

Um Protocolo de Roteamento para Redes Ad Hoc com QoS Baseado no Controle da Potência de Transmissão

Daniel F. Macedo¹, Pedro F. Macedo¹, Luiz H. A. Correia^{1,2},
Aldri L. dos Santos^{1,3}, Antonio A. F. Loureiro¹, José Marcos S. Nogueira¹

¹Dep. de Ciência da Computação Univ. Federal de Minas Gerais Belo Horizonte-MG, Brasil ²Dep. de Ciência da Computação Univ. Federal de Lavras Lavras-MG, Brasil ³Dep. de Computação Univ. Federal do Ceará Fortaleza-CE, Brasil

{damacedo, lcorreia, aldri, loureiro, jmarcos}@dcc.ufmg.br

Abstract. *Transmission power control techniques reduce energy consumption and increase the number of concurrent transmissions in wireless networks. In order to accomplish such benefits, routing protocols must be aware of the transmission power on each link, since this affects the energy spent and the overall latency on each route. Those metrics are orthogonal, as energy-efficiency is achieved at the cost of higher latency times. This work presents a novel geographic routing protocol, called GPSR-TPC, that defines quality of service (QoS) classes based on the transmission power, trading-off latency and energy consumption. Results show that GPSR-TPC consumes up to 15% less energy than existing energy-aware protocols, while providing an increase in the average throughput of up to 55%.*

Resumo. *Técnicas de controle de potência de transmissão (CPT) em redes sem fio reduzem o consumo de energia e permitem um maior número de transmissões simultâneas. Para tanto, os protocolos de roteamento devem conhecer a potência mínima de transmissão em cada enlace, pois esta afeta o consumo de energia e a latência da comunicação. Como estas métricas são ortogonais, uma rota eficiente em energia é obtida ao custo de uma maior latência. Este trabalho apresenta um protocolo de roteamento geográfico, chamado GPSR-TPC, que define classes de qualidade de serviço (QoS) baseadas na potência de transmissão, que provêm diferentes níveis de latência e consumo de energia. Os resultados mostram que o GPSR-TPC consome até 15% menos energia que outros protocolos eficientes em energia e aumenta a vazão da rede em até 55%.*

1. Introdução

O uso de dispositivos computacionais móveis está se tornando cada vez mais frequente em situações onde não existe uma estrutura de rede previamente instalada, ou onde não é possível utilizar a estrutura de rede existente como, por exemplo, em situações de catástrofe. Nestas situações, os dispositivos procuram se auto-organizar para formar uma rede ad hoc sem fio (MANET – *Mobile Ad Hoc NETWORK*), onde os dispositivos atuam como origens, destinos e difusores de dados [Kumar et al. 2004, Boyle 2005]. As MANETs são utilizadas para comunicação entre soldados em campo de batalha, coordenação de trabalhadores em situações críticas e em monitoração de ambientes [Mateus and Loureiro 1998].

Como os dispositivos são alimentados por baterias, os protocolos de comunicação procuram minimizar o custo da comunicação ao ajustar a potência de transmissão. O nível de sinal transmitido é ajustado para compensar a atenuação imposta pelo meio durante a propagação do sinal, garantindo assim que o sinal recebido tenha exatamente a potência necessária para que o rádio decodifique corretamente os dados [Monks 2001].

Várias técnicas de controle da potência de transmissão (CPT) foram desenvolvidas para redes ad hoc e redes de sensores sem fio [Monks 2001, Agarwal et al. 2001, Gossain et al. 2005, Jung and Vaidya 2002, Correia et al. 2005]. Estas técnicas são aplicadas nos protocolos de controle e acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control*) para ajustar a potência de transmissão a cada quadro, de modo a manter o enlace estabelecido. O uso de técnicas de CPT na camada MAC por si só não é suficiente, visto que a comunicação em redes ad hoc é, em geral, composta de múltiplos saltos. Desta forma, caso o protocolo de roteamento não considere as diferentes potências de transmissão em cada enlace, este pode construir rotas ineficientes ao selecionar enlaces que possuem alta potência de transmissão em detrimento de enlaces que requerem uma menor potência de transmissão [Kawadia and Kumar 2005].

Estudos mostram que o uso de protocolos de roteamento que utilizam métodos de CPT podem diminuir o consumo de energia da rede e ao mesmo tempo aumentar a capacidade de transporte de dados [Kawadia and Kumar 2005, Gomez and Campbell 2004, Ammari and Das 2005]. Os primeiros protocolos de roteamento que utilizam CPT foram propostos em [Kawadia and Kumar 2005]. Esses protocolos são muito custosos, pois requerem a replicação do algoritmo de roteamento em várias instâncias, uma para cada potência de transmissão possível. Além disso, ao construir rotas que minimizam a energia consumida, a latência da comunicação é penalizada.

Este trabalho propõe um protocolo de roteamento que emprega de técnicas de CPT e possui um menor *overhead* de construção de rotas que os protocolos de roteamento atuais que utilizam CPT. Além disso, o protocolo proposto implementa classes de qualidade de serviço que provêm diferentes características de latência e consumo de energia. Comparamos através de simulações o protocolo proposto com os protocolos GPSR e ClusterPOW, consagrados na literatura. Resultados da simulação mostram que o protocolo proposto consome até 15% menos energia que os outros protocolos eficientes em energia, bem como aumenta a vazão da rede em até 55%. Além disto, as classes de QoS permitem a diminuição da latência da comunicação em até 90%.

O texto está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. Em seguida, a Seção 3 apresenta uma breve descrição de uma técnica de repasse de dados que utiliza informações geográficas e a operação de métodos de controle de potência. A Seção 4 descreve o funcionamento do protocolo proposto. A Seção 5 apresenta uma avaliação do desempenho do protocolo proposto por meio de simulação. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O problema de controle de potência de transmissão (CPT) tem sido exaustivamente estudado em redes ad hoc do ponto de vista dos protocolos de controle e acesso ao meio [Monks 2001, Agarwal et al. 2001, Jung and Vaidya 2002, Gossain et al. 2005, Correia et al. 2005]. Esses trabalhos propõem mecanismos leves para identificar a potên-

cia mínima de transmissão em comunicações que envolvem apenas um salto. São utilizados métodos iterativos, onde a potência é ajustada de acordo com a perda de dados medida no enlace [Correia et al. 2005], bem como pelo uso de fórmulas, que identificam a menor potência necessária para a comunicação entre dois nós [Monks 2001, Agarwal et al. 2001, Jung and Vaidya 2002, Gossain et al. 2005, Correia et al. 2005].

Kawadia e Kumar argumentam que o hardware existente para redes ad hoc apresentam longos tempos para a troca de potência [Kawadia and Kumar 2005]. Acreditamos que tal limitação seja facilmente contornada, dado que qualquer placa Wi-Fi no mercado troca a sua modulação e codificação automaticamente de acordo com a qualidade de comunicação entre estação e AP, uma operação bem mais complexa que a diminuição da potência de transmissão. Além disso experimentos em RSSF reais, que empregam um rádio bem mais restrito que os rádios em MANETs, mostraram que os métodos de CPT são leves, podendo ser executados mesmo em ambientes restritos [Correia et al. 2005].

