

FN-ALCA: Esquema de Controle de Potência para Economia de Energia e Aumento de Capacidade de Redes Ad Hoc 802.11*

Alexandre Andrade Pires¹, José Ferreira de Rezende¹, Carlos Cordeiro²

¹Grupo de Teleinformática e Automação
Universidade Federal do Rio de Janeiro

²Philips Research USA
Briarcliff Manor, NY 10510

andrade@gta.ufrj.br, rezende@gta.ufrj.br, Carlos.Cordeiro@philips.com

Abstract. *This work presents a new power control scheme for ad hoc 802.11 networks. The method, FN-ALCA (Farthest Neighbor - ALCA), allows a pair of communicating terminals to make RTS-CTS exchange at lowest power level needed to reach their farthest neighbors. Allied to this approach, our proposal takes advantage of ALCA (Asymmetric Link Collision Avoidance) scheme, a mechanism designed to overcome a known deficiency of the Basic Scheme for power control in 802.11 ad hoc networks. Through extensive simulations, we show that the proposed scheme is able to offer an expressive energy saving and an increase of network capacity, when compared to 802.11 standard and other power control schemes.*

Resumo. *Este artigo apresenta a proposta de um esquema para controle de potência em redes ad hoc 802.11, denominado FN-ALCA (Farthest Neighbor - ALCA). FN-ALCA faz com que os terminais realizem a troca RTS-CTS na potência mínima necessária para atingir os respectivos terminais vizinhos mais distantes, de forma a silenciar todos os potenciais interferidores. Adicionalmente, a proposta vale-se do esquema ALCA (Asymmetric Link Collision Avoidance), projetado para lidar com a principal deficiência do Esquema Básico para controle de potência. Através de simulações, foi possível comprovar que a utilização da nova técnica é capaz de oferecer uma expressiva economia de energia e um aumento da capacidade da rede, quando comparada ao padrão 802.11 e a outras técnicas de controle de potência.*

1. Introdução

A energia armazenada nos terminais de uma rede ad hoc é um recurso escasso. Primeiro porque essas redes são compostas por equipamentos móveis alimentados por baterias de capacidade limitada, já que baterias de longa duração não podem ser empregadas,

*Este trabalho foi parcialmente realizado com recursos do CNPq, RNP, FINEP e FUNTTEL.

tendo em vista restrições de peso e tamanho. Segundo, a ausência de infra-estrutura fixa dessas redes obriga as estações a participarem do mecanismo de roteamento. Conseqüentemente, a energia dos terminais passa a ser um recurso global da rede e não restrito às próprias estações. Desta forma, o gerenciamento das reservas de energia de cada terminal ganha substancial importância, uma vez que ele determina o tempo de vida da rede.

Vários trabalhos recentes [Jung e Vaidya, 2002, Gomez et al., 2001, Narayanaswamy et al., 2002, Singh et al., 1998, Toh, 2001, Agarwal et al., 2001, Monks et al., 2001] têm proposto métodos para atingir menor consumo de energia. A grande maioria focada no padrão IEEE 802.11 [802, 1999a, 802, 1999b]. Entre as áreas mais pesquisadas pode-se destacar a que visa elaborar novas técnicas de roteamento que levem em conta o estado atual de energia dos terminais, tentando escolher rotas que maximizem o tempo de vida da rede [Gomez et al., 2001, Narayanaswamy et al., 2002, Singh et al., 1998, Toh, 2001]. Uma outra área de grande importância nesse contexto tem por objetivo minimizar o consumo da rede com técnicas de controle da potência de transmissão. A idéia principal consiste em utilizar numa transmissão o nível mínimo de potência necessário, evitando desperdício de energia. Além de um melhor aproveitamento da energia dos terminais, o controle de potência pode oferecer ainda um maior reuso espacial do canal, resultando em uma menor contenção no meio e aumentando a vazão agregada da rede. Adicionalmente, ao reduzir a potência das transmissões, o controle de potência reduz a interferência no interior do canal.

As técnicas de controle de potência são implementadas através do uso de uma malha fechada, na qual informações de potência são realimentadas do receptor para o transmissor. Assim, de posse destas informações, o transmissor em questão pode ajustar o nível de sua potência de transmissão ao valor considerado adequado [Agarwal et al., 2001, Ebert et al., 2000, Monks et al., 2001]. Várias propostas sugerem a inclusão de campos de informação adicionais nos quadros de dados e de controle do padrão 802.11, a fim de possibilitar a realimentação de informações de potência. Isto representa uma solução simples, exigindo apenas mudanças no *firmware* dos equipamentos 802.11, e tem recebido especial atenção por parte dos pesquisadores. No entanto, o principal ponto fraco consiste na criação de enlaces assimétricos entre terminais que disputam o meio. Isto ocorre quando as potências de transmissão dos terminais são diferentes, devido ao controle de potência estabelecido. Os enlaces assimétricos aumentam substancialmente a probabilidade de colisão, colocando em risco os ganhos obtidos com o controle de potência. Por outro lado, soluções distribuídas que visam a escolha de uma potência comum de transmissão entre todos os terminais são complexas, além de exigirem uma grande troca de informações em ambientes móveis.

Neste artigo, é proposta e avaliada uma solução, FN-ALCA, capaz de oferecer uma substancial economia de energia na rede. Para evitar colisões na presença de enlaces assimétricos, a proposta vale-se do esquema ALCA [Pires e de Rezende, 2004] e adota uma estratégia que permite o reuso do canal, com a colaboração da camada de roteamento. A solução proposta tem a vantagem de ser simples, eficiente e de fácil implementação. Com o emprego de simulação, FN-ALCA foi comparado a outras soluções, como o PCM [Jung e Vaidya, 2002], o Esquema Básico [Gomez et al., 2001], o ALCA [Pires e de Rezende, 2004] e o IEEE 802.11 puro, levando em conta o nível de

sinal-ruído visto pelos terminais. Os resultados mostram um aumento de até 20% na capacidade da rede e um ganho em energia da ordem de 200%.

