

Planejamento de Redes em Malha Sem Fio Lineares

Felipe Rolim e Souza e Célio V. N. Albuquerque

¹Instituto de Computação - Universidade Federal Fluminense (UFF)

{frolim, celio}@ic.uff.br

Abstract. *Wireless mesh networks consist of mesh routers and clients, where mesh routers compose the network backbone and serve clients. The antennas associated with the routers can be omnidirectional or directional, which have a direct influence in topology construction. With this information in hand, the objective of this work is to propose and evaluate LMP, an algorithm that, given a set of coordinates organized in sequence, decides which of them will have a router installed. This decision must guarantee coverage (each coordinate must be within the coverage area of at least one mesh router) and connectivity (each mesh router must communicate with at least another one). Results obtained with real network testbeds are used to compare the required number of mesh routers, transmission rate and the average and worst signal quality with those from various techniques.*

Resumo. *Redes em malha sem fio consistem em clientes e roteadores mesh, onde os roteadores compõem o backbone da rede. As antenas associadas aos roteadores mesh podem ser omnidirecionais ou direcionais, influenciando diretamente a construção da topologia. Levando em consideração estas informações, o objetivo deste trabalho é propor e avaliar o LMP, um algoritmo que, dado um conjunto de coordenadas organizadas em sequência, decida quais devem ser escolhidas para a instalação de um roteador mesh. Esta escolha deve garantir cobertura (todas as coordenadas devem estar dentro da área de cobertura de pelo menos um roteador mesh) e conectividade (cada roteador mesh deve se comunicar com pelo menos outro). Resultados obtidos com testbeds reais servem para comparar o número mínimo de roteadores mesh necessários, taxa de transmissão, média e a pior qualidade do sinal com os de outras técnicas.*

1. Introdução

Redes em malha sem fio são compostas por roteadores e clientes *mesh*. Os roteadores normalmente são estacionários e formam o *backbone* de rede. Estes roteadores podem se comunicar com outras redes como a Internet, LANs, etc., desde que configurados como *gateways*. Uma característica das redes em malha é que os roteadores se comunicam de forma *ad-hoc* através de múltiplos saltos. Uma vantagem deste tipo de rede é a robustez. Como cada nó pode ser um potencial roteador auxiliando no encaminhamento, quanto maior a quantidade de nós, maior a quantidade de rotas alternativas na rede.

Como explicado anteriormente, as redes em malha sem fio possuem um conjunto de roteadores estacionários que constituem o *backbone* da rede. A escolha do local de posicionamento dos roteadores será o objeto de estudo deste trabalho. O tipo de antena escolhido, podendo ser direcional ou omnidirecional, possui impacto direto nesta escolha.

Ao se trabalhar com antenas direcionais, não se pode dizer que um roteador alcança outro, antes de sua antena estar alinhada em alguma direção. Isto aumenta muito a complexidade de escolha dos locais de posicionamento dos roteadores, pois implica em escolher um bom alinhamento das antenas.

Dentre as diversas topologias que redes em malha sem fio podem assumir, neste trabalho serão abordadas as redes em malha lineares. Este tipo de rede possui um conjunto pontos de interesse organizados de forma sequencial, onde o primeiro e o último atuam como *gateways*. Roteadores *mesh* podem ser instalados em qualquer ponto de interesse. Em relação ao tipo de antena, as direcionais atendem melhor a esta topologia pois a comunicação é realizada com roteadores anteriores e posteriores, não existindo a necessidade de cobertura em outras direções. A comunicação pode ser estabelecida com duas antenas direcionais, uma alinhada no sentido do roteador anterior e outra no sentido do posterior. Além disso, o alcance de antenas direcionais é maior que o de omnidirecionais. Esta configuração foi escolhida devido a um problema real de estabelecimento de comunicação ao longo de uma linha de transmissão de energia [Gerk et al. 2009]. Nesta situação, existe um conjunto de torres, organizadas sequencialmente, onde se deve escolher em quais delas serão instalados roteadores. Existem outras situações similares, como gasodutos e oleodutos, aonde redes em malha sem fio lineares podem ser aplicadas seguindo a mesma ideia. A Figura 1 apresenta a visualização em tempo real da topologia da rede em malha sem fio construída sobre a linha de transmissão de energia que liga a cidade de Machadinho à Campos Novos obtida com a ferramenta MTV - *Mesh Topology Viewer* [Valle et al. 2008].

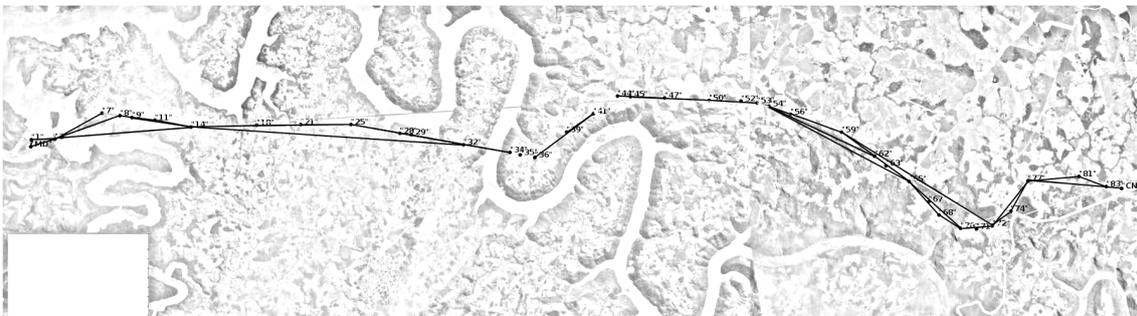


Figura 1. Visualização em tempo real da topologia da rede em malha sem fio construída sobre a linha de transmissão de energia que liga a cidade de Campos Novos à Machadinho. As linhas representam os enlaces.

