

# Infraestrutura de comunicação em malha sem fio para supervisão e controle de sistemas de transmissão de energia

## Wireless mesh communication infrastructure for supervising and controlling energy transmission systems

Livia Ferreira Gerck  
Diego Passos  
Débora Christina Muchaluat Saade  
Célio Vinicius Neves de Albuquerque

Universidade Federal Fluminense  
livia@midia.com.uff.br  
dpassos@ic.uff.br  
debora@midia.com.uff.br  
celio@ic.uff.br

**Abstract:** This paper presents the design and evaluation of a wireless mesh communication infrastructure that supports supervision and control of energy transmission systems in the context of the REMOTE Project. The paper discusses the most important objectives of the project and its current research and development stage. It also gives an overview of the research area on which the project is based, its characteristics and challenges in this new environment. In addition, it presents mesh network performance results generated from the simulation of energy transmission supervision and control applications, transmitting data, voice and video streams over the wireless infrastructure.

**Keywords:** Wireless mesh networks, energy transmission systems, supervising and control applications, routing metrics, RTS/CTS mechanism

**Resumo:** Este artigo apresenta o projeto e a avaliação de uma infraestrutura de comunicação em malha sem fio para suporte à supervisão e controle de sistemas de transmissão de energia no

contexto do Projeto REMOTE<sup>1</sup>. O artigo discute os objetivos principais do projeto e sua etapa atual de pesquisa e desenvolvimento. Fornece uma visão geral da área de pesquisa na qual o projeto se baseia, suas características e desafios neste novo cenário de uso. Além disso, apresenta resultados de desempenho da rede em malha obtidos através de simulações de cenários que modelam o uso da infraestrutura sem fio para aplicações de supervisão e controle de linhas de transmissão de energia, considerando transmissão de dados, voz e vídeo.

**Palavras-Chave:** Redes em malha sem fio, sistemas de transmissão de energia, aplicações de supervisão e controle, métricas de roteamento, mecanismo de RTS/CTS

### 1 Introdução

Redes em malha ou *mesh* são redes sem fio autoconfiguráveis que interconectam um conjunto de nós fixos capazes de repassar pacotes de dados entre si encaminhando-os ao seu destino através de múltiplos saltos via enlaces sem fio. Os nós de uma rede *mesh* utilizam normalmente a tecnologia IEEE 802.11 em modo *ad hoc* e constroem uma malha sem fio para transmissão de dados em faixa larga em localidades onde não existe infraestrutura física ou onde o custo de comunicação por outras redes é elevado. Redes do tipo *mesh* possuem a vantagem de serem redes de baixo custo, fácil implantação e bastante tolerantes a falhas.

Recentemente, essas redes têm sido alvo de estudo de grandes empresas fornecedoras de equipamentos de rede e operadoras de telecomunicações e de instituições acadêmicas. Dentre as aplicações implementadas estão o fornecimento de acesso banda larga dentro dos campi das universidades e para as comunidades próximas e a criação de cidades digitais, permitindo também a inclusão digital. As redes *mesh* oferecem menor custo de infraestrutura, pois requerem menor número de pontos de acesso às redes cabeadas (Internet), proporcionando conectividade a uma área muito maior que as redes sem fio tradicionais.

Inspirado nos testes piloto de redes *mesh* de comunicação de dados ao redor do mundo, o projeto REMOTE propõe a implantação de uma rede do tipo *mesh* para fornecer uma infraestrutura de comunicação em malha sem fio para supervisão e controle de linhas de transmissão de energia, em particular em áreas sem nenhuma infraestrutura alternativa de comunicação, como nos sistemas de transmissão na região amazônica, nos estados do Pará e Maranhão, sob

<sup>1</sup> O Projeto REMOTE é financiado pela TBE/Aneel e pelas agências CNPq, Capes e Faperj.

concessão da Empresa Amazonense de Transmissão de Energia - EATE.

A supervisão e o controle de sistemas de transmissão de energia requerem comunicações entre sensores, técnicos operadores e centrais de controle, com conectividade ao longo de toda a rede de energia. Uma alternativa de conectividade é o uso de canais de satélite, porém de custo proibitivo.

Este artigo apresenta os conceitos principais da tecnologia na qual o Projeto REMOTE se baseia, seus campos de pesquisa e alguns resultados que demonstram a viabilidade técnica da proposta de implementação. A Seção 2 dá uma visão geral sobre as características e desafios das redes em malha sem fio. Na Seção 3, o projeto REMOTE é apresentado com maiores detalhes, além de seus objetivos, fases de desenvolvimento e etapa atual. Na Seção 4 estão descritos os cenários de testes utilizados nas simulações de uma infraestrutura de rede em malha sem fio para aplicações de supervisão e controle de uma linha de transmissão de energia e a Seção 5 mostra os resultados de desempenho da rede obtidos com a ferramenta de simulação NS2. A Seção 6 indica as futuras áreas de pesquisa e conclui este trabalho.

## 2 Redes em Malha sem Fio

Redes em malha sem fio ou redes *mesh* [1] são redes com topologia dinâmica e de crescimento orgânico constituídas por nós cuja comunicação, no nível físico, é feita através de uma das variantes dos padrões IEEE 802.11 e 802.16 e cujo roteamento é dinâmico.

Essas redes, ao contrário das redes *ad hoc* do padrão IEEE 802.11, não costumam enfrentar restrições referentes à mobilidade e ao consumo de energia, pois normalmente os nós têm localização fixa e podem ser facilmente alimentados, **tornando-se** capazes de prover maior largura de banda, confiabilidade e redundância.

A ausência da necessidade de cabeamento entre os pontos de acesso oferece baixo custo e rapidez de implantação da rede em malha. Através da troca de informações entre os nós, a rede descobre seus elementos e rotas e se configura automaticamente, reduzindo também os custos e esforços de administração e manutenção da rede.