O restante deste artigo é organizado da forma descrita a seguir. Na seção 2, é apresentada uma revisão do protocolo MAC do padrão IEEE 802.11, assim como alguns trabalhos existentes na área de controle de potência. A seguir, a seção 3 descreve o mecanismo proposto, FN-ALCA. Na seção 4, são relatadas as principais modificações realizadas no simulador escolhido, a fim de implementar a proposta e avaliá-la. Na seção 5 são apresentados os resultados de simulação. Por fim, a seção VI apresenta as principais conclusões deste trabalho.

2. Controle de Potência em Redes IEEE 802.11

No padrão IEEE 802.11, o acesso ao meio em redes ad hoc é coordenado pelo mecanismo DCF (*Distributed Coordination Function*). O mecanismo prevê a troca dos quadros de controle RTS e CTS, transmitidos, respectivamente, pelo transmissor e pelo receptor, antes de um quadro DATA e o respectivo ACK. Este *handshake* é uma forma de contornar um conhecido problema de redes sem fio, denominado terminal escondido [Fullmer e Garcia-Luna-Aceves, 1997, Moh et al., 1998]. Quanto ao acesso ao meio, o DCF realiza duas formas diferentes de detecção de portadora: física (monitorando diretamente o meio compartilhado) e virtual. A detecção virtual de portadora utiliza o campo de duração, que é incluído nos quadros RTS e CTS. O campo em questão contém o tempo restante calculado para que o terminal que originou a comunicação (fonte) receba um quadro ACK do terminal destino, o que finaliza a transmissão corrente. O campo de duração é utilizado por outros terminais da rede para ajustar o valor de um contador decrescente denominado NAV (*Network Allocation Vector*). Assim, para cada terminal da rede, o valor constante no NAV determina o tempo restante da transmissão corrente. Antes que esse contador expire, o meio é considerado ocupado. Em resumo, o meio será considerado ocupado se houver detecção física ou virtual de portadora. Em outras palavras, se o NAV de um terminal estiver zerado, ele poderá transmitir, a não ser que a detecção física esteja presente.

A área coberta pelos alcances de transmissão do transmissor e do receptor deve ser reservada para a comunicação. Os demais terminais que estejam dentro dessa área não devem iniciar uma transmissão antes que a transmissão corrente termine. Desta forma, esta região será denominada neste trabalho de *zona de silêncio*. Através do emprego dos quadros RTS e CTS, o padrão 802.11 é capaz de silenciar os terminais na zona de silêncio, resolvendo, embora não completamente [Jung e Vaidya, 2002], o problema do terminal escondido.

Um mecanismo simples para a implementação de controle de potência em redes 802.11, denominado Esquema Básico - EB, é baseado na troca de informações de potência valendo-se da dinâmica RTS-CTS-DATA-ACK [Gomez et al., 2001, Agarwal et al., 2001], e constitui o ponto de partida para muitos outros esquemas propostos. Em poucas palavras, esta técnica se baseia na idéia de transmitir os quadros RTS e CTS em potência máxima, conseguindo com isso a reserva da zona de silêncio para o restante da transmissão. A troca RTS-CTS é, assim, utilizada para determinar o nível mínimo de potência necessário para a comunicação, possibilitando a transmissão do

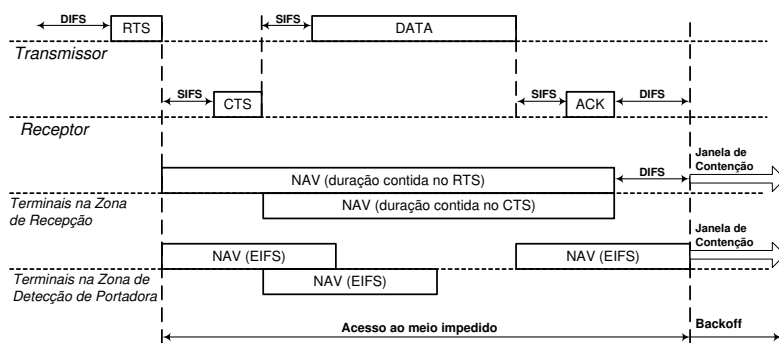


Figure 1: Figura 1 - Comportamento dos terminais na ZR e na ZDP

DATA e do ACK em potência reduzida. Claramente, o mecanismo não representa qualquer reuso espacial, já que a reserva do meio é sempre realizada em potência máxima. Por outro lado, o consumo de energia pode ser significativamente reduzido, tendo em vista a redução de potência para a troca DATA-ACK. O ganho pode ser substancial, pois o quadro DATA possui duração muito superior à dos demais, constituindo a maior fonte de consumo de energia.

A detecção virtual de portadora do padrão 802.11 funciona adequadamente para terminais na zona de recepção (ZR) do par fonte-destino envolvido em uma comunicação, dentro da qual os terminais podem decodificar os quadros recebidos e ajustar corretamente os valores de duração da transmissão corrente no NAV. Entretanto, para os terminais que se encontram na zona de detecção de portadora (ZDP) do par em questão, apenas a portadora pode ser percebida, ficando então estes terminais sem acesso à informação de duração da transmissão corrente (IDTC) contida nos quadros RTS e CTS. Para contornar o problema, o padrão especifica que, quando um terminal detectar a presença física de portadora, sem, no entanto, conseguir extrair a IDTC, ele deve ajustar seu NAV para um valor fixo, denominado EIFS (*Extended Inter Frame Space*), assim que a portadora não for mais detectada no meio. A figura 1 ilustra o comportamento dos demais terminais, quando uma comunicação ocorre no meio. SIFS e DIFS são intervalos padronizados entre quadros que fazem parte do padrão IEEE 802.11. Pode-se perceber na figura 1 que o valor de EIFS deve ser suficientemente grande para permitir a recepção do quadro ACK, impedindo que, após o final do DATA, um terminal na ZDP tente acessar o meio.

