

# Proposta e Avaliação de um Esquema de Controle de Potência com Memória em Redes Ad Hoc 802.11

Alexandre Andrade Pires , Marcelo Fernandes Fontes ,  
José Ferreira de Rezende \*

<sup>1</sup>Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) /  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

andrade, fernandes, rezende@gta.ufrj.br

**Abstract.** *This work presents an extension to a basic scheme for power control in 802.11 networks. In the basic scheme [Gomez et al., 2001], RTS and CTS control frames are sent at the maximum power level, as the DATA and ACK frames are sent at the minimum required power for communication. This last power level is extracted from a loop control based on the RTS-CTS-DATA-ACK exchange. In the scheme with memory, the power level for the control frames will not be the maximum power level anymore. Instead, the correct level will be extracted from a table that keeps the necessary power level to achieve each one of the terminal's neighbors. This power level is calculated from a prior communication, using the same mechanism of the basic scheme. We use simulations to study the Carrier Sensing Zone's influence in the basic scheme's performance, comparing both schemes with the pure IEEE 802.11 standard, as well. The results show that the basic scheme with memory presents an improved performance, as a result of efficient spatial channel reuse.*

**Resumo.** *Neste trabalho é apresentada uma extensão a um esquema básico de controle de potência para redes 802.11. No esquema básico [Gomez et al., 2001], os pacotes de controle RTS e CTS são enviados em potência máxima, enquanto que os pacotes DATA e ACK são enviados com a mínima potência de transmissão necessária para a comunicação. Esta potência é determinada a partir de uma malha de controle de potência estabelecida na troca RTS-CTS-DATA-ACK. No esquema com memória, a potência utilizada nos pacotes RTS e CTS não mais será igual à máxima possível, devendo ser extraída de uma tabela atualizada que associa a cada terminal vizinho um nível de potência necessário. Este nível foi previamente determinado, a partir de uma comunicação anterior, pelo mesmo mecanismo do esquema básico. Através de simulações, é estudada a influência da zona de detecção de portadora no desempenho do esquema básico, bem como efetuada uma comparação entre os dois esquemas e o padrão IEEE 802.11 puro. Os resultados demonstram que o Esquema Básico com Memória apresenta desempenho superior ao sem memória e ao padrão em sua forma pura, por realizar reuso espacial do canal de forma mais eficiente.*

Palavras-chave: Comunicação sem fio, redes 802.11, controle de potência.

---

\*Este trabalho foi realizado com recursos do CNPq, CAPES, COFECUB e FAPERJ.

## 1. Introdução

Terminais de computação móveis são geralmente alimentados por baterias de limitada capacidade. Quando terminais desse tipo são agrupados formando uma rede *ad hoc*, o problema é ainda mais acentuado, haja visto que, neste tipo de aplicação, o roteamento é realizado pelos próprios terminais que compõem a rede, exigindo deles um maior consumo de energia. Uma rede *ad hoc* constitui um conjunto de terminais de computação móveis conectados via enlaces sem fio, sem a existência de qualquer tipo de infra-estrutura fixa. Redes deste tipo podem ser empregadas em situações onde existe a necessidade de comunicação cooperativa e temporária entre um certo grupo de usuários, tais como operações de emergência em casos de desastres naturais e reuniões que exigem comunicação de dados entre os participantes. Com o avanço das tecnologias de comunicação sem fio capazes de suportar este tipo de serviço, particularmente o padrão IEEE 802.11 [IEEE Std 802.11, 1999], o estudo da questão do consumo de energia ganha particular importância, e vem sendo alvo de extensas pesquisas [Jung and Vaidya, 2002].

Inúmeras propostas vêm sendo feitas nos últimos anos no sentido de racionalizar o consumo de energia em aplicações *ad hoc*, visando prover aos terminais móveis que compõem a rede uma maior autonomia de funcionamento. Na maioria das vezes, estes equipamentos possuem exigência de dimensões e peso reduzidos, resultando na dificuldade do provisionamento de baterias de longa duração. Dentre as várias áreas nas quais são percebidos os esforços para lidar com tais restrições, destaca-se a que diz respeito ao estabelecimento de algoritmos de roteamento que levem em conta o problema, escolhendo rotas adequadas para um menor consumo [Gomez et al., 2001, Narayanaswamy et al., 2002, Singh et al., 1998, Toh, 2001]. Uma outra linha de pesquisa importante vem apresentando propostas no sentido de estabelecer protocolos de comunicação que tratem a questão da energia através do emprego de técnicas de controle de potência de transmissão. A idéia principal é evitar o desperdício de potência de transmissão, empregando apenas o nível de potência necessário ao estabelecimento da comunicação. Tais técnicas se baseiam no estabelecimento de um mecanismo de realimentação, por meio do qual receptor e transmissor podem trocar informações de forma a ajustar a potência das transmissões para o mínimo necessário para a manutenção do enlace, economizando energia [Agarwal et al., 2001, Ebert et al., 2000, Monks et al., 2001]. Uma outra vantagem dos mecanismos de controle de potência consiste numa potencial reutilização espacial do canal de rádio. Uma vez que, nas redes sem fio, o meio de transmissão é compartilhado e disputado pelos terminais, transmissões que utilizam menos potência ficam restritas a um alcance menor, possibilitando que outras transmissões ocorram simultaneamente, culminando com um maior reuso espacial do canal acompanhado de um aumento na vazão efetiva de dados na rede.

