

$$f_{lj} + f_{jl} \leq u_{jl} y_{jl} \quad \forall j, l \in S, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} d_{ij} x_{ij} \leq v_j \quad \forall j \in S, \quad (6)$$

$$f_{jN} \leq M w_j \quad \forall j \in S, \quad (7)$$

$$y_{jl} \leq z_j, y_{ij} \leq z_l \quad \forall j, l \in S, \quad (8)$$

$$y_{jl} \leq b_{jl} \quad \forall j, l \in S, \quad (9)$$

$$x_{ij}, z_j, y_{jl}, w_j \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j, l \in S \quad (10)$$

A função objetivo (1) busca minimizar o custo total de instalação de todos PAMs e RMs na rede em malha sem fio. Para isso, são contabilizados os custos c_j e p_j da seguinte maneira: caso um RM seja instalado em LC j , apenas z_j possui valor 1 ($w_j = 0$), logo, contabiliza-se o custo c_j . Caso um PAM seja instalado em LC j , ambos z_j e w_j serão 1, agregando-se o valor ($c_j + p_j$) à referida locação. E caso não haja aparelho instalado em LC j , então $z_j = w_j = 0$ e não há custo referente à tal locação.

A restrição (2) garante a cobertura de todos os clientes pertencentes à rede. A restrição (3) garante que um cliente i só seja atribuído à LC j caso um PAM ou RM esteja instalado em LC j . Além disso, tal cliente deve estar dentro da área de cobertura do respectivo aparelho instalado.

A restrição (4) assegura a coerência na transmissão de dados para cada LC. Ou seja, denota-se por f_{ij} o fluxo de dados transmitidos para a LC l pela LC j e por f_{jl} o fluxo de dados recebido pela LC j da LC l . Logo, essa restrição garante que o fluxo de dados transmitido por uma LC seja equivalente ao fluxo de dados recebido pela mesma (seja este fluxo entre tal LC e um cliente, ou outra LC ou ainda a *backbone*, no caso de PAMs).

A restrição (5) garante que o fluxo de dados no *link* (l, j) não exceda a capacidade máxima desse *link*. Já a restrição (6) não permite que a capacidade do *link* sem fio entre cliente e LC seja excedida. E (7) determina que, caso não haja um PAM instalado em LC j ($w_j = 0$), então o fluxo de LC j para a *backbone* deve ser nulo. E esta restrição ainda dita a capacidade de instalação de PAMs na rede. Isso porque o fluxo de dados de um PAM para a *backbone* é limitado por M , logo, quanto menor o valor de M , mais PAMs serão necessárias para suprir um mesmo sistema.

Um *link* (j, l) só é permitido entre dois aparelhos *mesh* caso um PAM ou RM esteja instalado tanto em j quanto em l . Tal condição é assegurada pela restrição (8). Já a (9) garante que o *link* (j, l) só será possível se houver a possibilidade de conectividade entre LC j e LC l .

Por fim, (10) determina que as variáveis de decisão neste modelo assumam valor binário.

3.2. Modelo de Taxa Adaptativa (MTA)

O MTA é uma extensão do MTTF, de modo que os parâmetros analisados são os mesmos, a função objetivo do problema é a mesma e apenas se faz necessária uma adaptação nas restrições. Deve-se levar em consideração que a capacidade de um PAM ou RM em atender um cliente - mais especificamente a taxa de transferência de dados a um determinado cliente – está relacionada à distância do cliente *mesh* ao aparelho em questão. Quanto mais distante, menor a capacidade dessa interface sem fio para atender o cliente.

Para implementação do modelo, define-se o conjunto $D_j = \{1, \dots, k\}$, $\forall j \in S$ de regiões concêntricas a cada LC j . E cada uma das k regiões apresentará um valor v_j^k referente à capacidade da interface de acesso para um cliente localizado nesta região. Além disso, o conjunto $I_j^k \subseteq I, \forall j \in S$ contém todos os clientes que se encontram na região k de LC j . A Figura 2 ilustra a existência de diferentes regiões e suas respectivas capacidades máximas de acesso.