Entretanto, podemos perceber que, quando o controle de potência é empregado, a potência do DATA é inferior à dos quadros RTS e CTS, resultando numa diminuição da ZDP. Desta forma, um nó que termina por situar-se fora da nova ZDP, não mais detectará a portadora do quadro DATA no meio. Assim, quando seu NAV expirar, após a contagem de EIFS (gerada pelo quadro CTS ou RTS), ele concluirá que o meio encontra-se livre e pode iniciar uma transmissão de RTS em potência máxima, colidindo com a transmissão corrente. Trata-se de uma consequência da criação de enlaces assimétricos: os nós comunicantes transmitindo em potência reduzida, enquanto que outro terminal, alheio a esta transmissão, tenta iniciar uma nova transmissão em potência máxima.

O problema foi estudado e demonstrado por simulações em [Jung e Vaidya, 2002], e suas consequências incluem perda de vazão e aumento de consumo, devido ao número excessivo de colisões e conseqüentes retransmissões. A fim de erradicar o problema, os

autores propuseram o protocolo PCM (*Power Control Mac*). O PCM utiliza uma elevação periódica da potência de transmissão do quadro DATA até a potência máxima, com o intuito de evitar as colisões citadas. A potência do DATA é elevada diversas vezes ao longo da transmissão do quadro, fazendo com que os terminais na ZDP atualizem seus NAVs com o valor EIFS repetidamente. Assim, o DATA é enviado alternando entre longos períodos na potência reduzida e curtos períodos em potência máxima com o objetivo de disparar várias vezes a contagem de EIFS nos terminais na ZDP.

Em [Jung e Vaidya, 2002], o PCM é avaliado por simulações e demonstra atingir desempenho e economia de energia superiores ao EB, por evitar o problema dos enlaces assimétricos. No entanto, uma crítica a ser feita a este tipo de solução consiste na exigência de transmissores capazes de realizar grandes variações de potência rapidamente e com grande precisão. Isto implicaria em mudanças substanciais nos equipamentos de rádio atuais baseados no padrão 802.11.

Uma outra alternativa para solucionar o problema dos enlaces assimétricos pode ser encontrada no Esquema Básico com Memória (EBM) [Pires et al., 2004]. Neste esquema, cada terminal armazena uma tabela que relaciona a cada terminal em comunicação um nível de potência anteriormente utilizado. Desta forma, os quadros RTS e CTS podem ser enviados também em potência reduzida, atenuando o problema dos enlaces assimétricos, além de gerar uma economia adicional de potência. No entanto, este mecanismo oferece um menor nível de proteção para as transmissões, já que a reserva da zona de silêncio é efetuada em potência reduzida. Esta menor proteção pode, em algumas topologias, resultar em maiores probabilidades de colisão. Além disso, o desempenho do EBM pode ser seriamente afetado em redes cujos terminais apresentam elevada mobilidade, tendo em vista a rápida desatualização dos valores das tabelas.

3. Esquema Proposto

O esquema de controle de potência proposto neste trabalho, FN-ALCA, apóia-se em dois mecanismos. Um deles é o ALCA (*Asymmetric Link Collision Avoidance*), proposto em [Pires e de Rezende, 2004], destinado a evitar o acréscimo de colisões decorrente da criação de enlaces assimétricos, exposto na seção 2. O segundo, que corresponde à principal proposta deste trabalho, é uma reserva seletiva do meio, denominada FN-ALCA (*Farthest Neighbor - ALCA*), que aumenta o reuso do canal através do uso de informações coletadas pelo protocolo de roteamento. Esse tipo de mecanismo é um exemplo de cooperação entre camadas, por vezes necessária na otimização do desempenho das redes ad hoc (*cross-layer optimization*).

3.1. ALCA: Evitando Colisões em Enlaces Assimétricos

Conforme discutido anteriormente, enlaces assimétricos decorrentes da redução de potência para a transmissão do DATA e do ACK podem resultar em acréscimo de colisões, e conseqüentes retransmissões, terminando por causar problemas de desempenho. Este problema é inerente a qualquer solução para controle de potência baseada no Esquema Básico [Gomez et al., 2001, Agarwal et al., 2001]. Desta forma, uma solução para o problema em questão é crítica e essencial para qualquer protocolo de controle de potência que empregue quadros de controle (RTS e CTS) em alta potência para reserva do meio e quadros DATA e ACK em potência reduzida para a diminuição do consumo.

A solução proposta em [Pires e de Rezende, 2004], o mecanismo ALCA (*Asymmetric Link Collision Avoidance*), supera este problema ao permitir que terminais na ZDP de uma transmissão tenham acesso à informação de duração da transmissão corrente (IDTC), apesar do fato destes terminais não poderem decodificar os quadros recebidos e acessar o campo de duração contido no RTS e CTS. Conforme descrito anteriormente, o problema dos enlaces assimétricos é uma consequência direta desta condição.

Apesar dos terminais na ZDP não poderem realizar a correta recepção de um quadro, eles são capazes de detectar a presença da portadora no canal. Mais ainda, eles são capazes de, com algum grau de precisão, determinar os instantes de início e término da presença desta portadora. O ALCA baseia-se em enviar a IDTC através da duração física das portadoras que transportam os quadros RTS e CTS. Desta forma, terminais na ZDP poderão ter acesso à IDTC e, ajustando adequadamente seus NAVs, poderão evitar o acesso ao canal enquanto a transmissão corrente não tenha chegado ao fim com sucesso.

A dinâmica do protocolo é baseada em duas etapas. Na primeira etapa, o nó que vai iniciar uma transmissão, calcula a IDTC e a grava no pacote RTS a ser transmitido. De posse da IDTC ele decide qual duração de portadora (DP) ele deve usar para que essa informação seja recuperada pelos terminais na ZDP. Assim, o nó inclui, ao final do RTS, uma seqüência de bits de um tamanho tal que faça com que o RTS tenha no meio a DP escolhida. Os nós que estão na ZR irão ignorar a presença destes bits, bem como a DP, extraindo a IDTC diretamente do cabeçalho do pacote.