Um método simples para a implementação do controle de potência no padrão IEEE 802.11, utilizado em vários trabalhos, baseia-se na troca de informações relativas à potência através dos quadros RTS-CTS-DATA-ACK deste protocolo. A partir deste esquema, é possível elaborar o estabelecimento de uma malha de controle de potência, denominada de Esquema Básico. Basicamente, os quadros de controle RTS e CTS são enviados na potência máxima de cada terminal, enquanto que os quadros DATA e ACK são enviados em uma potência mais baixa, determinada a partir de informações enviadas ao transmissor e ao receptor nos quadros CTS e DATA, respec-

tivamente [Gomez et al., 2001, Agarwal et al., 2001], num processo a ser detalhado nas seções seguintes. No entanto, a diminuição da potência de transmissão destes quadros pode causar colisões, tanto no receptor (no quadro DATA) quanto no transmissor (no quadro ACK), devido à ausência de detecção da portadora por parte de estações próximas. Tais colisões levam à retransmissão destes quadros, possivelmente anulando a economia no gasto de energia obtida pela diminuição da potência. Num trabalho mais recente [Jung and Vaidya, 2002], os autores propõem um esquema de controle que evita tais colisões através de uma variação da potência de transmissão dos quadros DATA. Contudo, além de apresentar uma maior complexidade de implementação, o desempenho deste método é fortemente dependente do tamanho dos pacotes transmitidos e de uma alta sensibilidade na detecção de portadora por parte das estações móveis. No esquema básico, nenhum estudo foi feito que levasse em consideração a relação entre os raios da área de alcance e da área de detecção. Neste trabalho, este aspecto do problema é discutido e avaliado. Além disso, analisamos o desempenho de uma extensão ao esquema básico, chamado esquema básico com memória, onde as estações móveis armazenam estado com relação às potências usadas em transmissões realizadas anteriormente.

O presente artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2. são apresentados os trabalhos existentes em controle de potência no padrão 802.11. Na subseção 2.1. é apresentado detalhadamente o esquema básico de controle de potência e discutidos os fatores que influenciam o seu desempenho. Em seguida, na seção 3., é apresentado o mecanismo do Esquema Básico com Memória, uma extensão ao esquema básico. Na Seção 4. são apresentados os resultados de simulação. Por fim, a Seção 5. traz as conclusões.

## **2. Controle de Potência em Redes 802.11**

Vários tipos de mecanismos vêm sendo propostos, por diferentes autores, para implementar funcionalidades relativas ao controle de potência em redes ad hoc baseadas no padrão IEEE 802.11. Em [Karn, 1990], na descrição do protocolo MACA, já era proposto o controle de potência de transmissão. Sua idéia básica era resolver os problemas do terminal escondido e do terminal exposto através de detecção virtual de portadora, com a utilização da troca RTS-CTS, eliminando a necessidade de detecção real de portadora. Desta forma, o autor aproveitou a troca destes pacotes de controle para propor o estabelecimento de um *loop* de controle de potência, fazendo com que o transmissor seja alimentado com informações relativas à recepção, ajustando sua potência.

Em [Gomez et al., 2001] é exposto o PARO (*Power-Aware Routing Optimization*), agregando as questões de controle de potência de transmissão e de roteamento. Segundo essa proposta, a escolha de rotas é definida com base no menor gasto de energia, ao invés da tradicional busca pelo menor número de saltos. A rota escolhida é aquela na qual os nós intermediários utilizam, em conjunto, a menor potência possível em suas transmissões, necessariamente resultando em uma rota sub-ótima sob a ótica do número de saltos. Dessa forma, o loop de controle de potência é estabelecido através de mensagens de roteamento, dentro das quais é sempre informada a potência de transmissão utilizada. De posse dessa informação, aliada a outras, tais como a potência recebida, a sensibilidade do receptor e um adequado modelo de propagação, o receptor pode calcular a mínima potência necessária à transmissão, e informá-la ao transmissor. Assim, nas transmissões

seguintes, o nó já possui a informação sobre a potência necessária para atingir aquele vizinho.

Seguindo a mesma tendência de utilização de controle de potência nos mecanismos de roteamento, COMPOW [Narayanaswamy et al., 2002] defende a utilização de um único nível de potência em toda a rede (nível de potência comum). Este nível de potência seria escolhido dentre um conjunto discreto de níveis. A escolha se daria mediante a execução de todo o mecanismo de roteamento várias vezes, uma para cada nível, de tal forma que o nível escolhido seria o mínimo nível que oferecesse a mesma conectividade que o maior dos níveis.

O protocolo PCMA (*Power Controlled Multiple Access*), proposto em [Monks et al., 2001], permite que cada terminal utilize um nível diferente de potência, utilizando uma seleção de nível pacote a pacote. O esquema utiliza dois canais diferentes, sendo um deles utilizado exclusivamente para a emissão de tons de ocupado (*busy tones*), se valendo destes sinais para lidar com o problema do terminal escondido, ao invés da metodologia RTS-CTS. Quando um nó encontra-se recebendo um pacote de dados, envia periodicamente o tom de ocupado em um determinado nível de potência, que é função do máximo ruído adicional que o terminal pode suportar sem que seja detectada uma colisão com o pacote sendo recebido naquele instante. Quando um outro terminal deseja transmitir, ele escuta o canal de controle e, ao ouvir o tom de ocupado, utiliza a potência recebida para calcular o nível máximo de potência que pode ser empregado sem que sua transmissão atrapalhe a comunicação já estabelecida.