Para solucionar o problema de construção do *backbone*, será proposto o algoritmo LMP (*Linear Mesh network Planning*) para o planejamento de redes em malha sem fio lineares. O objetivo principal será minimizar a quantidade de roteadores *mesh* escolhidos, porém tentando garantir que a rede possua cobertura e conectividade. Cobertura significa que todos os pontos de interesse estão pelo menos dentro da área de cobertura de pelo menos um roteador. Em relação à conectividade, um roteador deve se comunicar com pelo menos outro.

2. Trabalhos relacionados

A área de redes em malha sem fio vem recebendo diversas contribuições recentemente. Muitas destas pesquisas focam mais no desenvolvimento de protocolos do que no pla-

nejamento da rede, ao assumir que a topologia desta já é fornecida. Isto faz com que o objetivo seja otimizar, por exemplo, o roteamento.

Muitos dos trabalhos encontrados na literatura são baseados no uso de antenas omnidirecionais. A principal vantagem do uso deste tipo de antena é a facilidade de se montar um grafo, onde cada aresta representa a existência de comunicação entre dois nós. Entretanto, ao se utilizar antenas direcionais, a comunicação entre dois nós será dependente do alinhamento escolhido para cada antena. Analisando o caso de antenas omnidirecionais, temos que em [Amaldi et al. 2008], cada nó possui uma área de cobertura circular aonde o raio varia de acordo com a potência de transmissão de cada nó. Esta é normalmente a representação utilizada para antenas omnidirecionais. Utilizar esta abordagem, significa simplificar demais o modelo de propagação das antenas. Por isto, neste trabalho, serão utilizados modelos reais de propagação além da análise de obstáculos, outro fator que possui impacto direto na propagação do sinal.

Existem estudos que fazem uso de antenas direcionais para o planejamento da rede como o GPSR [Chen and Chekuri 2007]. O intuito deste é realizar o planejamento de redes em malha para regiões urbanas. Porém, neste caso, não existe a preocupação com o alinhamento das antenas para melhorar a cobertura. É definido que cada nó possui múltiplas antenas e a comunicação com outro nó acontece se existe visada direta entre eles. Diferente da solução proposta pelo GPSR, neste artigo o posicionamento das antenas é levado em consideração para que a área coberta seja a maior possível. Além do uso de redes em malha em ambientes urbanos, existe também estudos para aplicação destas em regiões rurais como pode ser visto em [Chebrolu and Raman 2007]. Este tipo de região é o que mais se assemelha ao problema de redes em malha sem fio lineares devido ao comprimento dos enlaces. Porém, a solução proposta no trabalho citado leva em consideração a utilização de diferentes tipos de antenas além das direcionais, como, por exemplo, as setoriais. Além disso, para o planejamento da solução, é levado em consideração a existência de redes locais, para as quais os enlaces de longa distância devem atender. Nenhuma dessas características fazem parte das redes em malha sem fio lineares à serem estudadas neste trabalho.

O uso eficiente de antenas direcionais também é objeto de estudo em [Kumar et al. 2006]. Os autores propõem um algoritmo para transformar uma rede em malha formada por antenas omnidirecionais em uma que utilize antenas direcionais. Para isto é necessário orientar as antenas de cada nó para que a rede continue com conectividade e a interferência seja minimizada. Porém, para garantir estas propriedades, pode ser necessário substituir uma antena omnidirecional por mais de duas antenas direcionais, valor limite para a construção das redes em malha sem fio lineares. Além disto, existe a necessidade de se possuir uma solução com antenas omnidirecionais a priori.

3. Formulação do problema

O problema de planejamento de redes em malha sem fio lineares pode ser formulado com base na teoria dos grafos. Utilizando esta abordagem, seja V uma sequência de coordenadas geográficas. A sequência V representa os vértices de um grafo direcional G . Para dois vértices $u, v \in V$, existe uma aresta partindo de u em direção a v se este é a melhor opção de alinhamento de u . Define-se como a melhor opção de alinhamento de um vértice u , outro vértice v onde a antena do primeiro, apontada para o segundo,

resulte no maior número possível de vértices dentro da área de cobertura de u . Além disso, para v ser escolhido como melhor opção, todos os vértices na sequência entre u e v devem ser cobertos (Figura 2). Isto evita que vértices fiquem fora da rede por não estarem sendo cobertos. Cada vértice poderá ter no máximo duas arestas partindo dele, uma no sentido do vértice anterior e outra no sentido do vértice posterior. Além de o vértice estar dentro da área de cobertura da antena, é necessário que não existam obstáculos impedindo a comunicação entre eles. A solução consiste em escolher um sub-grafo que conecte o primeiro ponto ao último da sequência, utilizando o menor número de vértices possível. Um exemplo de um grafo de alinhamento encontra-se na Figura 3.

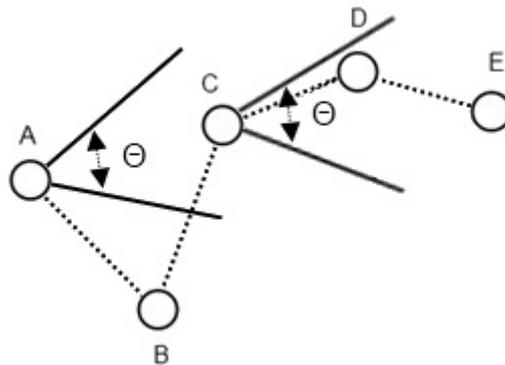


Figura 2. Utilizando uma antena direcional com ângulo de abertura θ , o vértice C alinhado com E garante a cobertura de D, porém A alinhado com C não garante a cobertura de B.