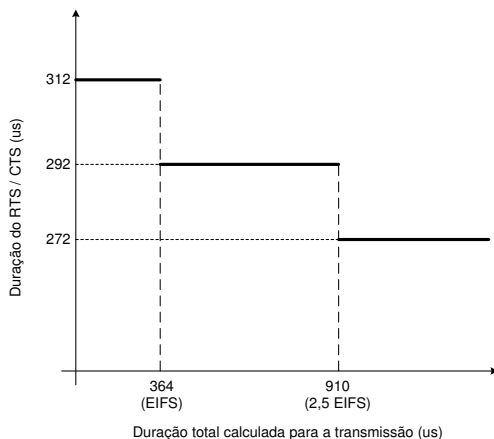


Figure 2: Escolha de DP no transmissor

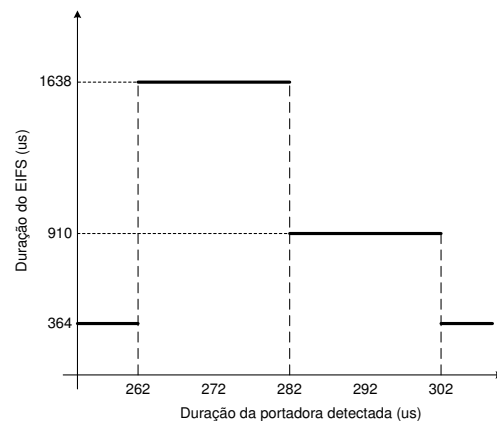


Figure 3: Escolha de EIFS adequado no receptor

Numa segunda etapa, um nó na ZDP do primeiro percebe a existência de uma portadora de duração DP_i . Ao perceber que ele não será capaz de decodificar corretamente o pacote, ao invés de simplesmente gravar o valor EIFS padrão em seu NAV, ele irá, de posse da duração de portadora DP_i , determinar um novo valor para EIFS, a ser gravado no NAV. Este valor deverá ser maior que a IDTC, para que o nó evite o acesso ao meio até que a transmissão corrente termine. Ao transmitir um CTS em resposta a um RTS, os terminais devem agir de forma análoga, modificando a duração física da portadora do CTS de acordo com a IDTC.

É importante perceber que ALCA poderá funcionar em conjunto com qualquer esquema de controle de potência que utilize pacotes de controle em potência máxima,

seguidos por um DATA em potência reduzida, sem a necessidade de um canal de controle adicional. Nas figuras 2 e 3, podemos ver o processo de escolha da duração de portadora, no transmissor, e a escolha do EIFS adequado, nos terminais na ZDP.

3.2. FN: Reservando o canal de forma seletiva

A idéia principal por trás da troca RTS-CTS que precede uma transmissão é efetuar a reserva do meio, para que a transmissão possa ocorrer com os demais terminais da rede em silêncio, evitando colisões. Entretanto, é importante salientar que nem todos os terminais ao redor do par de nós comunicantes necessitam ser silenciados. A reserva do meio deve ser feita de forma que sejam silenciados apenas os nós que representam real perigo de interferência, tanto no receptor, durante a recepção do DATA, quanto no transmissor, durante a recepção do ACK. No protocolo MAC 802.11, a reserva de meio é realizada em potência máxima. Essa abordagem também é adotada pelo Esquema Básico, pelo PCM, e por vários outros esquemas de controle de potência. No entanto, é fácil perceber que a transmissão de RTS-CTS em potência máxima é por demais conservadora. Na verdade, para conseguir silenciar todos os potenciais interferidores à sua volta, um nó cercado por N terminais vizinhos deveria transmitir um RTS na potência exata para atingir o seu vizinho mais distante (*Farthest Neighbor - FN*).

Usando esta abordagem, pode-se conseguir uma melhor eficiência no uso da energia disponível, contando ainda com a vantagem adicional de poder obter uma melhor utilização do canal. Isto se deve a uma diminuição da potência média de transmissão das estações, levando a uma reutilização espacial do meio.

Além disso, ao utilizar este esquema em conjunto com o ALCA, pode-se optar por atingir o último vizinho apenas no seu limiar de detecção de portadora. Ou seja, não é necessário nem mesmo que o vizinho mais distante decodifique o pacote de controle. Basta que ele tenha acesso à duração de portadora, pois o ALCA se encarregará de configurar corretamente o NAV, possibilitando a completa proteção da transmissão em andamento.

Desta forma, o FN-ALCA escolherá a potência de transmissão de forma a realizar duas tarefas. A primeira delas, já descrita, é a de fazer com que o pacote transmitido chegue ao vizinho mais distante com o nível mínimo de potência para disparar neste nó a detecção de portadora. Se P_{FN} é a potência necessária para enviar um pacote ao vizinho mais distante de um terminal, $RXThresh$ é a potência mínima que deve atingir um receptor para a correta recepção de um pacote e $CSThresh$ a potência mínima para disparar uma detecção de portadora, a potência a ser empregada para realizar esta tarefa pode ser determinada a partir da equação 1.

$$P_1 = \frac{CSThresh}{RXThresh} P_{FN} \quad (1)$$

A segunda tarefa é a de chegar ao terminal ao qual se destina o pacote com o nível mínimo para a correta recepção do mesmo. Assim, se denominarmos de P_2 a potência para realizar esta segunda tarefa, a potência escolhida para a transmissão é dada pela equação 2.