Gomez e Campbell analisaram o uso de técnicas de CPT em comunicações de múltiplos saltos [Gomez and Campbell 2004]. Os autores mostraram analiticamente que o ajuste da potência de transmissão em cada passo da comunicação é até 50% mais eficiente que o uso de uma potência fixa para todos os enlaces. Desta forma, ao invés de definir uma potência global fixa, é desejável que comunicações envolvendo múltiplos saltos utilizem potências variáveis a cada salto. Além disso, os autores demonstraram que a capacidade da rede aumenta quando métodos de CPT são utilizados, enquanto em redes onde a potência de comunicação é fixa a capacidade diminui com a adição de nós.

Ammari e Das desenvolveram um modelo analítico para estudar como a potência de transmissão afeta o consumo de energia e latência em MANETs [Ammari and Das 2005]. Os autores demonstraram que, ao aumentarmos a distância percorrida por salto em uma comunicação a múltiplos saltos, obtemos uma menor latência ao custo de um maior consumo de energia. Saltos menores, entretanto, consomem menos energia, mas a latência aumenta devido ao maior número de saltos requeridos. Assim, os autores propõem a criação de classes de qualidade de serviço a partir da potência de transmissão. O modelo apresentado pelos autores, no entanto, utiliza cálculos complexos, que são difíceis de serem executados em MANETs. Os modelos analíticos ignoram os efeitos de interferência e colisões, que são críticos ao aumentarmos a potência de transmissão. Já a avaliação apresentada neste artigo considera estes fatores.

Kawadia e Kumar propõem protocolos de roteamento para MANETs, que utilizam mecanismos de CPT para minimizar o consumo de energia da rede [Kawadia and Kumar 2005]. O primeiro, chamado ClusterPOW, executa várias instâncias de um algoritmo de estabelecimento de rotas, utilizando diferentes potências de transmissão em cada instância. Os dados são enviados pela rota que utiliza a menor potência de transmissão. Este protocolo impõe um alto custo de manutenção de rotas, pois utiliza uma potência fixa em todos os saltos da comunicação e requer uma instância do algoritmo de roteamento para cada potência de transmissão disponível. O segundo protocolo, chamado MINPOW, transmite dados utilizando potências variáveis entre os saltos da comunicação. Como no ClusterPOW, o MINPOW dissemina pacotes em todos os níveis de potência para determinar os nós alcançáveis em cada potência. A partir deste dado, é executada uma versão modificada do protocolo DSDV, que considera a energia de transmissão na formação das rotas.

Os protocolos de roteamento em MANETs podem ser classificados em três categorias: homogêneos, hierárquicos e geográficos [Hong et al. 2002]. Nos protocolos homogêneos, qualquer nó pode atuar como roteador ou consumidor de dados. Esta organização de rede, entretanto, não é escalável. Desta forma, as redes de larga escala tendem a utilizar protocolos hierárquicos ou geográficos. Nos protocolos hierárquicos, os nós são divididos em grupos, cada um com um líder encarregado de estabelecer as rotas para os nós do seu grupo. Os protocolos geográficos procuram aumentar a escalabilidade do roteamento. Para tanto, estes usam a informação de localização dos nós para limitar e direcionar a propagação de dados, e desta forma diminuem a quantidade de mensagens necessárias para construir rotas. O protocolo GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) é um exemplo de protocolo geográfico [Karp and Kung 2000]. A partir das coordenadas geográficas, o GPSR repassa os dados para os nós mais próximos do destino. A Seção 3.1 descreve o funcionamento do protocolo GPSR.

Motivados pelos resultados obtidos em [Ammari and Das 2005], propomos modificações ao protocolo GPSR. Estas utilizam técnicas de CPT para prover garantias de QoS no roteamento. O GPSR-TPC se vale dos métodos desenvolvidos em [Correia et al. 2005] para determinar de forma eficiente a potência mínima de transmissão para todos os vizinhos, evitando assim o uso de múltiplas instâncias do cálculo de rotas, como feito por Kawadia e Kumar [Kawadia and Kumar 2005].

3. Fundamentos

Esta Seção apresenta uma breve descrição do funcionamento de protocolos nos quais o GPSR-TPC é baseado. Primeiro, descrevemos as regras de repasse de dados do protocolo GPSR. Em seguida, descrevemos o método de cálculo de controle de potência por atenuação empregado em [Correia et al. 2005].

3.1. O Protocolo GPSR

O protocolo GPSR possui dois modos de operação. No primeiro, os pacotes são repassados de forma gulosa ao nó mais próximo do destino, sendo este o funcionamento padrão de operação do GPSR. O repasse de dados é dito guloso porque procura escolher sempre o nó mais próximo do destino, sem considerar os próximos saltos da comunicação. Caso não exista um nó vizinho mais próximo do destinatário, o GPSR ativa o modo Perímetro (*Perimeter Routing*), que tem como objetivo contornar regiões onde não existem nós mais próximos do destino que o nó corrente. Nestas situações, o pacote deve se afastar do destino até encontrar uma nova rota gulosa. A partir de um vetor deslocamento do nó corrente até o nó destino ($\overrightarrow{x\bar{D}}$ na terminologia do GPSR), o nó corrente seleciona qual dos seus vizinhos se afasta menos do vetor deslocamento. Para isso, é utilizada a regra da mão direita sobre o vetor $\overrightarrow{x\bar{D}}$ e o vetor com início no nó atual e fim no nó vizinho. Ao determinar que novamente é possível utilizar a alternativa gulosa de repasse de dados, o protocolo volta a operar em modo guloso.

A Figura 1 ilustra o funcionamento do protocolo. Neste exemplo, o nó A deseja enviar dados para o nó L. O nó A repassa os pacotes para o nó B, que é o seu vizinho mais próximo de L. O mesmo ocorre com os nós B, D e F. Ao receber o pacote, o nó F verifica que nenhum dos seus vizinhos (nós dentro do círculo cinza com centro em F) está mais próximo de L que ele mesmo. Assim, o nó F ativa o modo perímetro (setas com

cabeça dupla) e envia os dados para G. Da mesma forma, G utiliza-se do modo perímetro para enviar dados para H. O nó H, por sua vez, encontra um nó mais próximo de L que o nó F, e assim o pacote volta a ser repassado pela estratégia gulosa até o nó L. O uso de informações geográficas permite ao GPSR a construção de rotas a baixo custo, pois o nó armazena estado referente somente a localização dos seus vizinhos.