Em [Cordeiro et al., 2003], os autores propõem o protocolo SRM (*Spatial Reuse MAC*) cujo objetivo é permitir o reuso espacial do canal através do emprego do controle de potência, mas sem a necessidade do uso de um canal de controle em separado. O desempenho do protocolo é comparado aos esquemas básico [Agarwal et al., 2001] e aquele proposto em [Jung and Vaidya, 2002].

## 2.1. Esquema Básico

O mecanismo RTS-CTS do controle de acesso ao meio das redes 802.11 foi concebido com o intuito de lidar com um conhecido problema de redes sem fio, denominado terminal escondido. Este problema ocorre quando um receptor está ao alcance da transmissão de dois transmissores diferentes, que, por sua vez, encontram-se fora do alcance um do outro. Assim, se um dos transmissores estiver transmitindo dados para tal receptor, o outro transmissor será incapaz de perceber a transmissão em curso. Logo, se este último transmissor desejar, poderá iniciar uma transmissão, sobrepondo-se à transmissão ora em curso. Como o receptor será incapaz de receber os dois pacotes de dados ao mesmo tempo, haverá uma colisão, e ambos os pacotes serão descartados. A proposta da troca de pacotes RTS-CTS baseia-se no fato de que, ao desejar transmitir, o primeiro transmissor enviará um RTS (*Request To Send*). Ao ouvir o RTS, o receptor responderá com um CTS (*Clear To Send*). Como o segundo transmissor está ao alcance do receptor, ele será capaz de ouvir a transmissão do CTS, percebendo que o meio estará ocupado por certo tempo, especificado no próprio pacote CTS. A possibilidade de colisões entre os pacotes de controle (RTS e CTS) ainda existe, porém é suavizada pela curta duração destes.

A idéia do estabelecimento de uma malha fechada para controle de potência a partir da troca de pacotes RTS-CTS-DATA-ACK vem sendo utilizada, por diversos trabalhos,

como um esquema básico, a partir do qual podem se propor melhorias. Em resumo, esta técnica se baseia em utilizar os pacotes de reserva do meio de transmissão, RTS e CTS, em potência máxima, numa tentativa de minimizar os riscos de colisão. Ao mesmo tempo, utiliza-se esta troca de pacotes para estabelecer o nível mínimo de potência necessário para a comunicação entre os dois terminais, transmitindo os pacotes DATA e ACK neste nível de potência. Cabe ressaltar que esta técnica não aproveita o potencial de reuso espacial do canal, já que a reserva do meio é feita em potência máxima. Seu apelo baseia-se puramente na economia de energia, já que os pacotes DATA e ACK valem-se da malha de controle e são transmitidos em potência mais baixa. Observa-se ainda que a economia de energia pode ser bastante significativa, já que o pacote DATA tem duração várias vezes superior à dos demais.

O esquema básico pode assim ser definido de acordo com a seguinte seqüência de ações, imaginando a situação da transmissão de um pacote de um terminal 1 para um terminal 2: Inicialmente, o terminal 1 envia um pacote RTS, utilizando sua máxima potência de transmissão; ao receber o RTS, o terminal 2 compara a potência recebida com a sua sensibilidade; o terminal 2 envia, então, um pacote CTS, utilizando potência máxima, com a informação da potência de transmissão necessária para a transmissão do DATA; recebendo o CTS, o terminal 1 compara a potência recebida (do CTS) com a sua sensibilidade; em seguida, o terminal 1 ajusta a potência de transmissão para o valor especificado no CTS e envia o DATA, nesta potência, com a informação da potência de transmissão necessária para a transmissão do ACK; por fim, o terminal 2 recebe o DATA, ajusta a potência de transmissão para o valor especificado e envia o ACK nesta potência.

Quando um pacote de dados é transmitido em uma rede sem fio, existem basicamente três situações distintas para cada um dos possíveis receptores. Uma delas é da potência recebida, após a atenuação do canal, ser suficiente para promover a correta recepção do pacote. Os receptores que se encontram nessa área, denominada zona de alcance, ou de recepção, podem receber e extrair com exatidão todos os dados existentes no pacote. A segunda situação é a que ocorre quando a potência recebida é inferior à necessária para a correta recepção, mas ainda apresenta nível suficiente para que a transmissão possa ser detectada pelo receptor. Nessa situação, o receptor detecta a portadora, sabendo os instantes de início e término da transmissão, não podendo, entretanto, acessar os dados contidos no pacote. Esta área é conhecida como zona de detecção de portadora. Por fim, existe a situação na qual a potência recebida pelo receptor é tão baixa que a transmissão do pacote não será nem ao menos detectada por ele.