A característica fundamental das redes *mesh* [2] é o encaminhamento através de múltiplos saltos. A cobertura da rede é estendida alcançando longas distâncias em uma série de saltos [3]. Os nós intermediários não só regeneram o sinal como também tomam decisões de encaminhamento baseadas no conhecimento da rede.

A topologia em malha, em oposição à topologia em estrela das redes sem fio infraestruturadas, oferece maior robustez devido aos múltiplos caminhos para cada destino e à recuperação automática de falhas nesses caminhos.

Os nós *mesh* são pontos de acesso sem fio que incorporam as funções de roteamento, segurança, dentre outras, e alguns deles funcionam como *gateways* para interconexão com outras redes. Normalmente, o tráfego flui de e para estes *gateways*. A Figura 1 mostra um exemplo de topologia de uma rede em malha.

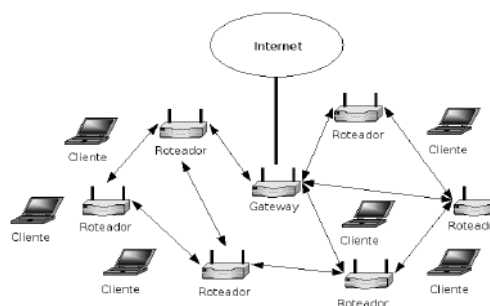


Figura 1: Exemplo de Topologia de Rede em Malha sem fio.

Existem duas abordagens para a implementação de redes *mesh*: através de protocolos de roteamento *ad hoc* no nível de rede (nível 3), e através de encaminhamento em múltiplos saltos no nível de enlace (nível 2).

A **primeira abordagem** tem sido utilizada nas diversas implementações em universidades, a **exemplo** da Universidade Federal Fluminense (UFF) [4] e do Massachusetts Institute of Technology (MIT) [5], e nas chamadas cidades digitais, como as desenvolvidas em Filadélfia, Taipei e Dublin. Grandes fabricantes de equipamentos de rede, como Cisco e Nortel já anunciam produtos que implementam este tipo de solução.

A segunda abordagem está sendo padronizada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), no padrão IEEE 802.11s [6], e propõe novos mecanismos de seleção de caminhos na rede em malha, incorporando o encaminhamento em múltiplos saltos ao nível 2 (camada MAC – *Medium Access Control*).

### 2.1 Protocolos e Métricas de Roteamento

Protocolos de roteamento são responsáveis por selecionar o melhor caminho para um determinado destino, de acordo com algum critério definido pela métrica de roteamento.

Nas implementações de redes em malha com encaminhamento em múltiplos saltos em nível 3 desenvolvidas em centros de pesquisa têm sido utilizados protocolos de redes *ad hoc* tradicionais, como OLSR (*Optimized Link State Routing*) [7], AODV (*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*) [8] e DSR (*Dynamic Source Routing*) [9], e variações destes desenvolvidas dentro dos projetos, como Srcr do projeto RoofNet [5] e HSLs (*Hazy Sighted Link State*) [10] do projeto CUWin.

O OLSR, utilizado nos projetos VMesh da Grécia [11] e ReMesh da UFF [4], é um protocolo pró-ativo, ou seja, que mantém rotas para todos os destinos da rede, independente da sua demanda, e é baseado em estado de enlaces.

O AODV é um protocolo reativo, ou seja, que descobre rotas para os destinos apenas em função da demanda de tráfego, e é baseado em vetor de distâncias.

O protocolo Srcr do projeto RoofNet, por sua vez, é um protocolo híbrido que combina algoritmos de estado de enlaces com a técnica de descoberta de rotas do protocolo DSR, reativo.

A adoção destes protocolos tradicionais de redes *ad hoc* para redes em malha não é totalmente adequada em função de alguns fatores, quais sejam: a grande quantidade de pacotes de controle utilizados em função da mobilidade das redes *ad hoc*, as quais não ocorrem com tanta frequência nas redes em malha; a variabilidade das taxas de transmissão, fazendo com que a capacidade de processamento de pacotes de cada nó varie ao longo do tempo; e, por fim, a sensibilidade a interferências externas ocasionando perdas de pacotes e o aumento do atraso fim-a-fim.

Uma abordagem para tratar estes fatores é a escolha de uma métrica de roteamento que reflita melhor as características dos enlaces entre os nós.

Uma métrica de roteamento [12] pode ser definida como forma de classificar as rotas dentro de uma rede, determinando um critério de decisão para o melhor caminho entre dois nós. Essa tarefa é composta da avaliação individual dos enlaces, atribuindo-lhes os pesos correspondentes, e da definição de uma função de determinação do peso total do caminho. Em geral, tais funções são definidas com o objetivo de representar alguma grandeza que tenha relação direta com o desempenho, como latência, vazão ou perda de pacotes. Desta forma, o melhor caminho é aquele que minimiza ou maximiza esta grandeza.

Os protocolos tradicionais, em geral, utilizam a contagem de saltos (HOP) como métrica. Pode-se considerar que tais protocolos atribuem o mesmo peso unitário para qualquer enlace da topologia. A

única informação necessária para sua implementação é a da vizinhança de cada nó, obtida através do envio periódico de pacotes de *broadcast*.

É uma abordagem simples e de baixo custo; porém, que deixa de considerar vários aspectos relacionados à qualidade dos enlaces, como a distância entre os nós, obstáculos, interferências, dentre outros. No caso de redes em malha, como normalmente os nós são estáticos, a adoção desta métrica faz com que as rotas entre quaisquer nós da rede sejam sempre as mesmas, independente das condições do ambiente que variam com o tempo.