$$P_{RTS/CTS} = \max(P_1, P_2) \quad (2)$$

4. Modificações no Simulador

Para a avaliação do esquema proposto, o método escolhido foi o uso de simulações, utilizando o simulador Network Simulator versão 2.26 [Fall e Varadhan, 2002]. Várias modificações foram implementadas no simulador original, tendo em vista o uso de controle de potência. Em uma comunicação RF, além de ruído, cada receptor encontra-se exposto a um certo nível de interferência co-canal. Assim, podemos definir um parâmetro de qualidade de recepção de um sinal chamado SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*). Em cada instante, o SINR em certo receptor pode ser calculado ao dividir a potência do quadro em recepção pela soma da potência total de interferência com a potência do patamar de ruído. O patamar de potência de ruído pode ser definido como a potência em um dado receptor quando todos os transmissores da rede estão em silêncio. A fim de investigar os efeitos do SINR sobre os métodos de controle de potência considerados, as influências do ruído e da interferência co-canal foram também adicionadas ao simulador em questão, sob a forma de um módulo de controle de SINR. A equação 3 fornece o nível de SINR em um dado receptor, quando este receptor encontra-se recebendo um pacote de potência P_R . Na fórmula, N representa a potência de ruído no receptor, e I_j representa a potência do sinal j dentre os n sinais interferentes.

$$SINR_{RX} = \frac{P_R}{N + \sum_{j=1}^n I_j} \quad (3)$$

Assim, pacotes abaixo do limiar $CSThresh$, que seriam prontamente descartados na implementação original, devem ter sua duração e nível de potência repassados à camada MAC, para que o módulo de controle de SINR possa ser devidamente atualizado. O nível de SINR é incrementado ou decrementado, de acordo com o início, término e nível de potência de todos os pacotes que atingem um terminal.

Desta forma, a potência transmitida por um dado transmissor deve satisfazer a dois quesitos. Em primeiro lugar, após a atenuação sofrida no canal, ele deve ser recebido acima do limiar $RXThresh$, que representa a mínima potência para a correta recepção de um pacote. A fim de possibilitar isso, a potência de transmissão deve ser superior à obtida pela equação 4 [Gomez et al., 2001], onde $P_{TX_{RXThresh}}[i]$ representa a potência de transmissão empregada para que o sinal atinja o receptor com potência igual a $RXThresh$. $P_R[i-1]$ é a potência que atingiu o receptor após a transmissão de um frame anterior, enviado com potência $P_{TX}[i-1]$.

$$P_{TX_{RXThresh}}[i] = \frac{RXThresh}{P_R[i-1]} P_{TX}[i-1] \quad (4)$$

Além disso, o transmissor deve ainda empregar um nível de potência que resulte em um determinado nível de SINR no receptor, $SINRThresh$. Este nível de potência deve ser superior ao que resulta da equação 5 (análoga à equação 4). Onde $SINR_{RX}[i-1]$ representa o SINR medido no receptor durante o último pacote corretamente recebido.

$$P_{TX_{SINRThresh}}[i] = \frac{SINRThresh}{SINR_{RX}[i-1]} P_{TX}[i-1] \quad (5)$$

Assim, para satisfazer aos dois quesitos, basta que o transmissor empregue a potência que satisfaça ao pior caso dentre os dois, que é dada pela equação 6. Na implementação do módulo de controle de potência desenvolvido, este nível de potência é calculado no receptor e enviado ao transmissor nos quadros CTS e DATA (ressalta-se que, neste contexto, o termo "receptor" se refere ao receptor de um certo quadro DATA).

$$P_{TX}[i] = \max(P_{TX_{RXThresh}}[i], P_{TX_{SINRThresh}}[i]) \quad (6)$$

É importante ressaltar a inclusão do módulo de controle de SINR, já que uma das principais vantagens do controle de potência é justamente a redução da interferência co-canal. Com a inclusão deste módulo, foi possível constatar um efeito benéfico das técnicas de controle de potência, que não ficava evidente com o uso do simulador original.

Além disso, foram implementadas modificações para permitir que os terminais da simulação pudessem utilizar, além do protocolo MAC 802.11 original, o Esquema Básico, o PCM, o Esquema Básico com ALCA e o FN-ALCA. Para isso, o módulo de controle de potência estabelece a realimentação de informações, acessando o módulo de SINR e passando informações para a camada MAC. Para que seja implementado o ALCA, foi ainda necessário fazer com que, sempre que o nível de ruído (controlado pelo módulo de SINR), fosse superior ao limiar $CSThresh$, o que indica detecção de portadora, essa informação seja, também, levada em conta pelo módulo de controle de potência. De posse do tempo durante o qual o nível de ruído fica acima desse valor, o ALCA decide o EIFS adequado para ajustar o NAV da estação. Assim, existe inclusive a possibilidade de que a recepção de múltiplos pacotes confunda o mecanismo ALCA, exatamente como pode, efetivamente, acontecer na detecção física de portadora de uma implementação real. Todas essas modificações contribuíram para que a experimentação se aproximasse do caso real.

Foi incluído ainda um módulo de vizinhança que, rodando na camada de rede do terminal, é capaz de determinar quais são os vizinhos desta estação, bem como a potência necessária para atingir cada um deles. Este módulo funciona através da transmissão de pacotes de *Hello*, transmitidos periodicamente. Através deles, os terminais aprendem o suficiente sobre sua vizinhança para que possam escolher adequadamente a potência de transmissão utilizada em cada pacote, conforme descrito na subseção 3.2. Antes de transmitir um pacote, a camada MAC acessa a tabela de vizinhança, construída pela camada de rede, a fim de determinar o vizinho mais distante, dentro do conceito de *cross-layer optimization*. Quando o terminal encontra-se em comunicação direta com outro, a camada MAC realiza as atualizações pertinentes na tabela de vizinhança, corrigindo a potência de transmissão necessária para atingir aquele determinado terminal de acordo com as variações de SINR do mesmo, realimentadas pelo módulo de controle de potência. A figura 4 esquematiza a implementação em questão, marcando em cinza os módulos adicionados.