No padrão IEEE 802.11 é incluído nos pacotes RTS, CTS e DATA um campo que indica o tempo restante para o término da transmissão do pacote. Esta informação é utilizada por terminais que estão ao alcance da transmissão em questão para realizar uma detecção virtual de portadora. Ou seja, um terminal que percebe a transmissão em questão, não sendo o destinatário da mensagem, utilizará o campo de duração para conhecer o tempo durante o qual o canal estará ocupado. Para isso ele usará um temporizador conhecido como NAV (*Network Allocation Vector*), que determina o tempo pelo qual o canal é considerado ocupado, não cabendo, até que ele termine, qualquer tentativa de transmissão. Setando o valor do NAV com o tempo restante para o final da transmissão (recebido no campo de duração dos pacotes RTS, CTS e DATA), o terminal não fará qualquer tentativa de transmissão até que a atual termine. Esse mecanismo é usado para

diminuir a possibilidade de colisão.

No entanto, apenas os terminais que se encontram na zona de alcance podem extrair corretamente essa informação do pacote. Já os terminais que estão na zona de detecção de portadora apenas podem perceber a existência da portadora no meio, não possuindo, portanto, a informação de duração. Cabe ressaltar que, já que estes terminais estão na zona de detecção de portadora do transmissor em questão, considerando as transmissões simétricas, este também estará na zona de detecção de portadora destes terminais. Assim, se um deles decidir iniciar uma transmissão simultânea à preexistente, existirá significativa probabilidade de colisão. Assim, para suavizar essa probabilidade, o padrão estabelece que, no caso de um terminal apenas perceber a existência de portadora, sem recepção correta do pacote, ele deverá setar seu NAV com um valor fixo, chamado EIFS (*Extended Inter Frame Space*), a partir do término do pacote em questão.

Para uma transmissão de pacote RTS-CTS-DATA-ACK, a possibilidade de colisão por transmissão simultânea de um nó na área de detecção de portadora se dará quando o meio não está ocupado, ou seja, nos intervalos de tempo entre os pacotes RTS-CTS, CTS-DATA e DATA-ACK. Desta forma, o valor de EIFS deve ser grande o suficiente para, após terminado um pacote, o terminal não tente disputar o meio antes que o outro pacote daquela transmissão comece. Dado que o pacote seguinte já tenha começado, após a contagem de EIFS, o terminal testará o meio e perceberá que ele se encontra, novamente, ocupado, setando novamente seu NAV com o valor EIFS. Desta forma, a transmissão corrente poderá terminar com segurança antes que um daqueles terminais na zona de detecção de portadora tente realizar uma transmissão.

Entretanto, ao utilizar o esquema básico, uma falha pode acontecer no que foi descrito acima. Após a transmissão de um CTS, um terminal na zona de detecção de portadora atribuirá o valor EIFS ao seu NAV. Com o controle de potência, a transmissão do DATA ocorrerá em potência reduzida. Reduzindo-se a potência de transmissão ocorrerá uma conseqüente redução da zona de detecção de portadora. Assim, pode ser que o terminal em questão, após decorrido o tempo EIFS, teste o meio e não perceba a transmissão do DATA, por não mais estar na zona de detecção de portadora daquele transmissor. Assim, este terminal irá considerar o meio livre e, após um tempo de *backoff*, iniciará a transmissão de um RTS. Como, no esquema básico, o RTS é sempre transmitido em máxima potência, esta transmissão será detectada pelo transmissor, e este RTS poderá colidir com o pacote ACK que o transmissor eventualmente estiver recebendo.

Este problema é exaustivamente estudado em [Jung and Vaidya, 2002]. O trabalho demonstra que esta falha pode levar a um aumento considerável do número de colisões, e, conseqüentemente, de retransmissões. Desta forma, ao invés do desejado efeito de economia de energia, haveria um aumento efetivo do consumo na rede. É, assim, proposta uma solução para o problema. A idéia básica é que, ao transmitir um DATA em potência reduzida, o transmissor deve, periodicamente, elevar a potência do pacote até a máxima, por um tempo suficiente para que a transmissão seja percebida pelos terminais na zona de detecção de portadora. Assim, durante a transmissão do DATA, o nível de potência é elevado até o máximo, disparando a contagem de EIFS nos terminais em questão. Após isso, o nível retorna ao mínimo necessário para a comunicação, voltando a subir até o máximo após certo intervalo de tempo, suficientemente pequeno para garantir que um novo EIFS seja disparado antes que um dos terminais tente acessar o canal.

A abordagem descrita resulta em um desempenho melhor, já que minimiza as probabilidades de colisão e garante que o ganho no consumo de energia obtido com o controle de potência não será anulado por sucessivas retransmissões de pacotes. No entanto, a viabilidade da solução esbarra na dificuldade de implementar transmissores capazes de variar a potência de transmissão com a rapidez e a precisão necessárias.

Para lidar com esse problema, este trabalho apresenta a proposta do uso de uma extensão ao esquema básico, denominado Esquema Básico com Memória, a ser abordado na próxima seção.

Em [Agarwal et al., 2001], é apresentado um protocolo que utiliza informações coletadas nas comunicações anteriores para estimar o nível de potência necessário para iniciar a próxima comunicação, consistindo portanto no uso do conceito de memória. No entanto, o protocolo em questão utiliza uma abordagem diferente da exposta neste artigo, escolhendo o nível de potência adequado dentre um conjunto discreto de níveis através de um método iterativo, fazendo uso das informações coletadas para incrementar ou decrementar o nível de potência da próxima transmissão. O esquema exposto neste trabalho propõe um ajuste imediato e exato da potência de transmissão para o valor necessário, permitindo que se maximizem os ganhos relativos ao controle de potência.