O desempenho do GPSR, entretanto, depende da precisão dos métodos de localização utilizados. No restante do artigo consideramos um método onisciente de localização, já que este não é o foco do trabalho. Estudos anteriores [Rao et al. 2003] mostraram que até mesmo métodos que definem a localização em função da distância em saltos possuem precisão adequada para o funcionamento de algoritmos de roteamento geográfico. Desta forma, protocolos de roteamento geográfico podem ser empregados mesmo em redes onde os nós não possuem equipamentos de alta precisão, como por exemplo o GPS.

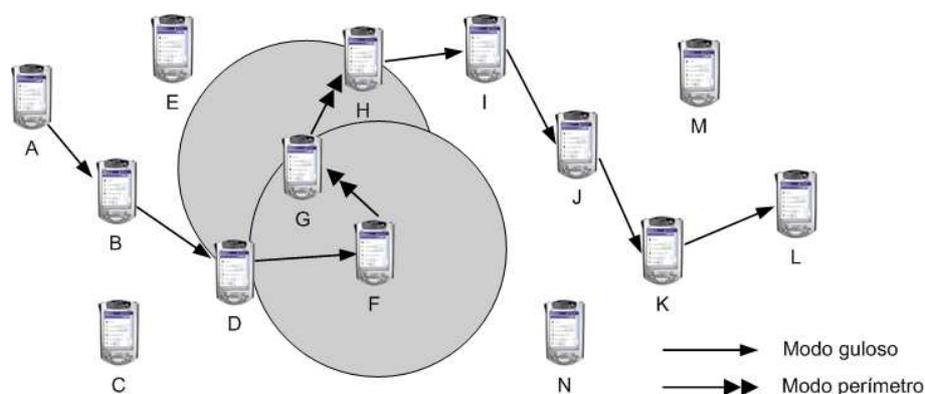


Figura 1. Funcionamento do protocolo GPSR.

3.2. Cálculo de Potência de Transmissão

A potência mínima de transmissão é calculada pela diferença das potências de transmissão e recepção dos quadros [Monks 2001, Correia et al. 2005]. O emissor adiciona ao quadro de requisição de reserva do canal (RTS) a potência de transmissão empregada para o envio do quadro. Ao receber o RTS, o receptor utiliza a potência de envio, a potência de recepção e o nível de ruído (nível de sinal emitido por fontes de interferência no meio, como outros equipamentos eletrônicos, por exemplo) para calcular a potência mínima de transmissão. A potência calculada é enviada ao emissor embutida no quadro de confirmação da reserva do canal (CTS). O quadro de dados, por sua vez, é transmitido utilizando a potência calculada pelo receptor. A potência de transmissão é direcional, ou seja, a potência mínima de envio de dados de i para j , $P_{i \rightarrow j}$, pode ser diferente da potência mínima de envio de j para i , $P_{j \rightarrow i}$.

Como o protocolo de roteamento necessita do conhecimento prévio da potência mínima de transmissão para todos os seus vizinhos, é necessário um método eficiente para o seu cálculo. Neste trabalho propomos o envio periódico de pacotes em *broadcast* para realizar tal tarefa. Estes pacotes também serão utilizados para a disseminação da potência mínima calculada, como mostramos na Seção 4.1. Uma descrição mais detalhada do cálculo de potência mínima é encontrada em [Correia et al. 2005].

4. GPSR-TPC

O protocolo GPSR-TPC (*Greedy Perimeter Stateless Routing with Transmission Power Control*) é composto de duas partes. A primeira consiste na construção de uma tabela de vizinhos. A segunda parte consiste da execução do algoritmo de repasse de dados, que determina o próximo salto da comunicação de acordo com uma métrica de QoS especificada. A seguir discutimos as duas partes do protocolo, bem como os critérios para definição dos níveis de QoS a serem utilizados.

4.1. Construção da Tabela de Vizinhos

Nesta seção mostramos a construção da tabela de vizinhos do protocolo GPSR-TPC. Além de permitir um conhecimento da topologia da rede, o protocolo de construção da tabela de vizinhos propaga e calcula a potência mínima de transmissão entre os nós. Trabalhos existentes calculam CPT de em enlace por vez. Entretanto, o GPSR-TPC precisa conhecer a potência mínima de todos os enlaces para construir suas rotas. Nesta seção apresentamos uma modificação aos métodos de CPT que permite o cálculo eficiente e simultâneo da potência de transmissão para muitos enlaces.

Os nós enviam periodicamente pacotes de descobrimento de vizinhos, que informam o posicionamento do nó na rede em coordenadas geográficas, e também disseminam a tabela de vizinhos do nó. Cada pacote é enviado em *broadcast* na potência máxima do rádio, para que todos os nós no alcance de comunicação o recebam. Um nó i , ao receber um pacote de descobrimento de vizinhos do nó j , calcula a potência ideal de transmissão de dados de j para i ($P_{j \rightarrow i}$), utilizando o método descrito na Seção 3.2. Esta potência será armazenada na tabela de vizinhos, que possui os campos mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Entradas da tabela de vizinhos de um nó i .

Entrada	Descrição
$[X_j, Y_j, Z_j]$	Coordenadas geográficas do vizinho j .
$P_{i \rightarrow j}$	Potência mínima de transmissão de i para j .
$P_{j \rightarrow i}$	Potência mínima de transmissão de j para i .

Como a potência mínima de transmissão é calculada no receptor, esta deve ser posteriormente enviada para o transmissor, tarefa também feita pelo pacote de descobrimento de vizinhos. A tabela de vizinhos do nó i , embutida nos pacotes de descobrimento de vizinhos irá armazenar todos os valores de $P_{j \rightarrow i}$ calculados. Um dado nó j , ao receber um pacote de i , extrai da tabela de vizinhos de i a potência de transmissão de j a i , e a armazena na sua tabela de vizinhos.

Como em MANETs os nós geralmente se movem, um nó vizinho pode sair da área de alcance ao se movimentar. Assim, o GPSR-TPC retira da tabela de vizinhos os nós que não enviaram dados após um certo período de tempo. Esta medida ainda provê ao GPSR-TPC um mecanismo para tolerar a falha de nós, já que nós falhos também serão removidos da tabela.

4.2. Algoritmo de Repasse de Dados

O algoritmo de repasse de dados utiliza a potência de transmissão para implementar políticas de QoS. O valor da potência de transmissão define qual parâmetro de QoS

será priorizado no pacote, se o consumo de energia ou latência [Ammari and Das 2005]. A Figura 2 mostra como o ajuste da potência de transmissão pode determinar o nível de QoS do pacote. Na figura, o nó central pode cobrir várias áreas de comunicação, representadas pelas elipses, conforme os diferentes níveis de potências de transmissão utilizados. Caso o nó central escolha o nó vizinho A como próximo salto em detrimento do nó B, ele diminuirá a quantidade de energia consumida na comunicação, pois os dados serão enviados em saltos menores. Entretanto, a latência será maior. Caso B seja selecionado, a latência será minimizada. Dessa forma, a capacidade da rede (o número máximo de transmissões simultâneas na rede) será menor. Além disso, o emissor precisará despender mais energia a cada salto da comunicação.