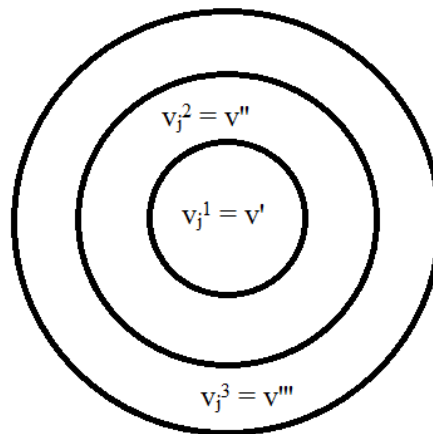


Figura 2 - Representação das regiões de cobertura de LCj, adaptado de [Amaldi et al. 2008]

Determinado o parâmetro dependente de distância v_j^k , as restrições para o modelo MTA são obtidas a partir das restrições (2) a (10), substituindo-se (6) por:

$$\sum_{k \in D_j} \frac{\sum_{i \in I_j^k} d_i x_{ij}}{v_j^k} \leq 1 \quad \forall j \in S \quad (11)$$

4. Resultados e Discussão

Para aquisição dos resultados utilizou-se uma máquina de arquitetura 64 bits, processador INTEL® Core™ i5, de 1,8 GHz e 4 GB de memória RAM. As instâncias foram geradas a partir da distribuição de clientes e LCs de forma aleatória em uma região quadrada de lado $L = 1000$ m. Para obtenção dos pontos randômicos e diagramação das soluções foi utilizado o software MatLab release 2015a [MATLAB 2015]. Para a solução do problema de otimização o *solver* IBM ILOG CPLEX Optimization Studio [IBM 2015] foi empregado.

A fim de ter por base resultados presentes na literatura, alguns parâmetros foram definidos de acordo com os utilizados no trabalho de [Amaldi et al. 2008]. Além disso, para formulação das tabelas apresentadas posteriormente, cada dado é calculado a partir de uma média

entre 10 instâncias distintas. Nas subseções a seguir, apresentaremos e discutiremos os resultados para cada um dos modelos propostos neste trabalho.

4.1. MTTF

As instâncias do modelo MTTF consistem na distribuição de $n = 100$ clientes *mesh*, com tráfego de dados entre LCs limitado em $u_{jl} = 54 \text{ bits/s}$. Este mesmo valor limita o tráfego na interface de acesso de uma LC (parâmetro v_{jl}). A distância máxima para que um cliente esteja no raio de cobertura de uma LC é de 100 metros e a distância máxima para que possa haver conexão entre duas LCs é de 250 metros.

Definidos tais parâmetros, sabe-se que as soluções obtidas serão função da relação de custo $\beta = c_j/(c_j + p_j)$ entre um PAM e um RM; da variável M , que limita a instalação de PAMs; do número m de LCs escolhidas para receber um equipamento *mesh* e da taxa de demanda d_i de cada cliente. Com base nisso, foram gerados diferentes resultados variando-se cada um desses parâmetros, como elucidado a seguir.

Para uma relação de custo fixa $\beta = 1/10$, a Figura 3 ilustra o efeito do aumento da demanda d_i sobre uma rede *mesh* com $m = 30$ e $M = 128 \text{ Mb/s}$. A Figura 3 (a) refere-se a uma demanda de 600 Kb/s e a Figura 3 (b) refere-se à demanda de 3 Mb/s. Na ilustração, os retângulos, triângulos e cruzes representam PAMs, RMs e clientes da rede, respectivamente. As linhas cheias denotam *links* entre LCs e as linhas pontilhadas representam a interface de acesso dos clientes à rede. Como esperado, quanto maior a demanda de cada cliente, mais PAMs serão necessárias na rede, caso o acesso à *backbone* seja limitado por um M finito. Isso porque o tráfego de dados a partir da *backbone* deverá ser maior para suprir todos seus usuários.

A Figura 4 ilustra a ocorrência das mesmas demandas para o caso de não haver limitação na conexão com a *backbone* (M infinito). Nesse caso, menos PAMs serão necessárias para compor a rede, reduzindo seu custo total. Portanto, a instalação de PAMs se torna mais independente da demanda de cada cliente. Ou seja, nota-se que o número de PAMs instalados não se altera significativamente com o aumento de d_i .