### **3. Esquema Básico com Memória**

No esquema básico convencional, ou sem memória, os pacotes RTS e CTS são sempre enviados utilizando a potência de transmissão máxima. Apenas os pacotes DATA e ACK valem-se da malha estabelecida para o controle de potência. A proposta do esquema básico com memória é utilizar em cada terminal uma tabela, na qual seriam armazenados os níveis de potência anteriormente utilizados para a comunicação com cada um de seus vizinhos. Para cada endereço MAC, pertencente a um terminal próximo, haverá na tabela a exata potência necessária para a comunicação, potência esta determinada a partir da última troca RTS-CTS-DATA-ACK.

Inicialmente, todas as tabelas encontram-se vazias. Na primeira troca RTS-CTS-DATA-ACK que um terminal executa com um terminal vizinho, será incorporada à tabela uma entrada, que associa aquele terminal vizinho ao nível de potência necessário para atingí-lo. Mais especificamente, no momento em que o transmissor recebe o CTS, ele extrai do campo adequado a informação de potência excedente que foi utilizada no RTS (informação essa gravada pelo receptor). Nesse instante, ele atualiza a tabela, associando ao receptor em questão essa potência excedente, que servirá como subsídio para que o próximo RTS seja transmitido apenas com a mínima potência necessária. Da mesma forma, ao receber o DATA, o receptor retirará do campo adequado a informação a ser gravada em sua tabela, sendo utilizada nas próximas comunicações com aquele terminal. Cabe ressaltar que não é necessária qualquer modificação à estrutura dos quadros, além da já realizada para permitir o funcionamento do esquema básico. Ao receber um pacote a ser transmitido para um vizinho, a camada MAC realizará uma busca na tabela e empregará, na transmissão do RTS, aquela potência determinada anteriormente. Não obtendo resposta, o terminal transmissor entenderá que aquele vizinho pode ter se afastado dele, retransmitindo o RTS na potência máxima. Em busca de uma maior eficiência, pode-se empregar o uso de uma temporização na tabela, fazendo com que entradas que não sejam

utilizadas por determinado tempo expirem.

Dentre as vantagens obtidas nesse esquema, podemos citar a maior economia de energia e o aumento da vazão agregada devido ao reuso espacial do canal, já que, para cada transmissão, a área reservada corresponde à união da zona de detecção de portadora do pacote RTS e da zona de detecção de portadora do CTS. Se esses pacotes serão transmitidos com menos potência, tais zonas serão menores, possibilitando a existência de transmissões simultâneas entre terminais próximos.

Como desvantagem, pode-se argumentar que esse tipo de mecanismo poderia trazer grandes penalidades ao desempenho em aplicações que têm como característica a alta mobilidade dos terminais, bem como em cenários que apresentem condições de propagação adversas, como o desvanecimento rápido. Contudo, deve-se ainda salientar que este tipo de mecanismo apresentará melhor desempenho em situações de baixa mobilidade dos terminais da rede, característica de significativa parcela das aplicações de redes *ad hoc*.

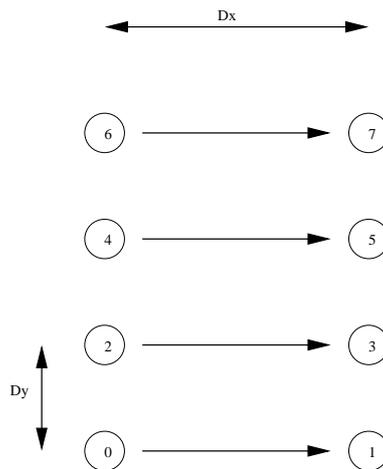
#### 4. Simulações

Para a realização das simulações foi utilizado o simulador NS 2.26 [Fall and Varadhan, 2002]. Foram implementadas modificações de forma a permitir a simulação de terminais de comunicação IEEE 802.11b utilizando controle de potência, valendo-se do esquema básico. No cenário de simulação utilizado, foi implementada a topologia indicada na figura 1, na qual são estabelecidas comunicações paralelas entre terminais que se situam em duas colunas. Gerou-se, para cada conjunto, um tráfego do tipo CBR (*Constant Bit Rate*), de taxa 5Mbps com diferentes tamanhos de pacote, que se origina nos terminais da coluna da esquerda, ou seja, referenciados por números pares, destinando-se ao terminal correspondente na coluna da direita. Assim, toda a comunicação é realizada entre cada terminal par  $N$  e seu vizinho  $N+1$ .

O objetivo deste cenário é analisar a influência da zona de detecção de portadora no desempenho do mecanismo de controle de potência. Ao variar a distância entre os conjuntos, pode-se estudar com exatidão as situações relativas possíveis entre duas transmissões concorrentes, no que diz respeito às zonas de alcance e detecção de portadora. Parte-se inicialmente de distâncias pequenas, ou seja, fazendo com que as comunicações estejam dentro da zona de alcance uma da outra, aumentando-se gradativamente, fazendo com que uma comunicação encontre-se na zona de detecção de portadora da outra, até que, por fim, estejam completamente dissociadas.