De modo a tentar contornar tais desvantagens, este trabalho destaca três outras métricas que têm por objetivo, respectivamente, maximizar a vazão e minimizar a latência e a perda de pacotes. O estudo do efeito e a comparação destas métricas e da tradicional métrica de contagem de saltos são discutidos na Seção 5.

A métrica ETX (*Expected Transmission Count*), proposta em [13], tem por objetivo aumentar a vazão na rede. Para isto, a proposta é reduzir o número de transmissões no nível de enlace, ao longo do caminho. Assim, o ETX de um caminho é a soma dos inversos das probabilidades de sucesso na transmissão de um pacote por cada enlace que compõe o caminho. O menor valor de ETX define o melhor caminho. Para inferir tais probabilidades são utilizados pacotes de controle enviados em *broadcast* e verificada a quantidade de sucessos na transmissão em ambos os sentidos do enlace. O critério de desempate é o caminho com menor número de saltos.

Um problema da métrica ETX é que ela não considera a taxa de transmissão dos dados na sua determinação da probabilidade de sucesso, visto que utiliza pacotes de *broadcast* que são transmitidos na taxa básica. Uma extensão desta métrica é a métrica ETT (*Expected Transmission Time*) [14] que considera a taxa de transmissão na avaliação da qualidade dos enlaces. Seu objetivo é selecionar o caminho de menor atraso, combinando o ETX de cada enlace com a taxa de transmissão do nó. Assim o ETT de um caminho é dado pela soma dos ETX's de cada enlace multiplicados pelas razões entre o tamanho de um pacote de *probe* e a taxa de transmissão utilizada pelo nó.

A métrica ML (*Minimum Loss*) [12] também se baseia na ETX, porém, considera o produto das probabilidades de sucesso de cada enlace que compõe um caminho na seleção da melhor rota. O caminho cuja métrica mais se aproxima de 1, o enlace perfeito, é escolhido. Seu objetivo é minimizar a perda de pacotes. Sua implementação é bastante semelhante à da métrica ETX. No

entanto, se métrica ETX tende a escolher caminhos mais curtos, reduzindo a autointerferência entre os nós, a métrica ML tende a selecionar caminhos mais longos, porém, com enlaces de melhor qualidade, ou seja, com menor probabilidade de perda.

## 2.2 Mecanismo RTS/CTS

Um problema comum em redes *ad hoc* e que se torna ainda mais crítico em redes em malha é o chamado “problema do terminal escondido”.

Em redes sem fio não é possível realizar a detecção de colisões, que ocorre quando dois nós transmitem simultaneamente, por dois motivos [15]:

- os rádios não são capazes de transmitir e receber ao mesmo tempo e
- não é possível garantir que todos os nós “escutem” as transmissões uns dos outros.

Para contornar essas limitações, o padrão IEEE 802.11 utiliza o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), o qual tenta evitar colisões através da verificação do meio (*physical carrier sense*) — antes do início da transmissão ou durante espera, por tempo aleatório, quando o meio está ocupado ou quando ocorreu uma colisão (*backoff*) — e que detecta a ocorrência de colisões através da ausência do reconhecimento positivo dos pacotes recebidos (*acknowledgement*).

Ainda assim, pode ocorrer de um nó detectar o meio livre apesar de haver uma transmissão em curso, pelo fato da origem desta transmissão estar fora do raio de sensibilidade do rádio deste nó. Ao detectar o meio livre e iniciar sua transmissão, ocorrerá uma colisão. Isso caracteriza o problema do terminal escondido. A Figura 2 ilustra este cenário, onde o nó B está ao alcance dos nós A e C, porém A e C estão fora do alcance um do outro. Caso A e C transmitam simultaneamente, uma colisão ocorrerá em B.

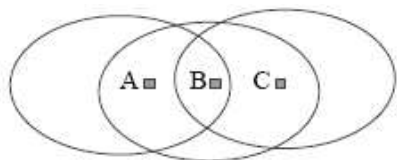


Figura 2: Problema do Terminal Escondido.

Para tentar solucionar este problema, o padrão prevê o uso do mecanismo de RTS/CTS (*Request to Send / Clear to Send*), conhecido como um *virtual carrier sense*, por meio do qual é feita uma

“reserva” do meio. Este mecanismo utiliza um par de pacotes de controle (RTS e CTS) contendo a duração total da comunicação para sinalizar aos nós da vizinhança da origem e do destino sobre a transmissão, minimizando o custo da retransmissão de dados em caso de colisão.

Os benefícios e desvantagens do uso do mecanismo de RTS/CTS também são investigados na Seção 5.

## 2.3 Influência do Número de Saltos

Devido ao protocolo de acesso ao meio CSMA/CA, enquanto um nó está transmitindo, seus vizinhos não podem iniciar uma transmissão.

Considerando uma topologia em malha, os pacotes de um mesmo fluxo competem entre si pelo acesso ao meio, visto que ao entregar um pacote para o próximo nó do caminho, a transmissão do pacote seguinte disputará o meio com o encaminhamento do próprio pacote anteriormente transmitido.

Com isso, em uma rede sem fio há a tendência de queda exponencial da vazão em função do número de saltos entre a origem e o destino de uma transmissão [12].

## 3 Projeto REMOTE

Em junho de 2007, a Empresa Amazonense de Transmissão de Energia S.A. (EATE) e a Empresa Norte de Transmissão de Energia (ENTE), em parceria com a UFF, iniciaram pesquisas em soluções para infraestrutura de comunicação em malha sem fio para supervisão e controle de sistemas de transmissão de energia.

O projeto REMOTE (REde de MONitoramento para linhas de Transmissão de Energia) [16] tem como objetivo principal demonstrar, na forma de prova de conceito, a viabilidade de uma rede de comunicação faixa larga sem fio do tipo malha (*mesh*) para supervisão e comunicação ao longo de linhas de transmissão de energia localizadas em áreas carentes de infraestrutura de comunicação. O modelo de rede proposto é ilustrado na Figura 3. A rede sem fio permite a comunicação entre técnicos que estão trabalhando em campo ao longo da linha e a transmissão de dados e vídeo de sensores instalados nas torres de transmissão para uma estação de controle da linha.