5. Avaliação de Desempenho

A topologia escolhida para demonstrar a eficiência de um protocolo de controle de potência para redes ad hoc deve ser a mais geral possível, tendo em vista que uma

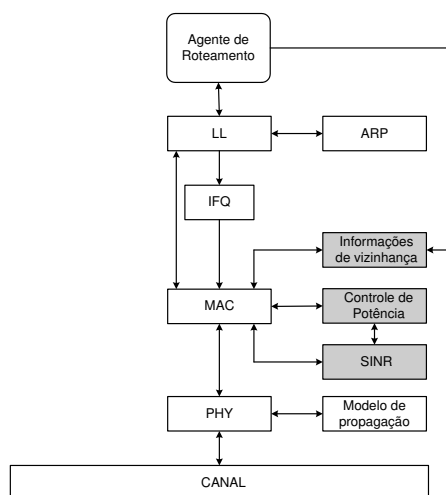


Figure 4: Implementação do simulador

rede deste tipo caracteriza-se pela localização desordenada dos terminais que a compõem. Desta forma, toda a avaliação de desempenho foi realizada em cenários aleatórios, gerados pelo posicionamento arbitrário de 20 terminais transmissores e 20 terminais receptores em uma determinada área.

5.1. Modelo de Simulação

Como descrito na seção 4, para a realização das simulações foi utilizado o simulador NS 2.26 [Fall e Varadhan, 2002] e implementadas modificações de forma a permitir a simulação de terminais de comunicação IEEE 802.11b, utilizando controle de potência utilizando o Esquema Básico puro, o Esquema Básico em conjunto com o protocolo ALCA, o esquema PCM e o esquema proposto neste trabalho, o FN-ALCA. A taxa de transmissão de dados utilizada no canal de rádio foi de 11 Mbps e a taxa básica de 2 Mbps. O tamanho do pacote foi fixado em 1024 bytes. Cada terminal transmissor na rede gera um tráfego do tipo CBR (*Constant Bit Rate*).

Foi considerada uma Zona de Detecção de Portadora (ZDP) aproximadamente duas vezes maior do que a Zona de Recepção (ZR). No maior nível de potência utilizado, a ZDP é de 500m, e a ZR de 250m. Cada simulação corresponde a um tempo de 30s. Não foi considerada mobilidade dos terminais nas simulações. São avaliados o padrão IEEE 802.11 puro, o Esquema Básico, o Esquema Básico em conjunto com o ALCA, o PCM e o FN-ALCA.

O cenário de simulação corresponde a um conjunto de cenários aleatórios, gerados através do posicionamento arbitrário de 40 terminais em uma certa área física. Destes, 20 terminais são transmissores e 20 são receptores. É exigido que todas as transmissões sejam de um único salto, fazendo com que os terminais da rede não executem roteamento. Isto foi feito para impedir que efeitos decorrentes da descoberta de rotas pudessem mascarar os resultados da avaliação. No entanto, um nó não é obrigado a comunicar-se somente com o nó mais próximo a ele, podendo escolher qualquer um dentre os que se situam dentro de sua Zona de Recepção (ZR). Foram realizadas simulações variando a dimensão da área ocupada pela rede e a carga da rede (taxa de geração dos tráfegos CBR). A área na qual os terminais foram distribuídos foi variada, assumindo os valores de 1km^2 ,

2, 25km^2 e 4km^2 . Para cada área, foram analisados dois parâmetros, sendo eles a vazão agregada da rede, ou capacidade, e a quantidade de dados transmitidos por unidade de energia. Esta última, medida em megabytes por joule, corresponde a um parâmetro de desempenho ligado à eficiência da rede, em termos de energia. Para cada simulação, são gerados 50 cenários aleatórios. Desta forma, são exibidos os valores médios e barras de erro que correspondem a intervalos de confiança de 99%. As simulações são sempre realizadas com um patamar de potência de ruído de -100dBm . O limiar $SINR_{Thresh}$, que representa a mínima SINR para correta recepção de um pacote, foi fixado em 10dB .

5.2. Resultados

Inicialmente, as figuras 5 e 6 apresentam os resultados obtidos, em termos de energia, para os seguintes modos: padrão 802.11 puro, PCM, Esquema Básico e Esquema Básico com ALCA. Este último, por simplicidade, será referenciado nos gráficos simplesmente por ALCA. Nessas curvas, assim como nas demais, os parâmetros de desempenho são plotados em função do tráfego total oferecido à rede. Este valor corresponde ao somatório das taxas de transmissão de todos os fluxos CBR gerados pelos transmissores. Como todos os fluxos, em cada simulação, têm taxas iguais, podemos obter a taxa de transmissão de um único fluxo fazendo a divisão do valor do tráfego oferecido pelo número de transmissores, isto é, 20. Podemos perceber que, em todos os gráficos, o Esquema Básico, por si só, já apresenta grande vantagem em relação ao padrão 802.11. Adicionalmente, pode-se ver que o desempenho do esquema ALCA é comparável ao do PCM. Não é apresentada uma comparação de vazão agregada entre estes esquemas pois, já que nenhum deles utiliza considerável reuso espacial do canal, os resultados são bem próximos.