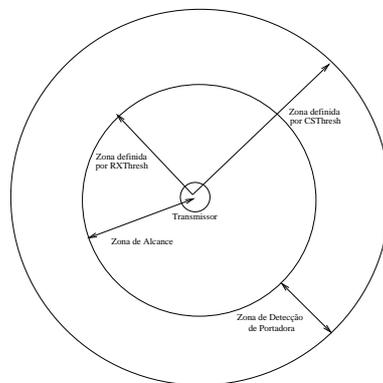
O simulador em questão utiliza dois limiares de referência, no que diz respeito à recepção de um pacote, sendo eles denominados *RXThresh* e *CSThresh*. *RXThresh* (limiar de recepção) corresponde à mínima potência necessária para que um pacote seja corretamente recebido pelo receptor. Desta forma, para que seja possível a comunicação, um certo pacote deve, após a atenuação imposta pelo canal, ainda possuir uma potência de, no mínimo, *RXThresh*. O outro limiar em questão, *CSThresh* (limiar de detecção de portadora), sempre inferior a *RXThresh*, determina a potência mínima de um pacote para que sua recepção seja detectada pelo receptor como uma portadora presente no meio.

Desta forma, para qualquer pacote enviado, para cada receptor haverá uma dentre três situações. Na primeira delas, o receptor recebe o pacote com uma potência maior ou



**Figura 1: Cenário de simulação.**

igual a  $RXThresh$  e o pacote é recebido corretamente. Numa outra situação, o pacote é recebido com potência inferior a  $CSThresh$ , sendo imediatamente descartado e não gerando sequer o evento de detecção de portadora. Para este caso, o meio é considerado livre de qualquer sinal pelo receptor em questão. Por fim, numa terceira situação, o pacote é recebido em uma potência intermediária, situada entre  $CSThresh$  e  $RXThresh$ . Neste caso, o meio é considerado ocupado pelo receptor durante a duração do pacote (detecção de portadora), porém sua recepção não pode ser efetuada corretamente.



**Figura 2: Zonas definidas ao redor do transmissor.**

A partir da definição destes dois limiares, considerando-se as transmissões omnidirecionais, pode-se visualizar a existência de duas áreas circulares em torno do transmissor, como mostrado na figura 2. O primeiro círculo delimita a área dentro da qual qualquer receptor (fixado o valor de  $RXThresh$ ) seria capaz de receber corretamente um pacote enviado, denominada zona de alcance, ou de recepção. O segundo círculo, mais externo, delimita a área dentro da qual um receptor (fixado o valor de  $CSThresh$ ) pode perceber a transmissão de um pacote, por meio de detecção de portadora. A área que se situa entre os dois círculos, na qual um receptor pode detectar a presença de portadora, porém não pode receber corretamente, é denominada zona de detecção de portadora.

Na simulação em questão foram utilizados valores para  $RXThresh$  e  $CSThresh$  tais que, empregando potência máxima na transmissão, a zona definida por  $RXThresh$

possuísse raio de 250m e a zona definida por *CSThresh* possuísse raio de 500m. A potência máxima de transmissão foi fixada em 281mW.

O tráfego oferecido à rede é superior à capacidade do canal, ou seja, garante-se que cada terminal sempre tenha um pacote em sua fila, aguardando para transmissão.

Quanto ao consumo de energia, foi utilizado um rendimento de 70% no transmissor, ou seja, ao transmitir com 70mW, a potência de consumo equivale a 100mW. Na recepção, foi fixado o valor de 100mW para a potência consumida.

As métricas de desempenho utilizadas para a comparação entre os esquemas com e sem controle de potência foram a vazão agregada da rede e o número de bytes efetivamente recebidos por unidade de energia consumida. Essas medidas foram escolhidas por constituírem indicativos sobre o desempenho da rede e sua eficiência energética, respectivamente.

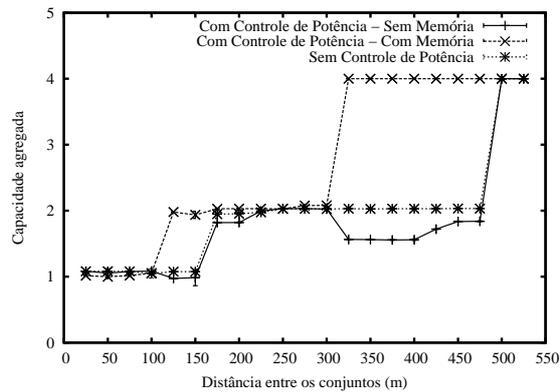
Utilizou-se uma distância de 150m entre as colunas, ou seja, distância entre transmissores e receptores. Os pacotes gerados pelo transmissor têm um tamanho de 1024 bytes. A distância entre as linhas, ou entre os conjuntos, foi variada de 25m a 525m a passos de 25m. Na simulação em questão, foram utilizados quatro conjuntos. Nas figuras 3(a) e 3(b) são apresentadas as curvas resultantes, para a vazão agregada e número de bytes entregues por unidade de energia consumida. Os intervalos de confiança utilizados são de 95%.