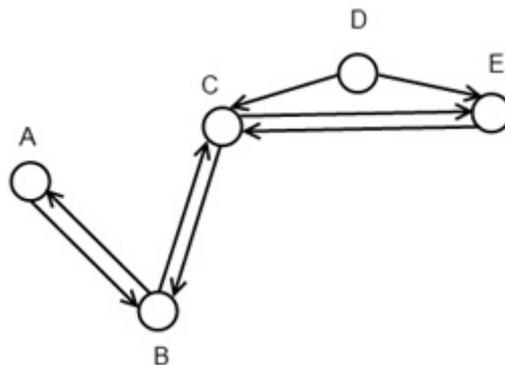


Figura 3. Exemplo de um grafo de alinhamento. Neste caso, os pares de antenas conectando A-B, B-C e C-E estão alinhadas.

4. Proposta

Nesta seção será discutido o projeto do LMP. Antes de explicar detalhadamente cada parte do algoritmo, é apresentado na Figura 4 o fluxo de execução deste. Inicialmente deve-se fornecer uma sequência de coordenadas para que o grafo de alinhamento seja construído. Esta construção requer o cálculo de área de cobertura e análise de obstáculos que irão auxiliar no processo de alinhamento das antenas. Com o grafo montado, a execução de um algoritmo de caminho mínimo irá resultar nas coordenadas que deverão ter um roteador *mesh* instalado. Pode ocorrer do algoritmo não encontrar uma solução para o conjunto de

coordenadas fornecido. A não existência da solução está relacionada a distância entre as coordenadas e a presença de obstáculos.

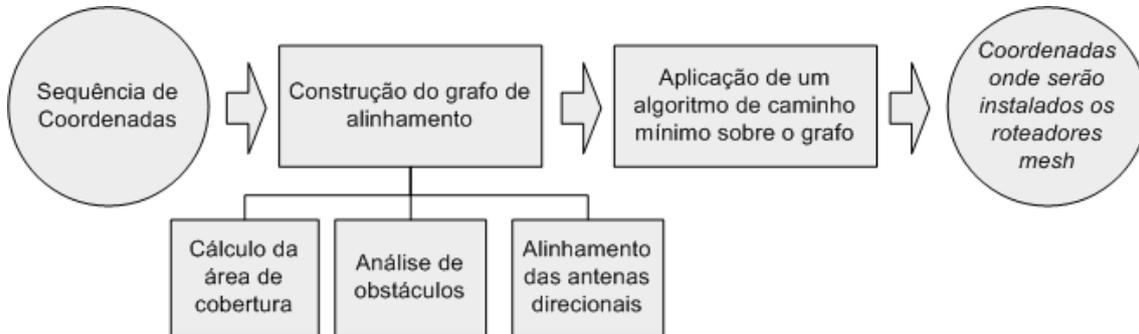


Figura 4. Diagrama exemplificando a sequência de execução do algoritmo.

Como exemplo, a solução do grafo de alinhamento da Figura 3 são os vértices A,B,C e E. Assim, estes vértices representam os locais de instalação dos roteadores *mesh* para que haja cobertura e conectividade.

4.1. Área de cobertura

Como especificado na Seção 3, a escolha do melhor vizinho de alinhamento implica em saber se uma ou mais coordenadas estão dentro de sua área de cobertura. O cálculo para determinar a cobertura ou não de uma coordenada é especificado pela equação do *Link Budget*. Esta equação fornece o sinal recebido utilizando basicamente a soma da potência de saída com os ganhos e perdas relativas as antenas tanto do transmissor quanto do receptor. A fórmula a ser utilizada será a seguinte:

$$PRX = PTX + GTX - LTX - LFS - LM + GRX - LRX, \quad (1)$$

onde PTX e GTX representam, respectivamente, a potência de saída e o ganho da antena enquanto as variáveis LTX , LM indicam as perdas relativas a cabos e conexões e a fatores diversos. A variável LFS representa o resultado da equação conhecida como *Free-space Path Loss*, que indica a perda sofrida pela atenuação do sinal devido a distância entre duas antenas. A equação utilizada é a seguinte:

$$LFS = 32,45 + 20 * \log(FREQ) + 20 * \log(DIST), \quad (2)$$

onde $FREQ$ representa a frequência em Mhz e $DIST$ a distância em quilômetros. Todos os valores citados até aqui estão relacionados ao transmissor. Aqueles representados por GRX e LRX indicam o ganho da antena e as perdas do receptor. Estas duas variáveis são utilizadas apenas quando se calcula o *Link Budget* para o candidato a melhor vizinho. Isto ocorre porque se este candidato for escolhido para a instalação de um roteador, ele receberá uma antena já conhecida. Para as coordenadas localizadas entre a origem e seu melhor vizinho, as variáveis relacionadas ao receptor são ignoradas. Isto porque não se sabe a priori as antenas dos dispositivos que utilizarão a rede. Porém, a omissão destes dois parâmetros não traz consequências negativas, pois o dispositivo que utilizará a rede terá o sinal recebido somado ao ganho de sua antena.