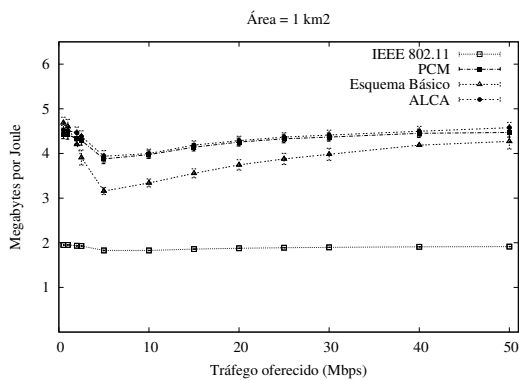


Figure 5: 1 km^2

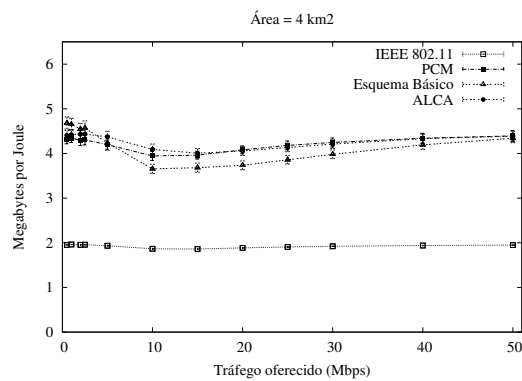


Figure 6: 4 km^2

As figuras 7 e 8 exibem os resultados obtidos nos 50 cenários aleatórios, numa área de 1 km^2 . Desta vez, além dos esquemas avaliados anteriormente, é avaliado o desempenho do esquema FN-ALCA. Analisando o gráfico 8, pode-se verificar a grande economia de energia proporcionada pelo esquema FN-ALCA. A quantidade de dados transmitidos por unidade de energia gasta é mais do que duas vezes maior do que o obtido por outros métodos de controle de potência, tais como Esquema Básico, com e sem ALCA, e PCM. Tomando com referência o padrão 802.11 puro, o aumento de eficiência chega a ser de 400 a 500%.

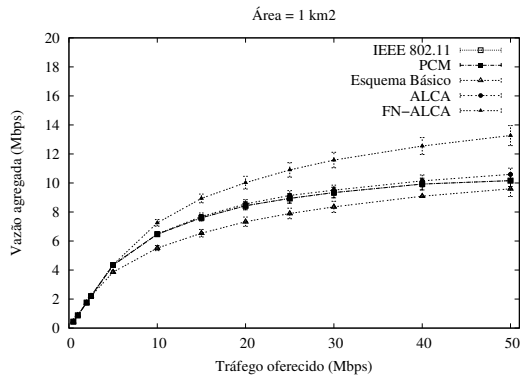


Figure 7: Vazão - 1 km²

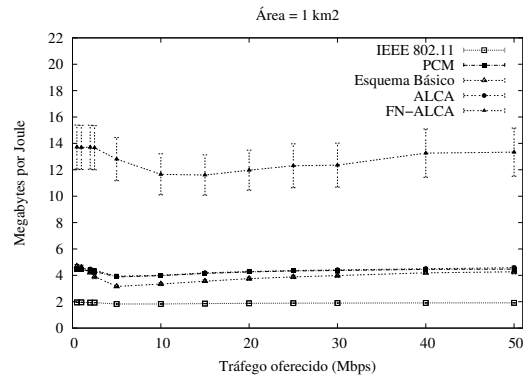


Figure 8: Energia - 1 km²

No gráfico 7, pode-se ver que o método FN-ALCA, com o aumento do tráfego oferecido, passa a ter um desempenho da ordem de 30% maior do que os demais esquemas. Isto pode ser creditado ao fato do FN-ALCA utilizar um significativo reuso espacial do canal de rádio, já que a reserva do meio é feita apenas na potência necessária para atingir o terminal vizinho mais distante, como descrito na subseção 3.2. Com isso, a potência média das transmissões é reduzida, o que resulta em um menor nível de interferência nos receptores, possibilitando maior vazão. Nas figuras 9 e 10 podemos ver os resultados obtidos em uma área de 2,25 km², e nas figuras 11 e 12, os resultados em uma área de 4 km².

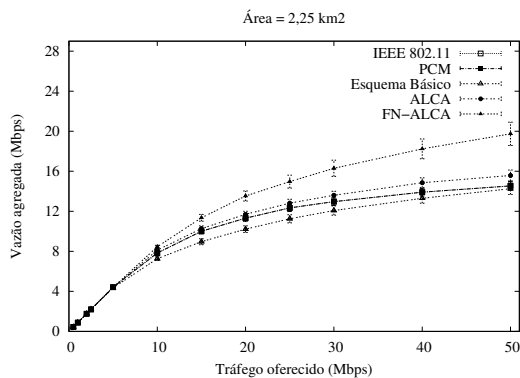


Figure 9: Vazão - 2,25 km²

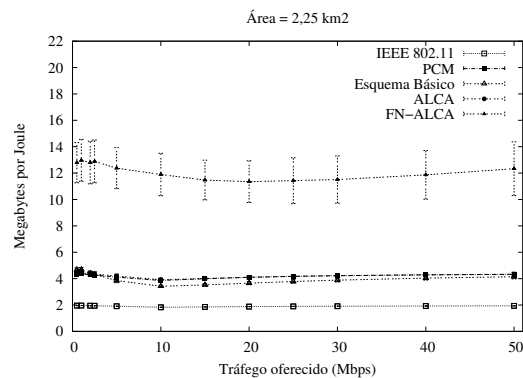


Figure 10: Energia - 2,25 km²

Ao analisar os gráficos de energia pode-se perceber que o aumento da área praticamente não provoca mudanças na eficiência, não havendo alterações perceptíveis nas curvas. No entanto, nos gráficos de vazão agregada, percebe-se o aumento gradativo da vazão, acompanhando o aumento da área. Isto ocorre pois, em redes menos densas, a reutilização espacial do canal tende a ser maior.