O gráfico exibido na figura 3(a) mostra a vazão agregada dos quatro conjuntos, utilizando o tamanho do pacote igual a 1024 bytes, normalizada em relação à vazão obtida com apenas um dos conjuntos. A normalização ajuda a percepção do desempenho por fazer referência a uma transmissão isolada, na qual inexistente disputa pelo meio. Pode-se facilmente concluir ainda que a vazão máxima obtida no cenário em questão será igual a quatro, ou seja, quatro transmissões simultâneas isoladas.

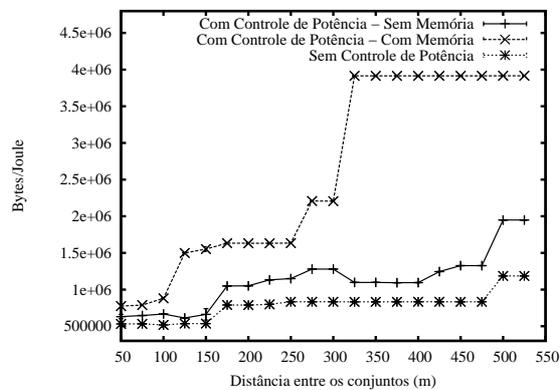
Como as zona de alcance e de detecção de portadora foram iguais a 250m e 500m, para potência de transmissão máxima, pode-se perceber nitidamente a queda de desempenho do esquema básico sem memória na região que vai de 275m a 475m, ocasionada pelo problema exposto em [Jung and Vaidya, 2002]. Nesta região, o controle de potência é prejudicado pelo fato do transmissor vizinho a um conjunto situar-se na zona de detecção de portadora dele, eventualmente ocasionando colisões. Como consequência, seu desempenho é consideravelmente degradado, em relação ao 802.11 puro.

Quando a distância entre os conjuntos atinge os 500m, as comunicações encontram-se completamente fora da zona de detecção de portadora uma das outras, resultando em comunicações independentes. Assim, como não há mais disputa pelo meio, os desempenhos dos esquemas com e sem controle de potência igualam-se ao máximo possível.

Para o esquema com memória, todas as comunicações são executadas em potência reduzida, exceto pelos pacotes iniciais para a determinação do nível necessário. Neste caso, pode-se concluir que a zona de alcance é reduzida ao mínimo necessário para atingir o receptor, no caso, 150m. Da mesma forma, a zona de detecção de portadora sofre uma redução proporcional, passando a situar-se entre 150m e 300m. Com isso, pode-se observar que, já a partir dos 300m, o esquema com memória passa a realizar o reuso



(a) vazão agregada



(b) bytes por joule

**Figura 3: Vazão e energia consumida (1024 B).**

espacial do canal, atingindo o desempenho máximo.

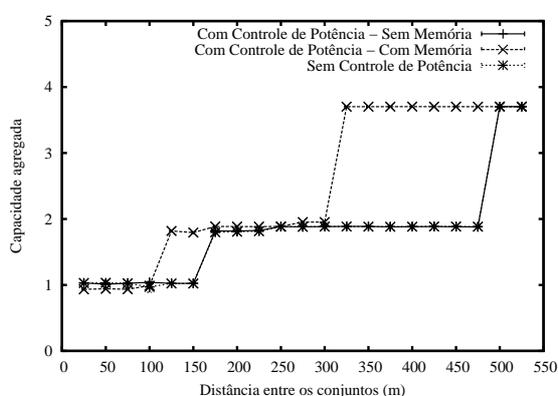
Mais ainda, pode-se perceber que este esquema não apresenta, mesmo quando a distância entre os conjuntos é tal que se situe dentro da zona de detecção de portadora (150m - 300m), uma queda de desempenho análoga à do esquema sem memória na região entre 250m e 500m.

Esta melhoria deve-se ao fato de que os pacotes RTS e CTS são também enviados em potência baixa, evitando as possíveis colisões entre RTS e CTS em máxima potência e DATA e ACK em potência reduzida. A falha do esquema básico é decorrente da redução da zona de detecção de portadora ao longo da troca RTS-CTS-DATA-ACK, o que faz com que terminais que detectaram os pacotes RTS e CTS não detectem a transmissão dos pacotes DATA e ACK. Ao utilizar a mesma potência para todos os pacotes de controle e o pacote de dados, o modelo com memória possui a zona de detecção de portadora reduzida durante toda a troca, evitando seu aumento desnecessário no início da transmissão, atenuando o problema.

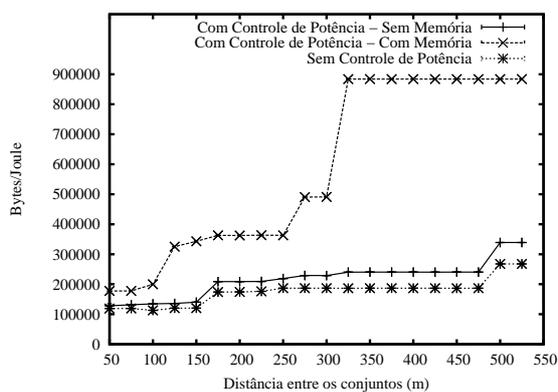
No gráfico exibido na figura 3(b) pode-se atestar a maior eficiência no consumo

de energia obtida pelos dois métodos de controle de potência quando comparados com o padrão puro. Mais uma vez, o esquema com memória, valendo-se da economia na transmissão de RTS e CTS, termina por apresentar um melhor comportamento.