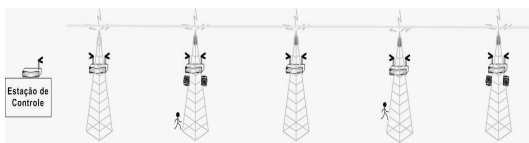


Figura 3: Modelo da rede sem fio para linhas de transmissão de energia.

A proposta envolve a construção de um protótipo de roteador *mesh* sem fio de baixo custo, um protocolo de roteamento *ad hoc* sem fio que melhore o desempenho da rede *mesh* no cenário específico ao longo das linhas de transmissão de energia e uma solução de qualidade de serviço para a rede *mesh*. O custo total da solução depende de decisões de *hardware* ainda em fase de estudos. No entanto, o custo projetado por ponto instalado gira em torno de US\$ 900,00, sendo US\$ 400,00 estimado para o kit de alimentação. Este valor é bastante inferior ao necessário para a implantação de uma infraestrutura cabeada ao longo de toda a linha, por exemplo.

A partir dessa infraestrutura de comunicação será possível oferecer conectividade a técnicos operadores que estiverem em campo executando reparos e manutenção, através de serviços de transmissão de dados, voz e vídeo, com diferenciação de qualidade de serviço de acordo com os requisitos do tipo de aplicação, além de viabilizar o uso de sensores, inclusive de robôs de inspeção, nas linhas de transmissão e sua conectividade a centrais de controle de forma a permitir a supervisão automatizada do sistema elétrico. Como exemplo desta última aplicação, câmeras de monitoramento patrimonial e de vegetação podem ser instaladas nas torres de transmissão enviando suas imagens a uma central de controle.

O projeto REMOTE serve como suporte a uma gama de outros projetos em desenvolvimento por fornecer infraestrutura de comunicação que pode ser usada por inúmeras aplicações.

### 3.1 Desafios

Redes *mesh* já foram propostas para formar redes de comunicação comunitárias e corporativas. No entanto, não existe na literatura nenhum relato de proposta de uma rede *mesh* como infraestrutura para o controle de linhas de transmissão de energia. Alguns dos desafios envolvem o estabelecimento de enlaces de comunicação sem fio confiáveis mesmo na presença de:

- (a) interferência proveniente de indução eletromagnética de linhas de alta tensão (500KV);

- (b) carência de fonte de energia para os elementos comunicantes (roteadores);
- (c) condições climáticas adversas como altas temperaturas e umidade;
- (d) fatores como descargas elétricas, queimadas, vandalismo, acesso difícil, dentre outros.

Conforme discutido na seção anterior, alguns desafios de implementação relacionados às próprias características das redes em malha envolvem a escolha de um protocolo de roteamento mais adequado bem como métricas que melhor classifiquem e selecionem o caminho ideal para o tráfego, ajuste/otimização de parâmetros para comunicação através do padrão IEEE 802.11, como o uso ou não do mecanismo de RTS/CTS, e a diferenciação da qualidade de serviço em função do tipo de tráfego da rede.

A escolha da topologia adequada e do melhor posicionamento dos *gateways* e a priorização do tráfego de acordo com seus requisitos específicos, dentre outros, desempenham um papel importante.

Experimentos iniciais indicam que a indução eletromagnética das linhas de transmissão não gera harmônicos na frequência de 2,4GHz. Sendo assim, o Projeto REMOTE considera o uso de antenas direcionais na frequência de 2,4GHz em roteadores sem fio instalados em cada torre de transmissão com potência suficiente para que os nós se comuniquem tanto com seus vizinhos de um salto como com seus vizinhos a dois saltos, de modo a oferecer redundância, mantendo a conectividade mesmo face à falha em um nó. Essa configuração de conectividade cria a malha sem fio. Para acesso local de sensores e técnicos operadores, será utilizado acesso WiFi tradicional na frequência de 2,4GHz.

As distâncias médias entre as torres de transmissão são de 500 metros e formam uma topologia aproximadamente em linha. Painéis de energia solar e baterias serão utilizados para prover autonomia aos roteadores sem fio. Os equipamentos serão armazenados em uma caixa hermética de modo a protegê-los da influência das condições climáticas e oferecendo robustez de forma a minimizar a manutenção física necessária, devido principalmente à dificuldade de acesso aos locais de instalação. Tais caixas herméticas serão projetadas de modo a funcionar como uma Gaiola de Faraday, evitando a descarga das baterias em função da indução eletromagnética.

### 3.2 Etapas de Desenvolvimento

O desenvolvimento do projeto inclui a pesquisa e implementação do protótipo de roteador *mesh* sem

fio e a implantação de uma rede *mesh* de teste para medir o desempenho, validar e aperfeiçoar os protótipos desenvolvidos. Como um possível cenário de testes, considera-se a linha de transmissão ACA-IPZ entre as localidades de Açailândia, no Pará, e Imperatriz, no Maranhão, sob concessão da EATE.

Os objetos da pesquisa são os protocolos de roteamento em modo *ad hoc*, técnicas de transmissão WiFi em longas distâncias e o impacto da indução eletromagnética nas comunicações e equipamentos de rádio. Estão sendo implementados os diversos componentes de um protótipo de roteador para a rede *mesh*, incluindo o *hardware*, o sistema operacional, o *firmware*, os algoritmos de roteamento, os rádios, as antenas, fontes de energia solar e invólucro hermeticamente seguro. Além do protótipo, mecanismos de autenticação de usuários e de criptografia dos dados serão estudados.