Em todos os cenários avaliados, os benefícios trazidos pelo esquema proposto, o FN-ALCA, mantiveram-se inalterados. Pode-se perceber ainda que o FN-ALCA apresenta uma maior dependência do cenário aleatório gerado do que os demais esquemas, o que se reflete nos maiores intervalos de confiança. Este é um efeito normal, já que, com o mecanismo de transmissão de RTS-CTS na mínima potência necessária para atingir os vizinhos mais distantes, pode-se prever a existência de cenários mais ou menos

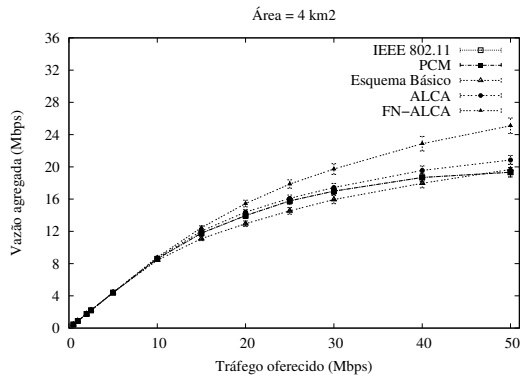


Figure 11: Vazão - 4 km²

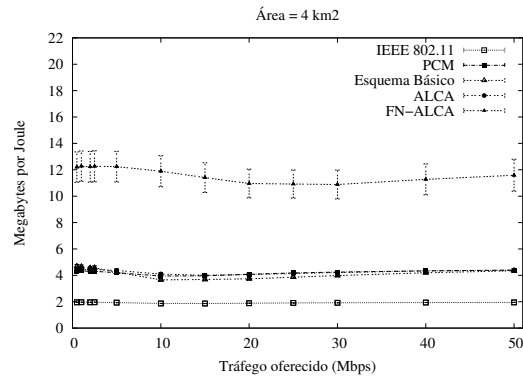


Figure 12: Energia - 4 km²

favoráveis à economia. Entretanto, mesmo com grande variação nos resultados, as curvas demonstram um desempenho bastante superior aos demais.

6. Conclusões

Nas avaliações realizadas, foi possível constatar que o protocolo proposto, o FN-ALCA (*Farthest Neighbor - Asymmetrical Link Collision Avoidance*), realiza com sucesso a tarefa de promover uma maior economia de energia, ao mesmo tempo em que aumenta a capacidade da rede.

Isto é conseguido através de duas abordagens distintas. A primeira delas é o uso do mecanismo ALCA [Pires e de Rezende, 2004], que tem por objetivo atenuar o problema dos enlaces assimétricos. Este problema [Jung e Vaidya, 2002] é comum a todos os esquemas de controle de potência que lançam mão de pacotes de controle em potência elevada, para reserva do meio, e pacotes de dados em potência reduzida, para economia de energia. Com o ALCA, foi possível reduzir bastante as colisões devidas aos enlaces assimétricos, garantindo que a economia de energia obtida através da redução da potência média dos pacotes não fosse desperdiçada com retransmissões. A segunda abordagem é a manutenção de uma tabela de vizinhança, capaz de armazenar a potência necessária para atingir cada um dos terminais vizinhos a uma estação. De posse desta tabela, o terminal pode identificar qual a potência necessária para atingir o seu vizinho mais distante, evitando o desperdício de potência resultante das transmissões em potência máxima.

Para avaliar o desempenho do novo mecanismo, foram adicionados ao simulador NS um módulo de controle de potência, que implementa os vários esquemas avaliados, e um módulo de vizinhança, responsável por construir a tabela de vizinhança. Além disso, foi implementado um módulo de SINR, que leva em consideração os efeitos de ruído e interferência, o que contribuiu para aproximar a experimentação de uma implementação real. Desta forma, simulações realizadas em cenários com posicionamento arbitrário de terminais demonstraram que o esquema proposto oferece um ganho mínimo de 100% em eficiência de energia com relação aos demais esquemas considerados, o que se traduz em um ganho mínimo de 400% em relação ao padrão 802.11 sem controle de potência. Adicionalmente, como resultado de um melhor aproveitamento do canal rádio, FN-ALCA mostrou-se por volta de 30% mais eficiente no que diz respeito à vazão agregada da rede.

Por fim, cabe ressaltar a simplicidade de implementação da proposta, já que ela

pode ser facilmente implementada através da atualização de *firmware* de equipamentos 802.11. Deve-se observar apenas a necessidade de haver controle da potência de transmissão dos rádios, facilidade já disponível em alguns equipamentos.

References

- (1999a). Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Standard 802.11.
- (1999b). Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE Standard 802.11b.
- Agarwal, S., Krishnamurthy, S., Katz, R. H. e Dao, S. K. (2001). Distributed Power Control in Ad-hoc Wireless Networks. Em *IEEE PIMRC'01*.
- Ebert, J. P., Stremmel, B., Wiederhold, E. e Wolisz, A. (2000). An Energy-efficient Power Control Approach for WLANs. Em *Journal of Communications and Networks*.
- Fall, K. e Varadhan, K. (2002). The NS Manual.
- Fullmer, C. L. e Garcia-Luna-Aceves, J. J. (1997). Solutions to Hidden Terminal Problems in Wireless Networks. Em *ACM SIGCOMM'97*.
- Gomez, J., Campbell, A. T., Naghshineh, M. e Bisdikian, C. (2001). Conserving Transmission Power in Wireless Ad Hoc Networks. Em *ICNP'01*.
- Jung, E. e Vaidya, N. H. (2002). A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks. Em *ACM MOBICOM'02*.
- Moh, W., Yao, D. e Makki, K. (1998). Wireless LAN: Study of hidden terminal effect and multimedia support. Em *Proceedings of Computer Communications and Networks*.
- Monks, J. P., Bharghavan, V. e mei W. Hwu, W. (2001). A Power Controlled Multiple Access Protocol for Wireless Packet Networks. Em *IEEE INFOCOM'01*.
- Narayanaswamy, S., Kawadia, V., Sreenivas, R. S. e Kumar, P. R. (2002). Power Control in Ad-hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW Protocol. Em *European Wireless 2002*.
- Pires, A. A. e de Rezende, J. F. (2004). Controle de Potência em Redes Ad Hoc: Evitando Colisões em Enlaces Assimétricos. Em *WCSF 2004*.
- Pires, A. A., Fontes, M. F. e de Rezende, J. F. (2004). Proposta e Avaliação de um Esquema de Controle de Potência com Memória em Redes Ad Hoc 802.11. Em *SBRC 2004*.
- Singh, S., Woo, M. e Raghavendra, C. S. (1998). Power-aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks. Em *ACM MOBICOM'98*.
- Toh, C.-K. (2001). Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Magazine*, páginas 138–147.