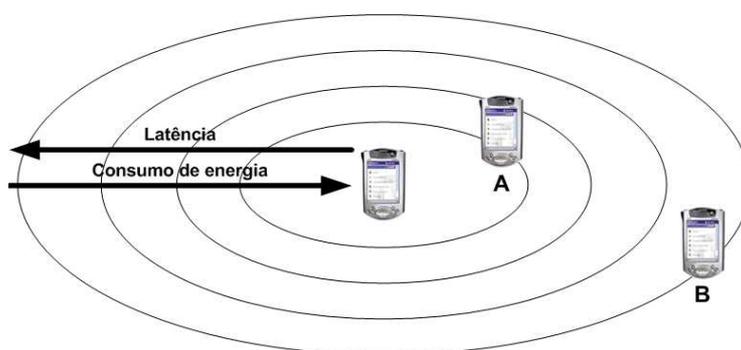


Figura 2. Efeito do raio de transmissão na latência e energia consumida na comunicação.

O algoritmo de repasse de dados do protocolo GPSR-TPC é mostrado no Algoritmo 1. A aplicação designa a classe de QoS a ser utilizada na transmissão de cada pacote. Esta classe irá determinar a potência máxima (Pot_{Limite}) utilizada em cada salto da comunicação. Inicialmente, o GPSR-TPC procura repassar o pacote utilizando a regra gulosa do GPSR (linhas 6-14), entretanto limitando os seus vizinhos aos nós que podem ser alcançados com potências inferiores ou iguais a Pot_{Limite} . Caso um nó seja encontrado, o dado é repassado para este nó utilizando a potência mínima requerida para a comunicação entre os dois nós. Caso nenhum nó seja encontrado, o valor de Pot_{Limite} é aumentado. Esta operação é repetida até que um vizinho seja selecionado para repassar os dados, ou a potência máxima permitida pelo rádio (Pot_{Max}) seja atingida. Assim, se necessário, o GPSR-TPC pode enviar os dados utilizando uma potência superior a Pot_{Limite} , a fim de evitar o descarte de pacotes. Um pacote é descartado somente se nenhum nó vizinho no alcance de comunicação do nó corrente possa repassar os dados.

Antes de descartar os pacote, o GPSR-TPC utiliza o modo perímetro do GPSR para encontrar rotas, pois pode não existirem nós mais próximos do destino que o nó atual. Assim, o pacote deve se afastar temporariamente do destino para encontrar uma nova rota. Os nós executam o modo perímetro do GPSR, começando novamente pelos nós que sejam alcançáveis com a potência máxima ditada pela classe de QoS selecionada pela aplicação (linhas 20-27). Novamente, caso nenhum nó dentre os nós alcançáveis na potência limite seja adequado para o repasse de dados, a potência é incrementada e o algoritmo é executado novamente. Assim, um pacote somente é descartado se não for encontrada uma rota na potência máxima do rádio.

Algoritmo 1 Algoritmo de estabelecimento de rotas.

```
1: procedure GPSR_TPC(PotLimite, Destino)
2:   Pot ← PotLimite;
3:   dist ← distanciaEuclidiana(i, Destino);
4:   Li ← {vj ∈ Vi | vj.Pi→j ≤ Pot}; // Tabela de vizinhos na potência desejada
5:   while Pot ≤ PotMax do
6:     foreach vj in Li do // Encontrando o nó mais próximo do destino
7:       if distanciaEuclidiana(vj, Destino) < dist then
8:         proximoSalto ← vj;
9:         dist ← distanciaEuclidiana(vj, Destino);
10:      end if
11:    end foreach
12:    if dist < distanciaEuclidiana(i, Destino) then
13:      return proximoSalto;
14:    end if
15:    Pot ← Pot + 1; // Aumentando a potência caso o próximo salto não seja encontrado
16:    Li ← {vj ∈ Vi | vj.Pi→j ≤ Pot};
17:  end while
18:  Pot ← PotLimite;
19:  Li ← {vj ∈ Vi | vj.Pi→j ≤ Pot};
20:  while Pot ≤ PotMax do // Caso não se encontre próximo salto via modo guloso, executa o modo perímetro
21:    proximoSalto ← GPSR_PerimeterMode(Destino, Li);
22:    if proximoSalto ≠ Null then
23:      return proximoSalto;
24:    end if
25:    Pot ← Pot + 1; // Aumentando a potência caso o próximo salto não seja encontrado
26:    Li ← {vj ∈ Vi | vj.Pi→j ≤ Pot};
27:  end while
28:  return Null;
29: end procedure
```

4.3. Definição das Classes de QoS do Pacote

A métrica de QoS a ser otimizada pelo GPSR-TPC irá depender da potência de transmissão utilizada na comunicação. Devido a limitações dos rádios empregados em redes sem fio, não é possível definir uma potência arbitrária de transmissão. Ao contrário, um número finito de valores é definido por cada rádio. Definimos n classes de QoS, onde n é o número de níveis de potência de transmissão providos pelo rádio. A aplicação define a classe de serviço a ser utilizada, como ocorre nas soluções de QoS empregadas na Internet [Tanenbaum 2002]. Ao contrário destas soluções, entretanto, não existe uma classe “padrão”. Isto ocorre pela dificuldade de se determinar qual classe oferece o melhor compromisso entre latência e consumo de energia, que depende de fatores como número e densidade de nós, carga média da rede e os níveis de potência providos pelo rádio, conforme mostraremos na Seção 5.

As classes de QoS implementadas provêm um serviço no modelo de melhor esforço: o protocolo se esforçará para atingir as métricas de QoS esperadas mas, caso não seja possível cumpri-las, o protocolo ainda irá aceitar os pacotes e repassá-los. O GPSR-TPC possui tal comportamento pois opta por transmitir o pacote, mesmo que não exista um caminho que provenha o serviço esperado.

5. Avaliação de desempenho

O desempenho do GPSR-TPC foi avaliado no simulador NS-2 [Network Simulator 2005], utilizando as extensões desenvolvidas por Kawadia e Kumar [Kawadia and Kumar 2005], que permitem o ajuste da potência de transmissão a cada pacote. Comparamos o desempenho do GPSR-TPC com os protocolos GPSR e

ClusterPOW, utilizando o código fornecido pelos autores, com os parâmetros de cada protocolo em seus valores padrão [Karp and Kung 2000, Kawadia and Kumar 2005]. Na camada MAC foi utilizado o protocolo IEEE 802.11b.