Como especificado, um dos parâmetros é o ganho da antena. Quando se utiliza antenas direcionais, este valor depende do ângulo formado entre a antena e a coordenada a

ser analisada, pois o padrão de irradiação horizontal não é circular como nas antenas omnidirecionais. Para determinar este padrão de irradiação, considera-se, para cada ângulo horizontal e vertical com intervalos de 1° , a perda relativa ao ângulo de ganho máximo (0°)¹.

O resultado da equação do *Link Budget* será comparado a um limiar estabelecido de acordo com a sensibilidade do rádio. Caso o resultado esteja abaixo do limiar, é determinado que a coordenada está fora da área de cobertura da antena.

4.2. Análise de obstáculos

Outro fator, descrito na formulação do problema, para existência de comunicação é a não presença de obstáculos. Para determinar se os obstáculos irão permitir ou não a comunicação, será utilizada a equação da zona de Fresnel. A zona de Fresnel é um dos elipsoides concêntricos entre dois pontos de um sistema de rádio (Figura 5). Para que uma transmissão de rádio seja possível, é necessário que uma porcentagem deste elipsoide não esteja obstruída. O valor padrão desta porcentagem é de 60%. A Equação 3 apresenta o cálculo do raio da zona de Fresnel. O parâmetro PORC representa a porcentagem da zona de Fresnel que precisa estar desobstruída e FREQ indica a frequência das antenas. Os valores D1 e D2 são, respectivamente, a distância do obstáculo até a primeira antena e a distância até a segunda antena. Através deste raio, e conhecendo a altura em que as antenas estão instaladas, é possível definir a elevação máxima, em relação ao nível do mar, que permita a comunicação.

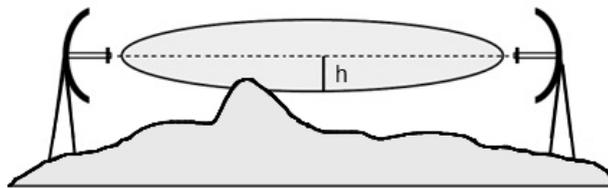


Figura 5. Na zona de Fresnel, o raio h do elipsoide está relacionado a frequência de transmissão e a distância.

$$RAIO = 17.31 * \sqrt{\frac{PORC * D1 * D2}{FREQ * (D1 + D2)}} \quad (3)$$

Para descobrir os obstáculos existentes entre duas coordenadas geográficas, utilizou-se uma base de dados contendo as elevações geográficas da região em que as coordenadas de entrada estão localizadas. Com a equação e a base de dados definidas, para saber se existem obstáculos que possam impedir a comunicação entre duas coordenadas, o LMP analisa todas aquelas intermediárias entre elas, existentes na base de dados, comparando com a elevação máxima calculada pela zona de Fresnel. Caso o valor encontrado na base de dados seja superior ao calculado, a comunicação não poderá ocorrer.

Caso não existam informações de elevação em determinada região, o algoritmo irá considerar como obstáculo a elevação das coordenadas intermediárias as duas sendo analisadas. Desta forma, torna-se obrigatório, para correto funcionamento do algoritmo, fornecer a elevação de todas as coordenadas.

¹O padrão de irradiação da antena deve ser fornecido pelo fabricante.

```

LMP( $V$ ,  $Limiar$ )
1:  $G \leftarrow Coordenadas(V)$ 
2: for cada coordenada  $i \in V$  do
3:    $EscolheMelhorVizinho(i, G, Limiar, Posterior)$ 
4:    $EscolheMelhorVizinho(i, G, Limiar, Anterior)$ 
5: end for
6:  $Primeira \leftarrow PrimeiraCoordenada(V)$ 
7:  $Última \leftarrow ÚltimaCoordenada(V)$ 
8:  $R1 \leftarrow CaminhoMínimo(G, Primeira, Última)$ 
9:  $R2 \leftarrow CaminhoMínimo(G, Última, Primeira)$ 
10:  $R \leftarrow \min(R1, R2)$ 

```

Figura 6. Pseudocódigo do funcionamento básico do algoritmo para antenas direcionais.

4.3. Construção do grafo de alinhamento

Como visto na Figura 4 o primeiro passo é a construção do grafo de alinhamento. Para isto, é considerado que todas as coordenadas são possíveis locais de instalação de roteadores *mesh*. Isto significa que a coordenada, além do roteador, irá receber um par de antenas e um rádio. Com esta consideração inicial, é possível construir o grafo de alinhamento como descrito na Seção 3. A construção deste requer que as antenas de cada coordenada estejam alinhadas com seus melhores vizinhos. Com o grafo montado, a execução de um algoritmo de caminho mínimo resultará em uma solução indicando a quantidade mínima de coordenadas necessárias onde deverão ser efetivamente instalados os roteadores *mesh*. Dependendo de qual ponto se inicia a execução do algoritmo de caminho mínimo (primeiro ou último), diferentes resultados podem ser obtidos. Isto porque v pode ser o melhor vizinho de u , porém u pode não ser o melhor vizinho de v . Dentre os dois grafos é escolhido aquele cujo caminho mínimo possua a menor quantidade de roteadores.