Simulações e análises estão sendo realizadas na primeira fase de estudo e investigação com o objetivo de definir os parâmetros configuráveis mais adequados para a solução proposta. Entretanto, paralelamente, os diversos componentes de *hardware* e *software* do projeto já estão sendo desenvolvidos, implementados e testados.

No estágio atual do projeto algumas das decisões de *hardware* e *software* já foram estabelecidas. Em termos de *hardware* optou-se pela utilização de roteadores sem fio programáveis, de forma que os algoritmos de roteamento *ad hoc* e de garantia de qualidade de serviço possam ser implementados. Como sistema operacional foi definido o uso do OpenWrt [17], uma distribuição de *software* livre compacta do sistema operacional Linux que se apresenta flexível o suficiente para a instalação de diversos protocolos de roteamento.

O OpenWrt é compatível com as implementações existentes do protocolo de roteamento *ad hoc* OLSR que está sendo testado no protótipo. Este sistema operacional requer apenas cerca de 2MB de armazenamento, executa em processadores de 125 MHz com 16 MB de RAM e pode ser executado em diversos roteadores sem fio comerciais e de baixo custo. Neste protótipo, o *hardware* base utilizado é o roteador sem fio Linksys da família WRT (54G, 54GS e 54GL), compatível com o sistema OpenWrt.

Ainda nesta fase do projeto serão definidos os demais componentes de *hardware* e *software*, como a antena e a métrica de roteamento, respectivamente. Será também realizada uma validação da viabilidade técnica da proposta, baseada em medidas de capacidade, atraso, *jitter*, alcance, estabilidade e imunidade à interferência eletromagnética da rede *mesh*.

Nas Seções 4 e 5, a seguir, são apresentados alguns dos resultados referentes às pesquisas iniciais da solução de rede proposta.

#### 4 Cenários de Testes

A topologia usada para modelar a conectividade entre elementos de uma linha de transmissão é linear com os nós de comunicação igualmente separados entre si. Para estes testes foram dispostos 15 nós espaçados a 100 metros entre si. Este número de nós foi o previsto no projeto REMOTE para instalação inicial da infraestrutura de comunicação sem fio na linha de transmissão de energia. O modelo se baseou no padrão IEEE 802.11b, com taxa de transferência de dados de 11Mbps e sem mecanismo de adaptação dinâmica da taxa.

A Figura 4 mostra a topologia utilizada nas simulações. O raio de transmissão de cada nó é de 250 metros. Com isso, cada nó consegue se comunicar diretamente com 2 vizinhos à esquerda ou à direita, conforme premissa do projeto.

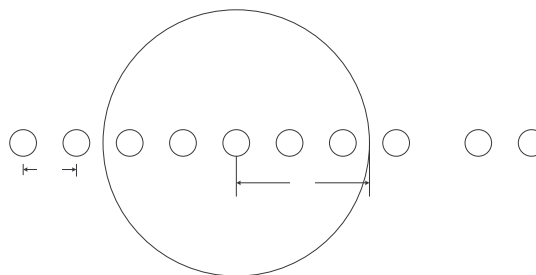


Figura 4: Topologia do cenário de testes.

Um dos nós representa o *gateway* de interconexão da rede *mesh* com a Internet ou com a rede corporativa da EATE, por exemplo. A influência da posição desse nó na capacidade da rede também foi alvo do estudo.

Foram escolhidas as seguintes aplicações para compor os cenários de teste:

- transferência de arquivos ou outro tipo de informação enviada por uma aplicação de supervisão da linha de transmissão para a rede corporativa ou uma central de controle. Este tipo de aplicação foi modelado por fluxos FTP rodando sobre o protocolo de transporte TCP.
- transmissão de voz sobre IP (VoIP) entre técnicos operadores em campo e entre estes e a central de controle. Este tipo de aplicação foi modelado por fluxos CBR (*Constant Bit Rate*) de 64 Kbps rodando sobre o protocolo de transporte UDP.

- (c) transmissão de vídeo com imagens capturadas pelos sensores ou câmeras implantados ao longo da linha de transmissão para monitoramento patrimonial e de vegetação. Este tipo de aplicação foi modelado por fluxos CBR rodando sobre o protocolo de transporte UDP. Foram consideradas imagens transmitidas em duas qualidades de vídeo diferentes através das taxas de transmissão em 128 Kbps (menor qualidade) e 256 Kbps (maior qualidade).

A ferramenta de simulação utilizada foi o simulador NS2 (*Network Simulator 2*) [18]. Não foi utilizado nenhum modelo de interferência nesta etapa de testes. Dessa forma, a variação dos resultados se deve às características da própria rede em malha, à influência da topologia utilizada e à competição entre os próprios fluxos pelo acesso ao meio. Foram utilizadas antenas omnidirecionais de forma a simplificar os cenários, ao contrário das antenas direcionais propostas no projeto. A maior autointerferência que poderia ser causada pelos nós utilizando antenas omnidirecionais não se aplica neste cenário em função da topologia em linha e das distâncias envolvidas. No ambiente real, as antenas direcionais oferecerão um ganho consideravelmente mais alto, permitindo alcançar a distância média de 500 m entre cada par de torres onde serão instalados os protótipos.

Antes de implementar os modelos de tráfego descritos acima simultaneamente como ocorreria na rede real, foram feitas simulações com um único fluxo de cada tipo de aplicação apresentada, iniciado no nó 0 com destino ao *gateway*, cuja posição variou ao longo de todos os nós da linha (1 ao 14).

O objetivo destas simulações foi verificar a influência da distância ou número de saltos entre os nós na capacidade da rede e qualidade de serviço das aplicações, de modo a validar a distância máxima inicial proposta entre um nó e um *gateway* no projeto.