Pelo nosso conhecimento, as placas Wi-Fi que permitem o ajuste da potência de transmissão provêm potências muito altas, com alcance da ordem de centenas a milhares de metros, ideais para redes metropolitanas. Como as MANETs em geral não necessitam de potências tão altas, derivamos potências de transmissão fictícias para comunicação a curtas distâncias. Estas potências são mostradas na Tabela 2, com seus respectivos alcances e consumo de energia. Utilizamos como referência uma placa Cisco Aironet 350 [Cisco Systems 2005] e, a partir do modelo de propagação de Friis [Friis 1946], obtivemos os valores apresentados. Para validar os resultados encontrados, utilizamos a mesma fórmula para estimar as potências providas pela placa. Verificamos que os resultados encontrados desviaram dos fornecidos pelo fabricante em até 6%. Seleccionamos as potências de transmissão de modo que o alcance da comunicação aumentasse de 10 em 10m, quando possível. O GPSR-TPC define uma classe de QoS para cada potência fornecida pelo rádio simulado, numeradas como mostrado na Tabela 2. Por fim, o consumo simulado para o rádio nos estados de recepção e ocioso é de 1350mW e 65mW, respectivamente, que é o consumo informado pelo fabricante.

Tabela 2. Alcance e consumo de energia para as classes de QoS implementadas pelo GPSR-TPC no rádio simulado.

Classe de QoS	Raio de Comunicação	Potência de Transmissão	Consumo de Energia
1	10m	-25 dBm	3.2 mW
2	20m	-18 dBm	15.8 mW
3	30m	-15 dBm	31.6 mW
4	43m	-12 dBm	63.1 mW
5	54m	-10 dBm	100 mW
6	60m	-9 dBm	125.9 mW

O cenário simulado consiste em uma rede estacionária, onde os nós enviam dados a uma taxa constante (CBR – *Constant Bit Rate*). Todos os nós possuem a mesma energia inicial – 100J – e rádios iguais. A simulação dura 100s, tempo suficiente para que todos os fluxos de dados alcancem um estado estacionário. Os protocolos foram avaliados empregando transmissões de dados sobre os protocolos de transporte UDP e TCP.

O desempenho dos protocolos irá depender da quantidade de dados sendo transmitido na rede. Devido a limitações de espaço, apresentamos somente resultados para um número fixo de fluxos. Apresentamos resultados para os protocolos ClusterPOW, GPSR e GPSR-TPC. Os valores apresentados são obtidos pela média de 33 execuções, com intervalo de confiança de 95%.

5.1. Avaliando as Classes de QoS do GPSR-TPC

A comunicação de dados utilizando técnicas de CPT pode levar a potências de transmissão muito altas, que aumenta a probabilidade de colisões. Logo, o desempenho da rede irá depender da densidade de nós. Este cenário avalia o funcionamento das classes de

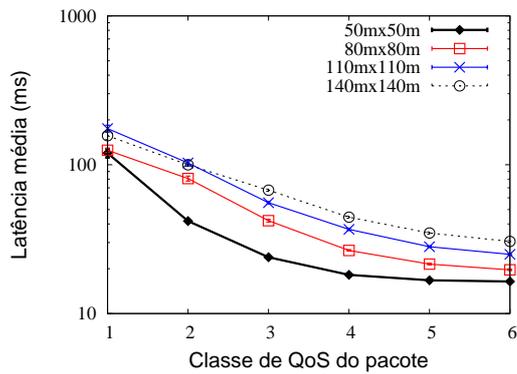


Figura 3. Latência média no GPSR-TPC.

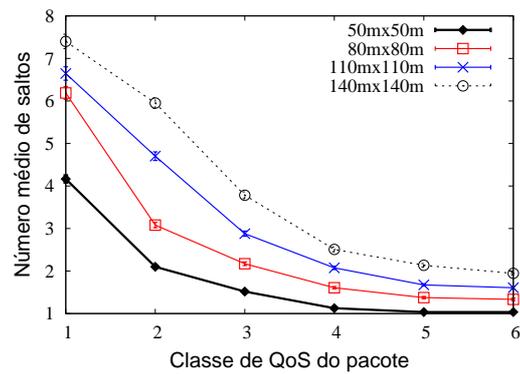


Figura 4. Número médio de saltos no GPSR-TPC.

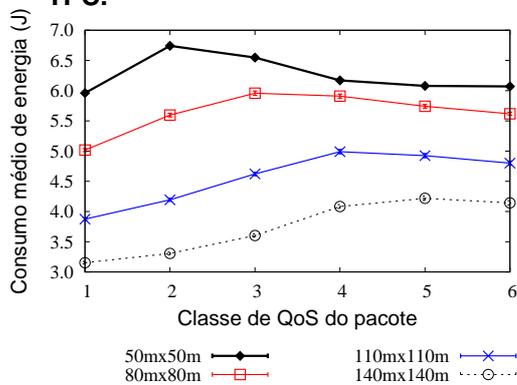


Figura 5. Consumo médio de energia no GPSR-TPC.

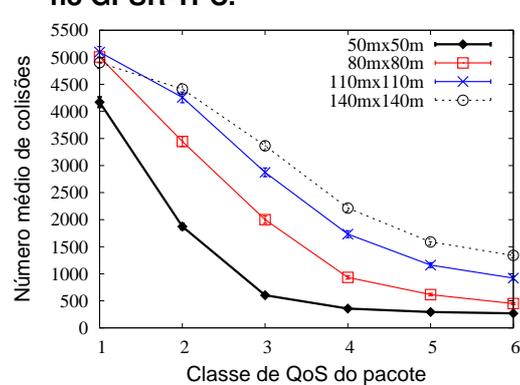


Figura 6. Número médio de colisões no GPSR-TPC.

QoS implementadas no GPSR-TPC considerando diversas densidades de nós. Inserimos 100 nós aleatoriamente em uma região quadrada. Oito fluxos UDP transportam pacotes a uma taxa constante de 100kbps. Variamos a densidade da rede ao ajustar o tamanho da área de $50m \times 50m$ para $80m \times 80m$, $110m \times 110m$ e $140m \times 140m$.

A latência diminui quando aumentamos a potência de transmissão, como mostra a Figura 3. A latência depende da densidade da rede, pois redes mais densas apresentaram uma latência média mais baixa. Em tais redes, o GPSR-TPC pode selecionar entre maior quantidade de nós qual será utilizado para repassar dados, assim este pode encontrar um nó mais próximo do destino, reduzindo o número de saltos na comunicação, como mostra a Figura 4. Além disso, um incremento na potência de transmissão irá diminuir o número médio de saltos, permitindo assim uma menor latência média.

Verificamos que o comportamento das classes de QoS depende da densidade da rede, principalmente em relação ao consumo médio de energia, como mostra a Figura 5. Em redes densas como a rede de $50m \times 50m$, o consumo de energia segue uma parábola ao variarmos a classe de QoS. Este comportamento contradiz os resultados existentes na literatura [Gomez and Campbell 2004, Ammari and Das 2005]. Para redes esparsas, como as redes com $140m$ e $110m$ de lado, o consumo de energia aumenta quando a potência de transmissão é aumentada, como encontramos na literatura.