Na Figura 6 este procedimento está apresentado sob a forma de pseudocódigo. O procedimento necessita como parâmetro de entrada um conjunto de coordenadas V e o limiar a ser utilizado pela equação do *Link Budget*. Além deste parâmetro será utilizado um grafo direcional G que inicialmente possui como vértices as coordenadas de V (linha 1). Para cada coordenada $i \in V$, o procedimento que escolhe o melhor vizinho irá adicionar uma aresta em G conectando i aos seus melhores vizinhos (um no sentido anterior e outra no posterior) (linhas 3 e 4). Finalmente, a execução de um algoritmo de caminho mínimo sobre G irá resultar nos conjuntos $R1$ e $R2$ (linhas 8 e 9). O conjunto $R1$ possui as coordenadas do caminho mínimo partindo da primeira para a última coordenada de V , enquanto o conjunto $R2$ possui as coordenadas do caminho no sentido contrário. Dentre estes dois conjuntos, é escolhido aquele que possui o menor número de elementos (linha 10), resultando no conjunto R que possuirá as coordenadas indicando os locais de instalação dos roteadores *mesh*.

A grande dificuldade está na escolha do melhor vizinho. Como já definido anteriormente, o melhor vizinho v de u é aquele que, ao ter a antena de u direcionada para ele, possua o maior número de outras coordenadas dentro da área de cobertura. Deve-se ressaltar que caso uma das coordenadas intermediárias entre u e v não esteja sendo coberta, v

```

EscolheMelhorVizinho( $i, G, Limiar, Sentido$ )
1: if  $Sentido = Posterior$  then
2:    $Vizinho \leftarrow i + 1$ 
3: else
4:    $Vizinho \leftarrow i - 1$ 
5: end if
6:  $Max \leftarrow 0$ 
7:  $Contador \leftarrow AnalisaCobertura(i, Vizinho, Limiar)$ 
8: while  $Contador > 0$  do
9:   if  $(Contador > Max)$  e  $(ExisteObstaculo(i, Vizinho) = falso)$  then
10:     $Max \leftarrow Contador$ 
11:     $MelhorVizinho \leftarrow Vizinho$ 
12:   end if
13:   if  $Sentido = Posterior$  then
14:     $Vizinho \leftarrow Vizinho + 1$ 
15:   else
16:     $Vizinho \leftarrow Vizinho - 1$ 
17:   end if
18:    $Contador \leftarrow AnalisaCobertura(i, Vizinho, Limiar)$ 
19: end while
20:  $InseraAresta(G, i, MelhorVizinho)$ 

```

Figura 7. Pseudocódigo do funcionamento do algoritmo de escolha do melhor vizinho.

não será considerado o melhor vizinho (Figura 2). O pseudocódigo do algoritmo de escolha do melhor vizinho pode ser visto na Figura 7. Primeiramente, é preciso saber quem é o primeiro vizinho da coordenada i . Esta informação é fornecida pelo parâmetro $Sentido$, que indica se os vizinhos posteriores ou anteriores serão analisados. Assim, pode-se definir o primeiro vizinho de i como sendo o próximo (linha 2) ou o anterior (linha 4). Com o vizinho definido, deve-se determinar se ele é a melhor opção de alinhamento. Para isso, a quantidade de coordenadas cobertas quando i tem sua antena alinhada para $Vizinho$, calculada pela função $AnalisaCobertura$ (linha 7), deve ser maior que um máximo estipulado inicialmente com valor 0 (linha 6). Caso este contador seja maior que o máximo e não existe nenhum obstáculo entre i e $Vizinho$ (linha 9), este passa a ser considerado o melhor vizinho de i (linha 11) e a variável Max passa a possuir o valor calculado pela função $AnalisaCobertura$ (linha 10). A função que informa a existência de obstáculos, utiliza o procedimento descrito na Subseção 4.2. Em seguida, é necessário continuar analisando os outros vizinhos de i , o que é realizado incrementado ou decrementando a variável $Vizinho$ (linha 13) e repetindo o processo descrito até que a quantidade de coordenadas intermediárias seja igual a 0, ou seja, quando não for possível estabelecer uma comunicação entre i e $Vizinho$. Definido o melhor vizinho, é criada uma aresta em G ligando i a $MelhorVizinho$ (linha 20).

A Figura 8 apresenta o pseudocódigo da função $AnalisaCobertura$. O objetivo desta função é contar, através do cálculo do $LinkBudget$, a quantidade de coordenadas cobertas resultante do alinhamento da antena de uma coordenada i para um de seus vizi-

```

AnalisaCobertura(i, Vizinho, Limiar)
1: Contador ← 0
2: if LinkBudget(i, Vizinho) > Limiar then
3:   Contador ← Contador + 1
4:   for cada ponto intermediário j entre i e Vizinho do
5:     if LinkBudget(i, j) > Limiar then
6:       Contador ← Contador + 1
7:     else
8:       Contador ← 0
9:     Termina repetição pois j não está sendo coberto
10:    end if
11:  end for
12: end if
13: return Contador

```

Figura 8. Pseudocódigo para contagem de coordenadas dentro da área de cobertura.

nhos. A quantidade de coordenadas cobertas será armazenada na variável *Contador* que possui seu valor inicial igual a 0 (linha 1). O primeiro passo é analisar se existe um sinal mínimo, estipulado pela variável *Limiar*, chegando em *Vizinho* (linha 2). Em caso positivo, as coordenadas intermediárias entre *i* e *Vizinho* serão analisadas (linha 4). Caso o cálculo do *Link Budget* seja superior a *Limiar*, é considerado que a coordenada está sendo coberta, e *Contador* é incrementado em uma unidade (linha 6). Em caso contrário, a restrição de cobertura está sendo violada, pois todas as coordenadas intermediárias devem ser cobertas. Desta forma, a função deverá retornar o valor 0 (linha 8) e não há a necessidade de se analisar as outras coordenadas (linha 9).