Após essa verificação, foram criados mais 8 cenários para estudar a influência da métrica utilizada no protocolo de roteamento (OLSR) e do uso do mecanismo de RTS/CTS, em termos da vazão média, retardo médio fim-a-fim, variação média do atraso (*jitter*), taxa de colisões em nível de enlace e percentual de perda de pacotes nas camadas de rede superiores, por tipo de aplicação.

A Tabela 1 apresenta os fluxos implementados para o estudo dos cenários. Em todas as simulações, os fluxos iniciam nos nós indicados e se destinam ao *gateway* da rodada, com exceção de um dos fluxos de voz que simula a

comunicação entre operadores ao longo da linha de transmissão e que inicia no nó 7 e se destina ao nó 1, independente da posição do *gateway* em todas as simulações. A posição do *gateway* variou ao longo de todos os nós da topologia apresentada na Figura 4.

Tabela 1: Descrição dos fluxos utilizados nos cenários de teste

Nó de Origem	Aplicação Modelada	Protocolos Utilizados	Observação
0	Dados	FTP/TCP	
0	Voz	CBR/UDP	Taxa = 64 Kbps
5	Dados	FTP/TCP	
7	Voz	CBR/UDP	Destino = nó 1 (Taxa = 64 Kbps)
10	Vídeo	CBR/UDP	Alta Qualidade (Taxa = 256Kbps)
12	Dados	FTP/TCP	
13	Vídeo	CBR/UDP	Baixa Qualidade (Taxa = 128Kbps)

## 5 Resultados

A Figura 5 mostra o resultado dos testes de verificação da capacidade da rede em termos da vazão média em função do número de saltos entre os nós origem e destino, considerando-se um fluxo de dados sobre o protocolo de transporte TCP.

Como se esperava, a vazão decresce de forma aproximadamente exponencial com o aumento do número de saltos. Considera-se, porém, que o valor atingido com o *gateway* na última posição avaliada (500Kbps) é satisfatório para as aplicações a que a rede desenvolvida neste projeto se propõe.

Os testes foram feitos considerando-se todas as métricas discutidas na Seção 2.1, sem o uso do mecanismo de RTS/CTS, e o resultado apresentou-se bem semelhante entre elas, com pequena vantagem para a métrica ETX, cujo objetivo é exatamente maximizar a vazão.

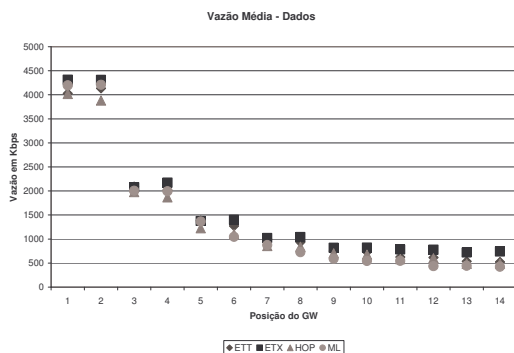


Figura 5: Vazão em Kbps de 1 fluxo TCP em função do número de saltos entre os nós de origem e de destino para as métricas de roteamento ETT, ETX, HOP e ML...

Os resultados para o *gateway* nas posições 1 e 2 se mostram bastante próximos, pois o raio de comunicação dos nós permite que eles se comuniquem diretamente com nós a até dois saltos de distância. A partir daí, é possível observar a influência do protocolo de roteamento na decisão do melhor caminho e a competição entre pacotes do mesmo fluxo no encaminhamento ao longo do caminho escolhido. Isso explica a queda acentuada da vazão quando a posição do *gateway* é o nó 3.

O raio de interferência de cada nó no modelo usado na simulação é de 550 metros, ou seja, quando o nó 0 transmite, apesar de apenas os nós 1 e 2 conseguirem decodificar os pacotes recebidos (raio de comunicação = 250 metros), os nós 3, 4 e 5 percebem o meio ocupado e sofrem colisão caso tentem transmitir pacotes. Assim, é possível observar que com a posição do *gateway* colocada a partir do nó 6 a vazão média decresce de forma mais suave até se estabilizar. Isso acontece porque a partir desta posição ocorrem transmissões paralelas dos pacotes do mesmo fluxo nos enlaces que estão fora do raio de interferência dos nós transmissores.

A Figura 6 mostra a variação média do atraso (*jitter* médio) de um fluxo de voz sob as mesmas condições da simulação do fluxo de dados descrita acima. As métricas que consideram a qualidade dos enlaces em suas definições apresentaram um resultado bastante superior em relação à métrica de contagem de saltos (HOP), como esperado.

A tendência de aumento do *jitter* com o aumento da distância entre a origem e o destino justifica-se pela maior competição pelo acesso ao meio e por um consequente maior número de transmissões para que um mesmo pacote alcance o destino. A métrica de contagem de saltos tende a manter os mesmos caminhos ao longo de toda a simulação independente da qualidade dos enlaces que varia

em função da distribuição do tráfego à medida que o fluxo avança para o destino.

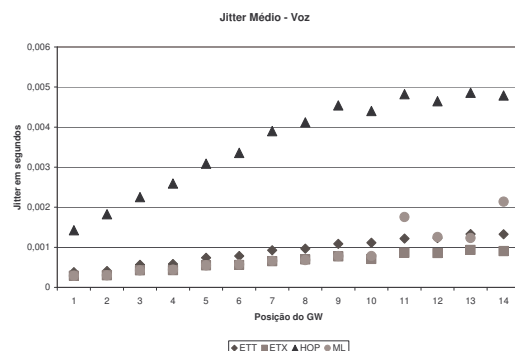


Figura 6: Variação média do atraso (*jitter* médio) de 1 fluxo de voz em função do número de saltos entre os nós de origem e de destino para as métricas de roteamento ETT, ETX, HOP e ML.