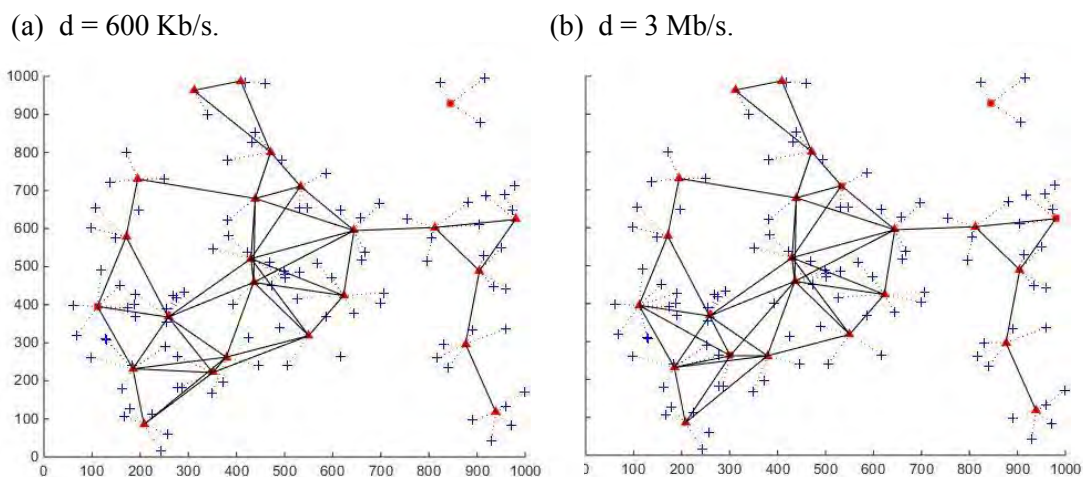


Figura 3 - Solução do MTTF para $M = 128 \text{ Mb/s}$ com demanda (a) $d = 600 \text{ Kb/s}$ e (b) $d = 3 \text{ Mb/s}$

(a) $d = 600 \text{ Kb/s}$.

(b) $d = 3 \text{ Mb/s}$.

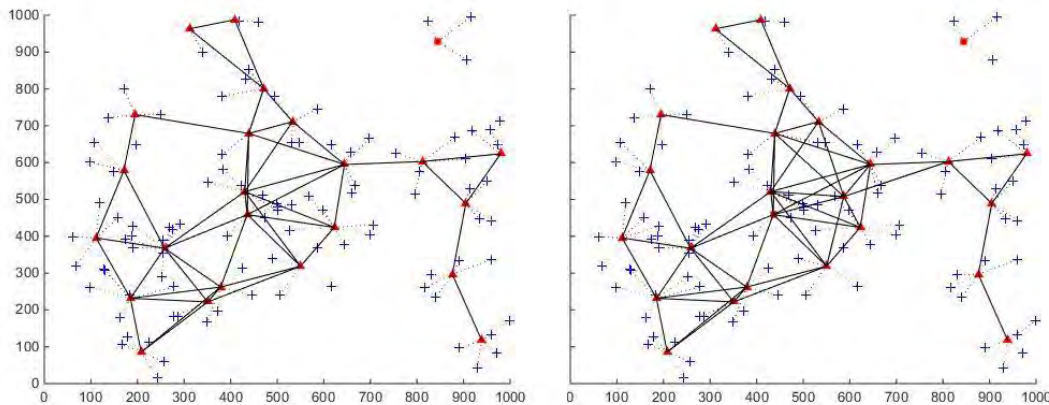


Figura 4 - Solução do MTTF para M ilimitado com demanda (a) $d = 600 \text{ Kb/s}$ e (b) $d = 3 \text{ Mb/s}$

A Tabela 1 apresenta os resultados para diferentes instâncias com m variando entre 30 e 50. Além disso, são analisados os casos onde $d_i = 600 \text{ Kb/s}$ e $d_i = 3 \text{ Mb/s}$. A tabela confirma os resultados observados na Figura 3 – nota-se um aumento no número de PAMs com o aumento da demanda, elevando também o resultado final da função objetivo. Não são observadas alterações significativas no número de *links* entre LCs e no tempo de processamento, dado em segundos.

Tabela 1 - Soluções ótimas do MTTF com $M = 128 \text{ Mb/s}$

	PAM	RM	<i>Links</i>	Tempo (s)	Função Objetivo
$d = 600 \text{ Kb/s}$					
$m = 30$	2	22,3	41,85	8,747	42,3
$m = 40$	1,7	25,6	46,85	7,96	42,6
$m = 50$	1,1	28,9	54,65	10,288	39,9
$d = 3\text{Mb/s}$					
$m = 30$	4	20,3	41,55	8,556	60,3
$m = 40$	3,5	23,8	47,5	7,448	58,8
$m = 50$	3,1	26,8	56,1	11,808	57,8

A Tabela 2 complementa o exposto na Figura 4. Os mesmos casos analisados na construção da Tabela 1 agora são analisados considerando-se ilimitada a capacidade de conexão de uma PAM com a *backbone* (M infinito). Novamente percebe-se uma menor dependência do número de PAMs instaladas com a demanda de cada cliente *mesh*. Nota-se, portanto, uma redução considerável dos valores finais da função objetivo para $d_i = 3 \text{ Mb/s}$ na Tabela 2 com relação à primeira.