5. Resultados

Nesta seção serão apresentadas as soluções encontradas pelo algoritmo LMP para dois conjuntos de coordenadas reais. Ambos os conjuntos consistem em linhas de transmissão de energia fornecidas pela empresa TBE. A primeira, que liga a cidade de Machadinho a Campos Novos, possui 85 torres totalizando, aproximadamente, 50 quilômetros de extensão. Três soluções manuais já haviam sido compostas para este conjunto por um especialista em projeto de redes sem fio formado em engenharia de telecomunicações. A primeira teve como objetivo minimizar a quantidade de roteadores, enquanto as outras duas introduziram redundância à primeira solução. A solução com a maior quantidade de roteadores (maior redundância) foi aplicada a linha de transmissão e encontra-se operacional. Para avaliar o LMP, o resultado deste será comparado à primeira solução manual, já que ambas possuem o objetivo de minimizar a quantidade de roteadores. Uma comparação é viável, pois a rede em operação é uma variante da solução manual citada e ambas foram construídas utilizando o mesmo procedimento. A segunda linha de transmissão liga a cidade de Açaílandia a Imperatriz e possui 128 torres em aproximadamente 62 quilômetros de extensão. Para este conjunto não existe solução manual.

Em relação aos parâmetros para a equação do *Link Budget*, serão utilizadas as mesmas informações das antenas direcionais e roteadores que se encontram na rede em

funcionamento. Os valores são: 20 dBm para a potência de saída, 24 dBi para o ganho da antena direcional, 2,4 Ghz para a frequência e 5 dB de perda devido a cabos e conectores. O parâmetro relativo a perdas diversas não será utilizado. Deve-se ressaltar que o ganho da antena mencionado se refere ao ângulo de ganho máximo.

A base de dados de elevações, utilizada para análise de obstáculos, foi obtida através do *site* de monitoramento por satélite da EMBRAPA². Esta base de dados está codificada em um formato de arquivo conhecido como GeoTIFF, utilizado para armazenamento de informações geográficas.

5.1. Métricas

Para analisar os resultados obtidos, métricas de comparação devem ser definidas. Nem sempre os melhores valores de uma métrica, significam os melhores valores de outra. Podemos citar como exemplo a relação entre a potência do sinal e a interferência intra-fluxo. Esta interferência é causada pelo sinal recebido de transmissões de outros nós que não fazem parte do enlace em questão (Figura 9). Quanto mais roteadores forem adicionados, maior será a potência do sinal recebido devido a proximidade entre eles, porém existirá uma maior interferência intra-fluxo.

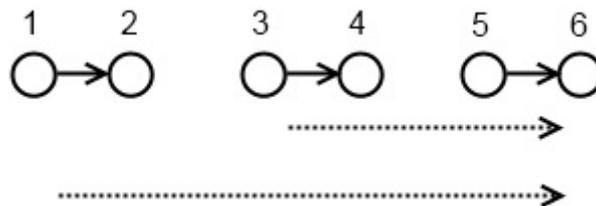


Figura 9. A comunicação entre os pontos 5 e 6 recebe os sinais das comunicações entre os pares 1,2 e 3,4.

Para avaliar o LMP, serão utilizadas cinco métricas: quantidade de roteadores, potência do sinal médio, menor potência de sinal recebida, interferência intra-fluxo e a taxa máxima de transferência no pior enlace. A quantidade de roteadores é a métrica que o LMP objetiva minimizar respeitando o limiar estabelecido. A potência do sinal médio recebido é calculada somando, para cada par de antenas diretamente alinhadas, a potência do sinal entre elas e dividindo este somatório pela quantidade de pares. A menor potência de sinal recebida é o valor do sinal mais fraco formado por um par de antenas diretamente alinhadas. A interferência intra-fluxo é a métrica mais difícil de ser calculada. Isto, porque não se pode estabelecer a priori quais enlaces serão formados e que transmissões simultâneas ocorrerão. Variáveis diversas, como o algoritmo de roteamento, implicam na formação da topologia. O ideal é que o enlace seja formado por um par de antenas diretamente alinhadas. Para que um comparativo seja estabelecido, será necessário definir a formação dos enlaces. Como o objetivo do algoritmo é construir uma solução a fim de minimizar a quantidade de roteadores, a redundância não é um fator levado em consideração. Desta forma, a incidência de redundâncias será pequena, o que torna viável considerar os pares de antenas diretamente alinhadas como um enlace. Com esta abordagem, a interferência intra-fluxo será analisada de duas maneiras: através da média da

²www.relevobr.cnpm.embrapa.br

interferência na rede e comparando a interferência mais forte sofrida em um enlace. Já que as métricas de qualidade do sinal e interferência foram definidas, é possível estabelecer a relação sinal-ruído e com isto estimar a taxa de transferência. Para a comparação das soluções, será estimada a taxa máxima no enlace que possui o sinal mais fraco.

Como descrito anteriormente, a interferência intra-fluxo é causada pela potência do sinal das comunicações dos outros enlaces da rede. Para calcular esta interferência, será estabelecido um cenário de pior caso, ou seja, será considerado que todas comunicações possíveis anteriores ao receptor estejam ativas. Na Figura 9 a interferência recebida por 6 será a causada pelas transmissões de 1 para 2 e de 3 para 4. Este é um cenário de pior caso, pois nem sempre todas as comunicações possíveis ocorrem simultaneamente.