Essa característica da métrica de contagem de saltos (métrica HOP) de não considerar a qualidade dos enlaces no cálculo do melhor caminho a deixou em desvantagem em todas as medições. Dessa forma, nos resultados dos cenários de múltiplos fluxos apresentados abaixo ela foi descartada.

A métrica ETX foi a que apresentou o melhor resultado em termos de menor variação no atraso, considerando-se que a sua proposta para maximizar a vazão é escolher caminhos cujos enlaces requerem o menor número de transmissões para a entrega do pacote.

A Figura 7 ilustra a capacidade agregada da rede através da soma das vazões médias de todos os fluxos. A partir deste gráfico é possível observar que, ainda com múltiplos fluxos competindo pelo acesso ao meio entre si, a vazão da rede não cai abaixo de 500Kbps em nenhum dos cenários analisados, o que confirma a viabilidade da solução de rede.

Os cenários sem o mecanismo de RTS/CTS estão representados por símbolos cheios e os que utilizam este mecanismo, por símbolos sem preenchimento. Assim, observa-se que o mecanismo de RTS/CTS introduz um grande *overhead* na rede, reduzindo consideravelmente sua capacidade. Considerando os resultados obtidos com o *gateway* na posição 10, por exemplo, a queda de vazão introduzida pelo mecanismo de RTS/CTS é de aproximadamente 41%.

A métrica ETX manteve a vantagem em relação às demais, conforme observado nos testes com apenas um fluxo.

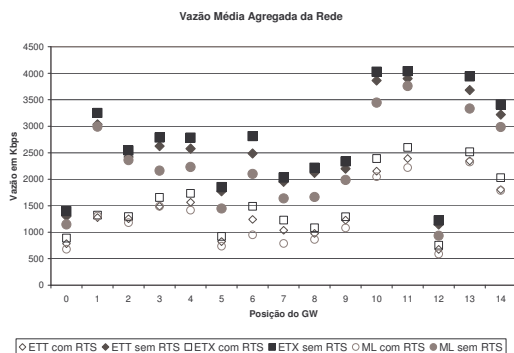


Figura 7: Vazão média agregada dos 7 fluxos descritos na Tabela 1 em função da posição do gateway.

Os resultados com o *gateway* nas posições 0, 5 e 12 apresentam os menores valores de vazão pois as origens dos fluxos de dados (TCP) coincidem com os *gateways*, não ocorrendo as transmissões do fluxo coincidente. As demais situações em que ocorre coincidência da origem do fluxo com o *gateway* da rodada são de fluxos CBR. Nesse caso, os fluxos TCP, que não possuem taxa de transferência fixa, conseguem ocupar esta vazão não utilizada e manter a vazão agregada da rede em valores mais altos.

A variação da vazão em função da posição do *gateway* traduz cenários reais em que as origens dos fluxos são distribuídas ao longo da linha de transmissão e utilizam mais ou menos saltos, obtendo menor ou maior vazão.

A Figura 8 apresenta a média das taxas de perda de pacotes observadas pelas camadas superiores com relação a todas as posições de *gateway* avaliadas sobre os fluxos de dados (TCP) para as métricas conhecidas como *quality-aware* (aquelas que consideram a qualidade dos enlaces em seus cálculos).

Com relação a taxa média de perdas de pacotes, a métrica ETX obteve um desempenho ligeiramente melhor que a métrica ETT e a métrica ML apresentou o pior resultado. Esse comportamento da métrica ML é explicado pela topologia de rede em linha, que não oferece rotas alternativas passando por outros nós da rede em malha. A métrica ML, quando comparada à métrica ETX, tende a selecionar caminhos mais longos porém com enlaces de melhor qualidade, i.e., menor perda. Porém, na topologia em linha, as rotas alternativas compartilham um mesmo subconjunto de nós e de enlaces e, com isso, a métrica ML não consegue explorar diferentes caminhos e mostrar seu potencial em minimizar as perdas de pacotes.

A Figura 9 apresenta os resultados para o atraso médio dos fluxos de vídeo com as métricas ETT e ETX, sem o uso do mecanismo de RTS/CTS,

como a média dos valores obtidos para todas as posições de *gateway*. Mais uma vez, a métrica ETX apresentou no geral um melhor desempenho.

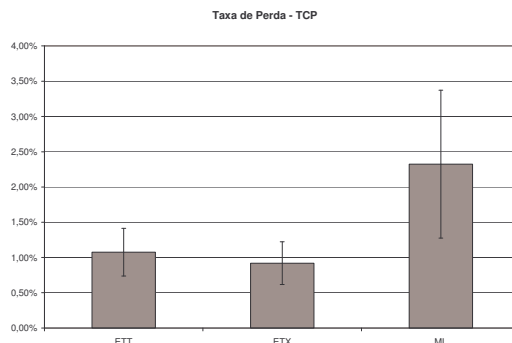


Figura 8: Média da taxa de perda de pacotes observada pelas camadas superiores para os fluxos de dados (TCP), considerando todas as posições de *gateway* (intervalo de confiança de 95%).

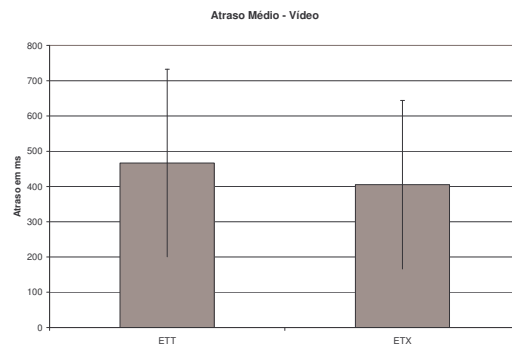


Figura 9: Média do atraso médio fim-a-fim em ms dos fluxos de vídeo em relação a todas as posições de *gateway* (intervalo de confiança de 95%).