Tabela 2 - Soluções ótimas do MTTF com M ilimitado

	PAM	RM	Links	Tempo (s)	Função Objetivo
d = 600 Kb/s					
m = 30	2	22,3	41,9	8,322	42,3
m = 40	1,7	25,6	47,35	7,091	42,6
m = 50	1,1	28,9	55,4	9,818	39,9
d = 3Mb/s					
m = 30	2,6	21,7	41,8	8,32	47,7
m = 40	2	25,5	49,15	7,918	45,5
m = 50	1,2	29,2	59,65	10,303	41,2

Pode-se ainda observar nas Tabelas 1 e 2 que, aumentando-se o número de LCs, a função objetivo é, em geral, reduzida. Isso se dá, pois uma maior quantidade de aparelhos *mesh* na rede oferece uma cobertura mais eficiente - no sentido de se reduzir o tráfego de dados em cada conexão - fazendo com que haja maior possibilidade de instalação de RMs, a despeito dos PAMs.

A Tabela 3 tem por finalidade observar os efeitos da variação da relação de custo β nas WMNs. Esses efeitos são observados em dois casos: M ilimitado e $M = 128$ Mb/s. Espera-se como resultado para a variação de β que, para valores de β mais próximos da unidade, mais PAMs sejam instaladas, uma vez que o custo de tal instalação terá um impacto menor no valor final da função objetivo e o modelo possui preferência por instalação de PAMs para melhor suprir os clientes da rede. Isso pode ser observado mais claramente na situação de M ilimitado na Tabela 3, onde para $\beta = 2/3$ ou $\beta = 10/11$ o número de PAMs instaladas foi cerca de 42,7% superior que para os casos de $\beta = 1/10$ ou $\beta = 1/2$. Já para os casos em que $M = 128$ Mb/s, esse acréscimo na ocorrência de PAMs não foi superior a 6,7%. Essa diferença se deve ao fato de que em uma rede com capacidade M finita, ainda que o custo de um PAM seja elevado, se faz necessária a instalação de um número maior de Pontos de Acesso em Malha para garantir o fluxo coerente de dados entre a rede sem fio e a *backbone*.

Tabela 3 - Soluções ótimas do MTTF com β variável

β	M ilimitado				M = 128 Mb/s			
	PAM	RM	Links	Tempo(s)	PAM	RM	Links	Tempo(s)
1/10	1,2	29,2	59,65	10,303	3,1	26,8	56,1	11,808
1/2	1,2	30,3	62,65	8,873	3	30,3	61,75	8,963
2/3	1,7	28,1	58,25	10,384	3,2	26,6	55,55	10,565
10/11	1,7	28,1	57,85	10,253	3,2	26,6	56,05	11,726

Portanto, uma maior paridade entre os custos de RMs e PAMs e uma menor limitação da conexão com a *backbone* permitem a construção de uma rede com maior número de RMs,

menor número de PAMs e, por conseguinte, um maior número de conexões construídas por múltiplos saltos – ponto característico de redes em malha sem fio.

4.2. MTA

Para análise do modelo MTA, as instâncias foram determinadas de forma semelhante às do modelo MTTF. Porém, a capacidade de tráfego na interface de acesso de um LC (v_j) não é mais invariável, mas depende da distância em que se encontra o cliente do dispositivo *mesh* ao qual está conectado. Portanto, foram definidas três regiões ao redor de cada LC, como proposto por [Amaldi et al. 2008], onde cada região apresenta sua capacidade v_j^k . Além disso, $v_j^k = v^k \forall j$. Para obtenção dos resultados numéricos, as capacidades referentes a cada região são determinadas de acordo com a distância r do cliente ao LC da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} 0m \leq r \leq 30m &\rightarrow v^k = 36 \text{ Mb/s}; \\ 30m < r \leq 60m &\rightarrow v^k = 18 \text{ Mb/s}; \\ 60m < r \leq 100m &\rightarrow v^k = 2 \text{ Mb/s}; \end{aligned}$$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4, onde os dados são dispostos a cada par (d,m) . Foi adotado $M = 128 \text{ Mb/s}$, de modo que a demanda de cada cliente pudesse influenciar nos resultados. Além disso, os valores para d_i adotados são inferiores aos utilizados até então. Isso se deve ao fato de maiores demandas implicarem em sistemas sem solução, visto que a capacidade da interface com o cliente agora possui uma limitação maior.