Outra métrica definida foi a taxa máxima de transferência no pior enlace da rede. Para determinar qual taxa será viável para o enlace, será analisada a taxa de erro de pacote (*Packet Error Rate - PER*) para a relação sinal-ruído. Esta taxa de perda será calculada de acordo com a seguinte equação:

$$PER = \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{SNR-a}{b\sqrt{2}}\right)}{2}, \quad (4)$$

onde SNR é a relação sinal-ruído e $\operatorname{erf}(x)$ é a *Função Erro* [Passos and Albuquerque 2010]. Os parâmetros a e b são constantes para determinada combinação de taxa de transferência e tamanho de quadro. Tanto a função apresentada quanto os parâmetros a e b foram definidos em [Passos and Albuquerque 2010]. Será considerada a taxa máxima de transferência, a maior destas que possua um $PER \leq 1\%$.

5.2. Comparativo entre a solução manual e a do LMP

Dentre as três soluções manuais existentes, será utilizada aquela que possui o mesmo objetivo do LMP: minimizar a quantidade de roteadores. Da mesma forma que o LMP, a solução manual também foi construída com a ideia de se respeitar um valor mínimo de qualidade de sinal. O valor utilizado para esta solução foi de -75 dBm, que também será utilizado como limiar para o LMP. As métricas definidas anteriormente foram calculadas para ambas as soluções e um comparativo pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação das métricas entre solução manual e do algoritmo LMP.

	LMP	Manual
Quantidade de Roteadores	10	16
Sinal Médio	-54,15 ± 3,33 dBm	-46,84 ± 9,60 dBm
Pior Sinal	-56,87 dBm	-58,07 dBm
Média da Interferência	-65,73 ± 1,15 dBm	-61,97 ± 4,97 dBm
Interferência Mais Forte	-64,06 dBm	-52,22 dBm
Taxa Máxima no Pior Enlace	12 Mbps	6 Mbps

Como se pode analisar pelos resultados das métricas, o LMP encontrou uma solução que garante as mesmas propriedades da manual utilizando uma quantidade de roteadores inferior. Como era de se esperar a média do sinal da solução com mais roteadores foi maior que a apresentada pelo LMP. Isto porque a maior quantidade de roteadores

acaba implicando em uma proximidade maior entre eles, resultando em áreas com uma qualidade de sinal elevada. Além da média dos sinais, foi calculado o desvio padrão para esses valores. Para a solução do LMP o valor do desvio padrão foi de 3,33 dBm, enquanto a solução manual apresentou o valor de 9,60 dBm. Apesar da solução manual apresentar uma média superior, a discrepância entre os sinais é maior. Esta discrepância pode ser observada pelo pior sinal da solução manual que é bem inferior a média, enquanto na solução do LMP a diferença entre os dois valores é pequena.

Com os resultados da interferência, pode-se perceber o impacto que uma métrica possui sobre a outra. A maior quantidade de roteadores da solução manual resultou em uma qualidade de sinal média superior (apesar de não uniformemente distribuída), mas trouxe consigo uma média de interferência mais elevada. O desvio padrão sobre as interferências resultou em 1,15 dBm para a solução do LMP e 4,97 dBm para a manual. É possível observar que além de inferior, a interferência do LMP é mais uniforme. Novamente, esta diferença pode ser observada pelos valores de interferência mais forte calculada para ambas as soluções.

Outra métrica definida presente na Tabela 1 é a taxa máxima de transmissão no pior enlace da rede. Para esta métrica, foi calculada para cada taxa de transmissão disponível a taxa de erro de pacote (Eq. 4) e escolhido a maior taxa de transferência onde $PER \leq 1\%$. O tamanho do quadro utilizado foi o de 1500 bytes. Pelos resultados obtidos, a taxa máxima no pior enlace da rede foi maior para o LMP (12 Mbps) do que a encontrada para a solução manual (6 Mbps). Isto se deve a uma menor interferência e a um sinal mais forte, resultando em uma relação sinal-ruído superior.

5.3. Algoritmo por distância

Devido a escassez de soluções manuais, o LMP será comparado com outras técnicas simples de escolha do local de instalação dos roteadores. Uma forma de realizar esta escolha é através do comprimento do enlace. Sabendo o alcance da antena, escolhe-se o próximo local como sendo aquele cuja distância seja a máxima dentro da área de cobertura. Foram executadas instâncias deste algoritmo por distância com diferentes comprimentos. A linha de transmissão e a solução do LMP a serem utilizadas serão as mesmas apresentadas no comparativo com a solução manual. A Tabela 2 apresenta os valores das métricas para as soluções encontradas.

Tabela 2. Apresentação das métricas do algoritmo por distância.

	LMP	5Km	5,5Km	6Km
Quantidade de Roteadores	10	9	8	7
Sinal Médio	-54,15 dBm	-54,98 dBm	-56,21 dBm	-58,02 dBm
Pior Sinal	-56,87 dBm	-56,68 dBm	-57,67 dBm	-58,34 dBm
Média da Interferência	-65,73 dBm	-66,49 dBm	-66,89 dBm	-68,68 dBm
Interferência Mais Forte	-64,06 dBm	-64,39 dBm	-64,24 dBm	-67,75 dBm
Coordenadas não cobertas	0	1	9	4

Apesar das soluções do algoritmo por distância apresentarem resultados similares ou até mesmo superiores ao do LMP, este apresenta uma característica que o primeiro não possui: a garantia de cobertura. Para determinar se todos os pontos entre dois roteadores estão sendo cobertos, cada um deverá ter um sinal, calculado através do

Link Budget, superior ao limiar para pelo menos um dos roteadores e a comunicação deve estar livre de obstáculos. Pelos resultados apresentados, pode-se perceber que o correto posicionamento dos roteadores é fundamental para garantir a cobertura de todas as coordenadas. Esta afirmativa é válida já que com a distância de 6 quilômetros entre cada roteador, a quantidade de coordenadas cobertas foi superior comparada a distância de 5,5 quilômetros, apesar desta solução possuir uma quantidade maior de roteadores. Como o LMP realiza análise de obstáculos e garantia de qualidade de sinal, impedindo comunicações que deixem pontos descobertos, a cobertura é total.