## 6 Conclusão

Os resultados de desempenho obtidos através das simulações realizadas demonstram a viabilidade da solução proposta para atender a necessidade de uma infraestrutura de comunicação nos ambientes de linhas de transmissão de energia. As redes em malha sem fio se mostram apropriadas, principalmente, pelas suas características de redundância, tolerância a falhas, autoconfiguração e facilidade de implementação.

Os resultados obtidos validam a proposta inicial de distância de 14 saltos entre um nó e o *gateway* e indicam a tendência de se poder estender ainda mais essa distância, sem prejuízo para as aplicações, devido à ocorrência de transmissões paralelas livres de interferência co-canal.

Em todos os cenários foi observada desvantagem do mecanismo de RTS/CTS, que introduz um grande *overhead* na rede, reduzindo a vazão e

aumentando perdas, atraso e *jitter*. O único benefício, já esperado, foi a redução na taxa média de colisão, que, porém, não foi determinante para reduzir a taxa de perda de pacotes.

A análise das métricas de roteamento demonstrou uma clara vantagem daquelas que consideram a qualidade dos enlaces em seus cálculos e, para o modelo implementado neste estudo inicial, a métrica ETX apresentou um desempenho melhor em todas as medições realizadas.

Os próximos passos do estudo via simulações envolvem a adoção de um modelo de interferência do canal, de modo a ser possível analisar o desempenho das métricas de roteamento sob a influência de outros fatores além da distância entre os nós e da competição pelo acesso ao meio entre os fluxos. Além disso, a proposta do projeto define o uso de antenas direcionais, onde o mecanismo de RTS/CTS pode apresentar vantagens, e roteadores sem fio reais implementam mecanismos de adaptação de taxa de transmissão que não foram alvo dos testes apresentados neste trabalho.

Outra linha de pesquisa é a influência de mecanismos de qualidade de serviço (QoS) provendo priorização e diferenciação do tráfego para cada tipo de aplicação.

Em paralelo, a equipe do projeto vem realizando testes em campo na rede de testes implementada na UFF para validar o desempenho do sistema.

## 7 Referências

- [1] Abelém, A. J. G., Albuquerque, C. V. N., Saade, D. C. M., Aguiar, E. S., Duarte, J. L., Fonseca, J. E. M., Magalhães, L. C. S. *Redes Mesh: Mobilidade, Qualidade de Serviço e Comunicação em Grupo. Minicurso apresentado no SBRC2007*, Belém, 2007.
- [2] Akyildiz, I., Wang, X. *Wireless Mesh Networks (Advanced Texts in Communications and Networking)*. Wiley Blackwell, 2009.
- [3] Aoun, B., Boutaba, R., Iraqi, Y., Kenward, G. Gateway Placement Optimization in wireless mesh networks with qos constraints. **IEEE Journal of Selected Areas in Communications**, Novembro, 2006.
- [4] Projeto ReMesh, <http://www.mesh.ic.uff.br>, acesso em setembro de 2008.
- [5] Bicket, J., Aguayo, D., Biwas, S., Morris, R. Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network, **MobiCom '05: Proceedings of the 11<sup>th</sup> Annual International Conference on Mobile Computing and Networking**, pp. 31-42, 2005.
- [6] IEEE P802.11s™/D1.08 Draft Amendment to Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – LAN/MAN Specific Requirements – Part 11: Wireless Media Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment: ESS Mesh Networking. **IEEE**, Janeiro, 2008.
- [7] Clausen, T., Jacquet, P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). **RFC Experimental 3626, Internet Engineering Task Force**, Outubro, 2003.
- [8] Perkins, C. E., Belding-Royer, E. M., Das, S. R. Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. **RFC Experimental 3561, Internet Engineering Task Force**, Julho, 2003.
- [9] Johnson, D., Maltz, D., Broch, J. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks. **Ad Hoc Networking, Addison-Wesley**, Chapter 5, pp 139-172, 2001.
- [10] Santivanez, C., Ramanathan, R. Hazy Sighted Link State (HSL) Routing: A Scalable Link State Algorithm. **BBN Technical Memorandum, No 1301**, Março, 2003.
- [11] Tsarmpopoulos, N., Kalavros, I., Lalis, S. A low-cost and simple-to-deploy peer-to-peer wireless network based on open source linux routers. **Proceedings of TRIDENT-COM'05**, pp. 92-97, 2005.
- [12] Campista, M.E.M., Esposito, P.M., Moraes, I.M., Costa, L.H.M., Duarte, O.C.M., Passos, D.G., Albuquerque, C.V.N., Saade, D.C.M., Rubinstein, M.G. Routing Metrics and Protocols for Wireless Mesh Networks. **IEEE Network Magazine**, Vol. 22, No. 1, Janeiro/Fevereiro, 2008.
- [13] De Couto, D., Aguayo, D., Bicket, J., Morris, R. A high-throughput path metric for multihop wireless routing. **MobiCom '03: Proceedings of the 9<sup>th</sup> Annual International Conference on Mobile Computing and Networking**, pp. 134-146, 2003.
- [14] Draves, R., Padhye, J., Zill, B. Routing in Multi-radio, Multi-hop Wireless Mesh Networks. **MobiCom '04: Proceedings of the 10<sup>th</sup> Annual International Conference on Mobile Computing and Networking**, pp. 114-128, 2004.
- [15] Da Conceição, A. F. Voz e Vídeo Sobre Redes Sem Fio IEEE 802.11. **Dissertação de Doutorado apresentada ao Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo**, Maio, 2006.
- [16] Projeto ReMoTe, <http://www.mesh.ic.uff.br>, acesso em setembro de 2008
- [17] OpenWRT, <http://openwrt.org/>, acesso em setembro de 2008
- [18] NS2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, acesso em setembro de 2008