Reduzindo o tamanho do pacote de 1024 bytes para 128 bytes, foram obtidos os gráficos exibidos nas figuras 4(a) e 4(b). Na figura 4(a), pode-se perceber que o efeito do aumento das colisões e consequente queda de desempenho apresentado pelo esquema básico sem memória entre 250 e 500m praticamente desaparece. Isto ocorre devido a diminuição da probabilidade de colisões e a redução do tamanho dos pacotes de dados, fazendo com que seu desempenho seja praticamente idêntico ao do padrão puro.



(a) vazão agregada



(b) bytes por joule

**Figura 4: Vazão e energia consumida (128 B).**

Na figura 4(b), percebe-se, numa comparação com a figura 3(a), que, para pacotes de 128 bytes, a eficiência no consumo é bastante reduzida. Este efeito é decorrente do aumento do número de pacotes de controle RTS e CTS quando pacotes de dados de tamanho menor são utilizados.

## 5. Conclusões

Neste trabalho foram considerados dois métodos de controle de potência baseados no Esquema Básico. Um deles, o Esquema Básico propriamente dito, utiliza a transmissão de RTS e CTS em potência máxima, fazendo com que DATA e ACK sejam transmitidos em potência reduzida, calculada com base na realimentação provida pela troca RTS-CTS-DATA-ACK. No segundo método, proposto neste trabalho, foi utilizado um esquema com memória, no qual os terminais baseiam-se em uma comunicação anterior para determinar a potência a ser utilizada nos pacotes RTS e CTS. Esta informação é obtida através da malha de controle citada e guardada em uma tabela que associa a cada vizinho um nível de potência necessário.

Foram realizadas simulações capazes de avaliar o desempenho dos dois modelos, comparando-os ao padrão IEEE 802.11 puro, tanto em termos de vazão agregada, quanto em termos de eficiência e consumo de energia. No cenário utilizado para simulação, o esquema básico com memória mostrou-se superior ao esquema básico sem memória, nas duas métricas consideradas. A melhoria deve-se ao fato do mecanismo com memória realizar um efetivo reuso espacial do canal. Já o mecanismo sem memória não o realiza, sendo seu uso justificado apenas pelo ganho no consumo de energia em relação ao modelo 802.11 puro.

Além disso, foi demonstrado nas simulações o efeito prejudicial ao desempenho do esquema básico sem memória, falha apontada em [Jung and Vaidya, 2002]. Os resultados demonstraram que, quando dois transmissores encontram-se a uma distância tal que se situem dentro da zona de detecção de portadora um do outro, o esquema básico apresenta significativa queda de vazão agregada, ocasionada pelo aumento de colisões entre pacotes de controle enviados em potência máxima e pacotes enviados a potência reduzida, não detectados pelos transmissores vizinhos. Mostrou-se ainda que o esquema com memória não apresenta o problema em questão, por não realizar a diminuição da zona de detecção de portadora ao longo da troca RTS-CTS-DATA-ACK, enviando os pacotes de controle e de dados em um mesmo nível de potência, com isso apresentando um melhor desempenho, além de maior eficiência no consumo de energia.

O esquema básico com memória é mais adequado quando o cenário da aplicação possui baixa mobilidade, sendo mais eficiente que o esquema básico sem memória. São necessárias novas investigações abordando diferentes tipos de cenário, com e sem mobilidade, além de pesquisas que avaliem a influência de parâmetros como a sensibilidade do receptor no desempenho destes mecanismos.

## Referências

- Agarwal, S., Krishnamurthy, S., Katz, R. H., and Dao, S. K. (2001). Distributed power control in ad-hoc wireless networks. In *PIMRC01*.
- Cordeiro, C., Gossain, H., and Agrawal, D. (2003). A spatial reuse enabling power control MAC protocol for wireless ad hoc networks. Technical report, University of Cincinnati.
- Ebert, J. P., Stremmel, B., Wiederhold, E., and Wolisz, A. (2000). An energy-efficient power control approach for WLANs. In *Journal of Communications and Networks*.
- Fall, K. and Varadhan, K. (2002). The NS Manual. Technical report, The VINT Project.

- Gomez, J., Campbell, A. T., Naghshineh, M., and Bisdikian, C. (2001). Conserving transmission power in wireless ad hoc networks. In *ICNP'01*.
- IEEE Std 802.11 (1999). Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. IEEE Standard 802.11.
- Jung, E. and Vaidya, N. H. (2002). A power control MAC protocol for ad hoc networks. In *MOBICOM'02*.
- Karn, P. (1990). MACA - a new channel access method for packet radio. In *ARRL Computer Networking Conference*.
- Monks, J. P., Bharghavan, V., and mei W. Hwu, W. (2001). A power controlled multiple access protocol for wireless packet networks. In *INFOCOM 2001*.
- Narayanaswamy, S., Kawadia, V., Sreenivas, R. S., and Kumar, P. R. (2002). Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. In *European Wireless 2002*.
- Singh, S., Woo, M., and Raghavendra, C. S. (1998). Power-aware routing in mobile ad hoc networks. In *MOBICOM'98*.
- Toh, C.-K. (2001). Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks. pages 138–147.