5.4. Variando o limiar do LMP

Nesta seção, será utilizada a segunda linha de transmissão citada (Açaílandia-Imperatriz) para uma comparação das soluções do LMP para diferentes valores de limiar. Como já explicado anteriormente, este limiar está relacionado a sensibilidade do rádio a ser utilizado na construção da rede. Assim, dependendo de suas características, soluções serão construídas de acordo. As métricas das soluções para diferentes valores de limiar estão localizadas na Tabela 3.

Tabela 3. Comparação das métricas para diferentes valores de limiar.

	-70 dBm	-75 dBm	-80 dBm	-85 dBm
Quantidade de Roteadores	24	17	10	6
Sinal Médio	-48,68 dBm	-51,45 dBm	-55,44 dBm	-60,15 dBm
Pior Sinal	-52,67 dBm	-56,63 dBm	-61,62 dBm	-66,16 dBm
Média da Interferência	-58,49 dBm	-62,55 dBm	-70,46 dBm	-80,49 dBm
Interferência Mais Forte	-55,03 dBm	-57,13 dBm	-64,27 dBm	-74,59 dBm

Como era de se esperar, quanto menor a sensibilidade, maior a quantidade de roteadores *mesh* que a rede possuirá. Uma maior quantidade traz, porém, um maior nível de interferência. Assim como os resultados apresentados na Subseção 5.2, a solução encontrada pelo algoritmo tende a ser uniforme, já que o pior sinal encontrado para cada um dos limiares é bem próximo da média do sinal. O mesmo pode ser dito sobre a interferência. Os valores mais altos encontrados não se afastam muito da média.

6. Conclusões

Neste artigo foi discutido o planejamento de redes em malha sem fio lineares e proposto o algoritmo LMP cujo objetivo é minimizar o número de roteadores *mesh* instalados. A escolha do local de instalação dos roteadores deve garantir cobertura e conectividade para toda a rede. Como o foco do LMP é a utilização de antenas direcionais, o alinhamento destas é fator fundamental para garantir as duas propriedades apresentadas. Com o intuito de escolher o alinhamento das antenas, foi desenvolvida a heurística de escolha do melhor vizinho. Um outro fator que influencia o alinhamento das antenas é a presença de obstáculos. Para solucionar o problema de como determinar a existência de obstáculos, foi utilizado uma base de dados contendo, para as coordenadas de uma região, a elevação de cada uma.

Para avaliar o resultado obtido com o LMP, este foi comparado com uma solução manual projetada para a rede em malha sem fio em operação sobre a linha de transmissão que liga Campos Novos à Machadinho assim como uma outra técnica simples baseada

em distância. Para o primeiro caso, o LMP conseguiu construir uma solução que utilizou menos roteadores e obteve uma menor interferência e uma maior taxa de transmissão no pior enlace. Em relação à técnica por distância, foi mostrado que esta não garante a cobertura total dos pontos, o que é alcançado pelo LMP. A segunda linha de transmissão (Açailândia-Imperatriz) foi utilizada para comparar as soluções encontradas pelo LMP para diferentes valores de limiar.

A principal vantagem do algoritmo proposto é a utilização de informações reais para escolha da solução. A área de cobertura é calculada de acordo com dados reais da antena e do rádio, e não apenas uma aproximação por distância. Os dados de entrada do algoritmo são coordenadas em latitude e longitude, e estas informações permitem ao algoritmo, com auxílio de uma base de dados de elevações, localizar os obstáculos existente entre duas coordenadas. Dadas estas informações, a solução é construída considerando o cenário real e as restrições de cobertura e conectividade.

Referências

- Amaldi, E., Capone, A., Cesana, M., Filippini, I., and Malucelli, F. (2008). Optimization models and methods for planning wireless mesh networks. *Comput. Netw.*, 52(11):2159–2171.
- Chebrolu, K. and Raman, B. (2007). Fractal: a fresh perspective on (rural) mesh networks. In *NSDR '07: Proceedings of the 2007 workshop on Networked systems for developing regions*, pages 1–6, New York, NY, USA. ACM.
- Chen, C. and Chekuri, R. (2007). Urban wireless mesh network planning: The case of directional antennas. Technical Report UIUCDCS-R-2007-2874, University of Illinois at Urbana-Champaign Computer Science Department.
- Gerk, L., Passos, D., Muchaluat-Saade, D. C., and Albuquerque, C. (2009). Infra-estrutura de comunicação em malha sem fio para supervisão e controle de sistemas de transmissão de energia. In *Espaço Energia*, volume 10, pages 1–10.
- Kumar, U., Gupta, H., and Das, S. (2006). A topology control approach to using directional antennas in wireless mesh networks. volume 9, pages 4083–4088.
- Passos, D. and Albuquerque, C. (2010). Implementação e análise prática de desempenho do mecanismo mara em redes em malha sem fio. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC 2010)*.
- Valle, R., Passos, D., Albuquerque, C., and Muchaluat-Saade, D. C. (2008). Mesh topology viewer (mtv): an svg-based interactive mesh network topology visualization tool. In *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2008)*.