Trabalhos anteriores consideraram que a potência mínima de transmissão poderia ser decrementada arbitrariamente, mantendo assim a quantidade de colisões em um nível

constante [Gomez and Campbell 2004, Ammari and Das 2005]. Neste caso, as curvas da Figura 5 seriam estritamente crescentes. Entretanto, como os rádios possuem um número limitado de potências permitidas, não é possível diminuir arbitrariamente a potência para compensar o aumento da densidade da rede. Logo, a adição de nós irá aumentar a disputa pelo meio, o que aumentará a quantidade de colisões, como mostra a Figura.

O consumo de energia das classes de QoS está relacionado com a ocorrência de colisões, mostradas na Figura 6. Após a potência mínima de transmissão ser atingida, a adição de nós aumenta a competição para acessar o meio. Desta forma, a adição de nós à rede se torna prejudicial, uma vez que o número de colisões será maior.

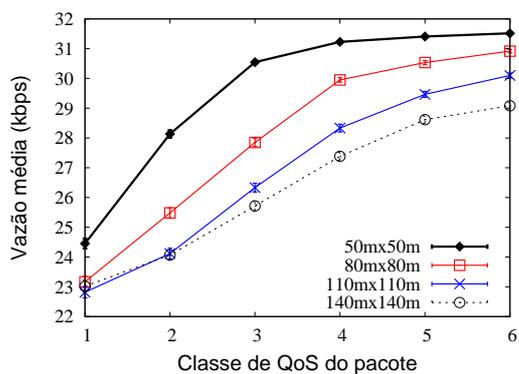


Figura 7. Vazão média no GPSR-TPC.

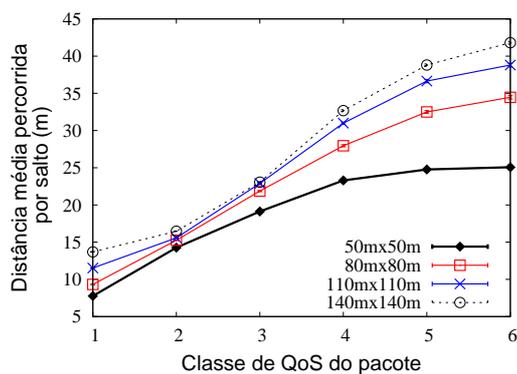


Figura 8. Distância média percorrida por salto no GPSR-TPC.

Como ocorreu com o consumo de energia, verificamos que vazão depende da densidade da rede, como mostra a Figura 7. Ao contrário das redes densas, a vazão aumenta quando a densidade de nós é aumentada em redes esparsas. A partir deste resultado vemos que a adição de nós realmente aumenta a capacidade de transporte de dados da rede quando utilizamos técnicas de CPT. Entretanto, a densidade não deve ultrapassar um valor limite, onde a adição de nós é prejudicial, pois o rádio não pode mais decrementar a potência de transmissão para compensar o aumento na densidade da rede. Também verificamos que a vazão aumenta ao incrementarmos a potência de transmissão, pois a quantidade de colisões e o número médio de saltos é menor para potências mais altas.

Os resultados das Figuras 3 e 5 mostram que a implementação de classes de QoS utilizando a potência de transmissão permite a variação da latência e do consumo de energia, como esperado. Entretanto, como verificado nos resultados apresentados, o aumento da potência de transmissão apresenta ganhos menores ao atingirmos as potências mais altas do rádio. Acreditamos que tal resultado é devido ao pequeno diâmetro da rede, pois o número médio de saltos se aproxima de um a partir da classe de QoS 4, como vemos na Figura 8. Também verificamos pela Figura 7 que o aumento da potência média de transmissão aumenta a capacidade da rede, pois a quantidade de colisões é menor.

5.2. Comparação entre Protocolos Utilizando UDP

Este cenário compara o desempenho do GPSR-TPC com os protocolos GPSR e ClusterPOW. Os parâmetros de simulação são os mesmos utilizados na seção anterior. Para o GPSR-TPC, utilizamos as classes de QoS 1, 4 e 6. As classes 1 e 6 foram selecionadas por apresentarem os dois extremos de desempenho do GPSR-TPC, enquanto a

classe 4 foi selecionada por apresentar o melhor compromisso entre energia e latência nos cenários anteriores. Para o protocolo GPSR, que utiliza uma potência fixa de transmissão, definimos a sua potência de forma que este possuísse raio de alcance de 30m.

A Figura 9 mostra o número médio de saltos para os protocolos avaliados. Como esperado, o protocolo GPSR-TPC mostrou um comportamento variado, de acordo com a classe de QoS empregada. Utilizando a classe 1, o protocolo obteve o maior número médio de saltos, requerendo entre 4 e 7 saltos. Entretanto, quando as classes de QoS 4 ou 6 foram empregadas, o protocolo apresentou o menor número médio de saltos dentre os protocolos avaliados. O GPSR obteve o segundo melhor resultado, apresentando em média 1,5 saltos para redes de $50m \times 50m$, e 3,8 saltos para redes de $140m \times 140m$, uma vez que as rotas definidas pelo protocolo procuram minimizar o número de saltos. O protocolo ClusterPOW, por sua vez, obteve a segunda maior média, pois o protocolo procura minimizar o consumo de energia ao utilizar rotas com um maior número de saltos.

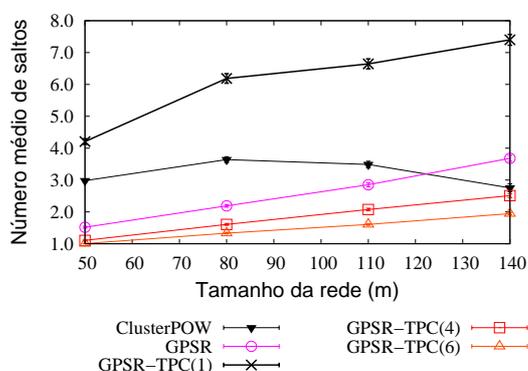


Figura 9. Número médio de saltos (UDP).

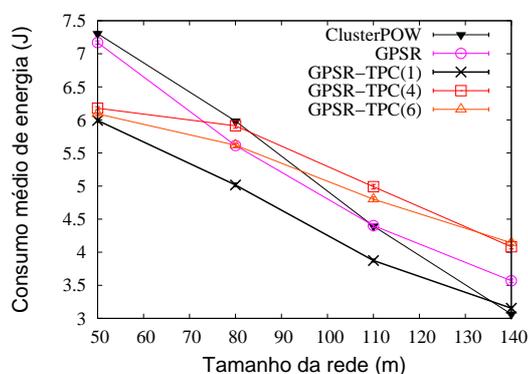


Figura 10. Consumo de energia médio (UDP).