Nota-se aqui que, novamente, o aumento de LCs determina um menor número de PAMs instaladas. Porém, para um dado valor de m , o acréscimo da demanda não causou alteração nos resultados. Isso pode ser explicado pelo fato de que o número de PAMs ou RMs instalados seja prioritariamente determinado pelos valores de v^k , que determinam basicamente o número de clientes que serão atendidos por cada LC.

Tabela 4 - Soluções ótimas obtidas para MTA

	PAM	RM	Links	Tempo (s)	Função Objetivo
<i>d</i> = 200 Kb/s					
<i>m</i> = 30	2,4	22	37,85	9,567	24,64
<i>m</i> = 40	2,3	25	26,95	10,655	27,53
<i>m</i> = 50	1,3	26	48,4	12,201	27,43
<i>d</i> = 600 Kb/s					
<i>m</i> = 30	2,4	22	38,15	9,53	24,64
<i>m</i> = 40	2,3	25	27,45	10,5	27,53
<i>m</i> = 50	1,3	26	49,05	11,745	27,43

5. Considerações Finais e Conclusão

Neste trabalho foi abordada a estruturação e a solução de dois modelos de localização de pontos de acesso em rede em malha sem fio. O primeiro modelo proposto - Modelo de Transmissão em Taxa Fixa – considera que, uma vez que os clientes estejam dentro do raio de cobertura de um dos pontos de acesso da rede, a transferência de dados ocorre numa velocidade fixa, independente da distância entre cliente e dispositivo de rede. Em contrapartida, o segundo modelo proposto – Modelo de Taxa Adaptativa – sugere que a capacidade de transferência de

dados para um cliente é diminuída com o aumento da distância entre cliente e dispositivo de rede. Este estudo propôs a análise qualitativa e quantitativa, baseado nos dois modelos citados, dos efeitos sobre a distribuição dos pontos de acesso em WMNs ocasionados por: mudança na demanda de dados dos clientes, variação das capacidades de comunicação dos dispositivos da rede com os clientes e com a *backbone* de serviço e também da variação da relação de custo de dispositivos RM e PAM.

Ainda que para determinadas aplicações os modelos MTTF e MTA apresentados sejam suficientes, eles não representam fielmente a realidade das WMNs. Estudos que levem em consideração a possibilidade de interferências nos sinais e redes mais complexas (como as que apresentam múltiplos canais), por exemplo, possibilitam uma maior fidedignidade dos resultados às aplicações práticas. Além disso, outras abordagens de solução, como as heurísticas por relaxação, podem ser aplicadas aos modelos a título de comparação de resultados e eficiência.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFES pelo financiamento parcial deste trabalho através do Edital PRPPG nº 05/2015, PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica) com Projeto nº PJ00002444 e Plano de Trabalho nº PT00003459.

Referências

Akyildiz, I. F., Wang, X. e Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks*, vol. 47, n. 4, p. 445-487.

Amaldi, E., Capone, A., Cesane, M., Filippini, I. e Malucelli, F. (2008). Optimization models and methods for planning wireless mesh networks. *Computer Networks*, vol. 52, n. 11, p. 2159-2171.

Current, J., Daskin, M. e D. Schilling. (2002). Discrete Network Location Models. In Drezner, Z.; Hamacher, H. (Ed.). *Facility Location Theory: Applications and Methods*, capítulo 3. Springer-Verlag, Berlin, p. 81-118.

Farahani, R. Z. e Hekmatfar, M. (2009). *Facilities location: Concepts, models, algorithms and case studies*, Contributions to Management Science, Physica-Verlag, Heidelberg, 549 pp.

IBM (2015). CPLEX. ILOG CPLEX Optimization Studio Product Documentation.

IEEE 802. (1999). Web page. <http://grouper.ieee.org/groups/802/>. Acessado: 2016-04-04.

ISI (2014). Web page. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado: 2016-04-24.

MATLAB (2015). MathWorks, Inc. (release 2015a). MATLAB, Massachusetts, United States.

Santos, T. A., Vianna, D. S. e Silva, R. M. (2011). Proposta de Heurísticas GRASP para o Problema de Alocação de Pontos de Acesso em uma Rede em Malha sem Fio. VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Niterói e Rio de Janeiro, ISSN 1984-9354, 13pp.

Silva, M., Senne, E. L. F. e Vijaykumar, N. L. (2010). Planejamento de redes mesh com aplicação do modelo hipercubo para verificação de parâmetros de QoS. XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves, RS, 12pp.

Wang, X. e Lim, A. O. (2008) IEEE 802.11s wireless mesh networks: Framework and challenges. *Ad Hoc Networks*, vol. 6, n. 6, p. 970-984.