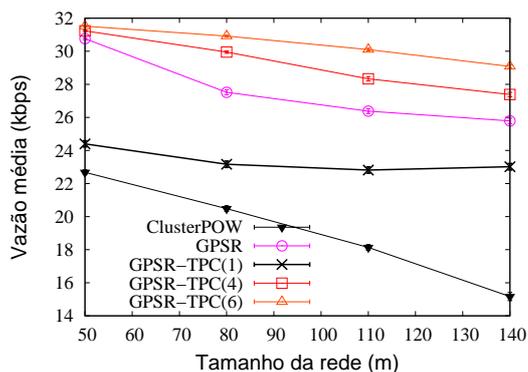


Figura 11. Vazão média (UDP).

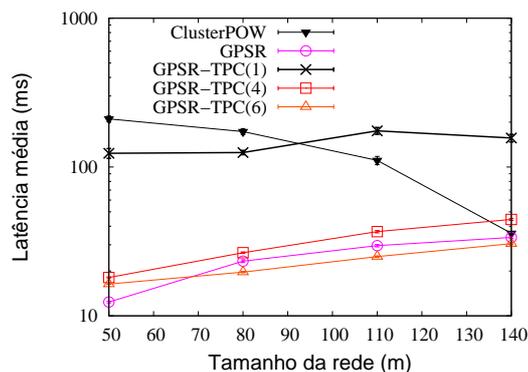


Figura 12. Latência média (UDP).

A energia média consumida pelos nós aumenta com a densidade da rede, como mostra a Figura 10. Este aumento é causado pelo maior número de mensagens de roteamento e o número de colisões. O protocolo ClusterPOW obteve o pior desempenho, uma vez que requer o dobro de bytes transmitidos pelo GPSR e GPSR-TCP para construir suas rotas. O protocolo proposto foi mais eficiente em energia que o ClusterPOW quando utilizando a classe de QoS 1, pois o *overhead* de roteamento do GPSR-TPC é reduzido. O protocolo GPSR foi o segundo melhor na comparação, consumindo menos energia que o GPSR-TPC nas classes 4 e 6. Como estas classes procuram otimizar a latência da co-

municação, era de se esperar que o consumo de energia fosse elevado. Ao compararmos o GPSR-TPC utilizando a classe de QoS 1 com o GPSR, entretanto, verificamos que o protocolo proposto apresenta uma economia de energia da ordem de 15%. O contrário ocorreu para o ClusterPOW, que consumiu mais energia que o GPSR, devido ao seu alto custo de manutenção de rotas.

A vazão média da rede é mostrada na Figura 11. O protocolo GPSR-TPC utilizando as classes de QoS 4 e 6 apresentou a maior vazão, enquanto o GPSR apresentou o segundo melhor resultado. Enquanto isso, o GPSR-TPC enviando pacotes com classe de QoS 1 obteve um desempenho até 25% inferior aos obtidos com as classes 4 e 6, devido aos motivos apresentados na Seção 5.1 O ClusterPOW apresentou o pior desempenho, pois requer várias instâncias do algoritmo de roteamento, que sobrecarregam a rede com pacotes de estabelecimento de rotas. O ClusterPOW ainda apresentou uma alta latência média, como mostra a Figura 12 (o eixo y está em escala logarítmica). Como o ClusterPOW envia pacotes de roteamento periodicamente em todas as potências fornecidas pelo rádio, a quantidade de colisões e de *backoffs* requeridos para enviar os dados aumenta, penalizando a latência da rede. Os protocolos GPSR e GPSR-TPC, por outro lado, enviam uma menor quantidade de mensagens de roteamento, e desta forma obtiveram uma menor latência média. O protocolo GPSR-TPC utilizando a classe de QoS 6 superou o protocolo GPSR, pois o maior raio de transmissão do GPSR-TPC diminuiu o tamanho médio do caminho e a quantidade média de saltos requeridos na comunicação.

5.3. Comparação entre Protocolos Utilizando TCP

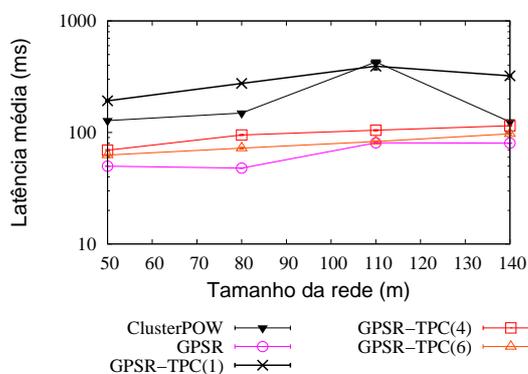


Figura 13. Latência média (TCP).

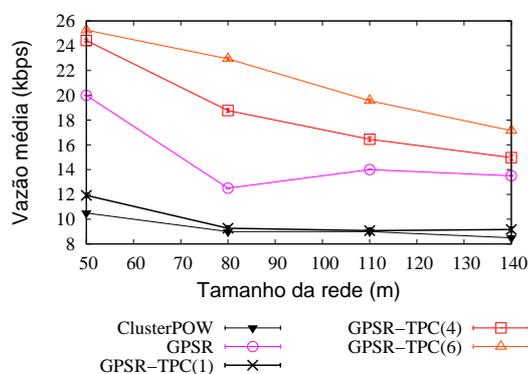


Figura 14. Vazão média (TCP).

Neste cenário avaliamos o desempenho dos protocolos em uma rede onde os nós se comunicam utilizando o protocolo TCP para transporte de dados. A rede está organizada como nos cenários anteriores, entretanto utilizando o TCP na camada de transporte. Como o TCP utiliza mecanismos de controle de contenção, esperamos resultados mais diversos neste cenário, pois o TCP irá contribuir para uma diminuição no número de colisões ao ajustar a vazão de cada fluxo de acordo com as condições da rede.

Como visto na Figura 13, o uso de TCP no transporte acarretou um aumento da ordem de dez vezes na latência observada na rede. Isto ocorre devido ao controle de fluxo do TCP, que atrasa o envio dos pacotes para diminuir a contenção na rede. Com o TCP, o GPSR apresentou os melhores resultados, seguido do GPSR-TPC utilizando as classes 4 e 6. O maior número de saltos no ClusterPOW e no GPSR-TPC utilizando a

classe 1 fez com que a latência dos dois protocolos superasse 100ms. Apesar da maior latência, o número de colisões com o TCP variou até 50% quando comparamos redes com densidades distintas, enquanto em cenários anteriores obtivemos uma diferença de até 10 vezes. Desta forma, o controle de contenção do TCP diminuiu a quantidade de colisões da rede, entretanto os fluxos foram penalizados com uma maior latência.

A Figura 14 mostra a vazão dos protocolos utilizando o TCP. Além de uma maior latência, o TCP apresentou uma vazão média inferior à do UDP. A vazão média dos fluxos no melhor cenário caiu de 32kbps, quando utilizamos UDP, para 26kbps no TCP. Novamente, atribuímos este resultado ao mecanismo de controle de fluxo do protocolo que, ao detectar perdas de pacotes na rede, diminui a taxa de envio de pacotes na tentativa de evitar um congestionamento na rede.

As classes de QoS apresentam ganhos mais modestos quando utilizamos o TCP na camada de transporte. O TCP, ao diminuir a vazão na ocorrência de perda de pacotes, amenizou a diferença entre as classes de QoS. Ao utilizarmos o UDP, verificamos variações de até 90% na latência, enquanto no TCP a diferença entre as classes é de até 60%. Quando verificamos a energia, encontramos resultados similares.

5.4. Discussão

A partir da modelagem cuidadosa das MANETs, e considerando fatores como colisões e densidade de nós, mostramos que o desempenho de redes que empregaram técnicas de CPT depende de fatores não considerados anteriormente na literatura.

Primeiro, nem sempre é possível aumentar a capacidade da rede e diminuir o consumo de energia com a adição de mais nós, como se pensava anteriormente. Em redes muito densas, a adição de nós irá aumentar a latência e o consumo de energia, pois o número de colisões na rede aumenta. Além disso, as colisões reduzem a vazão da rede. Em redes esparsas, por outro lado, um maior número de nós irá diminuir a latência e o número médio de saltos, enquanto a vazão da rede aumenta. Este melhor desempenho é obtido com um maior consumo médio de energia.

A adição de nós permite que a potência de transmissão seja diminuída. Entretanto, os rádios existentes não permitem diminuir a sua potência de transmissão de forma arbitrária. Após alcançada a potência mínima de transmissão permitida pelo rádio, a adição de nós irá aumentar a disputa pelo meio, o que aumenta o número de colisões e o tempo necessário para enviar pacotes.

Verificamos que diferentes potências de transmissão podem ser utilizadas para implementar classes de QoS. Entretanto, o desempenho destas classes irá depender da densidade da rede. Para redes densas, as classes de QoS consomem a mesma quantidade de energia, já que o uso de uma menor potência de transmissão é compensada por um aumento do número de colisões e de saltos. Em redes esparsas, o consumo de energia diminui quando a potência de transmissão é menor. A vazão da rede, por sua vez, aumenta ao utilizarmos uma potência de transmissão mais alta, pois a carga na rede é menor.

O desempenho das classes de QoS ainda depende do protocolo de transporte utilizado. Ao implementar medidas de controle de fluxo, o TCP influi na vazão e na taxa de envio de dados da rede, reduzindo assim as diferenças entre as classes de QoS. Entretanto, as classes de QoS podem ser utilizadas no TCP para prover serviços diferenciados.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Técnicas de controle da potência de transmissão (CPT) são utilizadas para reduzir o consumo de energia e aumentar o desempenho de redes sem fio. A potência de transmissão pode ser ajustada para otimizar o consumo de energia, latência ou vazão. Esta decisão ocorre no roteamento, onde os nós escolhem o próximo salto da comunicação de acordo com as métricas a serem priorizadas.

Este trabalho apresentou um novo protocolo de roteamento geográfico, chamado GPSR-TPC, que utiliza a potência de transmissão para prover classes de serviço diferenciadas. O GPSR-TPC permite que a aplicação decida para cada pacote transmitido qual métrica, latência ou energia, será priorizada. Verificamos que o GPSR-TPC apresenta um desempenho superior aos protocolos de roteamento existentes que utilizam técnicas de CPT. Além disso, o GPSR-TPC consome menos energia que o GPSR.

Como trabalhos futuros, iremos avaliar o desempenho de protocolos que utilizam técnicas de CPT em redes onde os nós se movem. Além disso, pretendemos estender nossos modelos de simulação para inserir erros nas informações de localização, uma vez que o GPSR-TPC utiliza informações de coordenadas geográficas. Também iremos refinar a simulação, adicionando a mudança automática da modulação e codificação da transmissão de acordo com a distância entre os nós, como ocorre nas placas Wi-Fi atuais. Por fim, pretendemos especificar algoritmos que selecionem automaticamente qual classe de QoS é a mais adequada para cada pacote, de forma a maximizar uma métrica de desempenho qualquer, como vazão, latência ou consumo de energia.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, uma entidade do Governo Brasileiro voltada ao desenvolvimento científico e tecnológico, processo 55.2111/2002-3.

Referências

- Agarwal, S., Krishnamurthy, S., Katz, R., and Dao, S. (2001). Distributed power control in ad hoc wireless networks. In *Personal and Indoor Mobile Radio Communication – (PIMRC)*, volume 2, pages 59–66. IEEE.
- Ammari, H. M. and Das, S. K. (2005). Trade-off between energy savings and source-to-sink delay in data dissemination for wireless sensor networks. In *MSWiM '05: Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 126–133, New York, NY, USA. ACM Press.
- Boyle, A. (2005). How high-tech is coming to the rescue. *MSNBC*. <http://www.msnbc.msn.com/id/9131498/>. Acessado em 30 Set. 2005.
- Cisco Systems (Dec., 2005). Cisco aironet 350 series client adapters. http://www.cisco.com/en/US/products/hw/wireless/ps4555/products_data_sheet09186a0080088828.html.
- Correia, L. H. A., Macedo, D. F., Silva, D. A. C., dos Santos, A. L., Loureiro, A. A. F., and Nogueira, J. M. S. (2005). Transmission power control in mac protocols for wireless sensor networks. In *MSWiM '05: Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 282–289, New York, NY, USA. ACM Press.

- Friis, H. T. (1946). A note on a simple transmission formula. *Proc. IRE*, 34.
- Gomez, J. and Campbell, A. T. (2004). A case for variable-range transmission power control in wireless multihop networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, volume 2, pages 1425–1436.
- Gossain, H., de M. Cordeiro, C., and Agrawal, D. P. (2005). Energy efficient MAC protocol with spatial reusability for wireless ad hoc networks. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 1(1/2):13–26.
- Hong, X., Xu, K., and Gerla, M. (2002). Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks. *IEEE Network*, pages 11–21.
- Jung, E.-S. and Vaidya, N. H. (2002). A power control MAC protocol for ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 36–47. ACM Press.
- Karp, B. and Kung, H. T. (2000). GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 243–254. ACM Press.
- Kawadia, V. and Kumar, P. R. (2005). Principles and protocols for power control in wireless ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(1):76–88.
- Kumar, V., Rus, D., and Singh, S. (2004). Robot and sensor networks for first responders. *IEEE Pervasive Computing*, 3(4):24–33.
- Mateus, G. R. and Loureiro, A. A. F. (1998). *Introdução à Computação Móvel*. Imprinta Gráfica e Editora Ltda.
- Monks, J. P. (2001). *Transmission Power Control for Enhancing the performance of wireless packet data networks*. Doctor of philosophy, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Network Simulator (November, 2005). NS-2 simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- Rao, A., Papadimitriou, C., Shenker, S., and Stoica, I. (2003). Geographic routing without location information. In *MobiCom '03: Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 96–108, New York, NY, USA. ACM Press.
- Tanenbaum, A. S. (2002). *Computer networks*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 4 ed. edition.