

# Protocolo MAC Multicanal M2MMAC Melhorado para Comunicação Muitos-para-Muitos em Redes sem Fio *Ad Hoc*

João P. P. G. Marques e Renato M. de Moraes

**Resumo**— O M2MMAC é um protocolo MAC para redes sem fio *ad hoc* baseado no padrão IEEE 802.11. Ele faz uso de múltiplos canais para viabilizar comunicação muitos-para-muitos com o propósito de aumentar a vazão da rede. Neste trabalho, o M2MMAC é descrito e novas funcionalidades são propostas para o protocolo, a fim de lidar com falhas na recepção de pacote. Além disso, a simulação do M2MMAC no simulador de redes NS-3 é aperfeiçoada para representar o funcionamento do protocolo mais precisamente. Por fim, o desempenho do M2MMAC é analisado, ao incluir modelos de propagação que causam desvanecimento de sinal.

**Palavras-Chave**— comunicação muitos-para-muitos, IEEE 802.11, protocolos MAC multicanais, NS-3, redes sem fio *ad hoc*.

**Abstract**— M2MMAC is a MAC protocol for *ad hoc* wireless networks based on the IEEE 802.11 standard. It uses multiple channels to make feasible many-to-many communication for the purpose of increasing network throughput. In this paper, M2MMAC is described, and new functionalities are proposed for the protocol to deal with packet reception failures. Moreover, the simulation of M2MMAC in the network simulator NS-3 is improved to represent the protocol's operation more accurately. Finally, the M2MMAC performance is analyzed after adding propagation models, which cause signal fading.

**Keywords**— *ad hoc* wireless networks, IEEE 802.11, many-to-many communication, multichannel MAC protocols, NS-3.

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente, muitas tecnologias de redes sem fio oferecem múltiplos canais não-sobrepostos, possibilitando a existência de redes distintas que compartilham o mesmo espaço. Desse modo, as estações de uma rede utilizam um canal para comunicação, embora outros canais possam estar disponíveis para uso. Portanto, é essencial a investigação de protocolos MAC (do inglês *Medium Access Control*) que façam uso de múltiplos canais, a fim de melhorar o desempenho da rede.

Na literatura, já existem protocolos MAC para redes sem fio *ad hoc* que utilizam múltiplos canais, como o MMAC [1], o TMMAC [2] e o H-MMAC [3]. Eles se caracterizam por uma arquitetura *split-phase*, assim como o padrão IEEE 802.11 PSM [4] (do inglês *Power Saving Mode*), com duas janelas entre *beacons*, as quais são chamadas de janela ATIM (do inglês *Announcement Traffic Indication Map Window*) e janela de comunicação (janela COM). Na janela ATIM, os nós que têm interesse em transmitir dados negociam através de pacotes de controle e a troca de dados ocorre na janela

de comunicação. O TMMAC vai além e propõe o uso de multiplexação por divisão de tempo para melhorar a eficiência energética [2], enquanto que o H-MMAC oferece troca de dados também durante a janela ATIM [3].

Nesse contexto, surgiu o protocolo M2MMAC (do inglês *Many-to-many Medium Access Control*) para redes sem fio *ad hoc*, que também faz uso das duas janelas entre *beacons*. A proposta é baseada no padrão IEEE 802.11 e utiliza múltiplos canais para fornecer comunicação muitos-para-muitos com o intuito de aumentar a vazão da rede. Essa estratégia é caracterizada pela transmissão e recepção simultânea de múltiplos pacotes de dados [5], [6]. O M2MMAC foi simulado e validado através do NS-3 (*Network Simulator-3*) [7].

Neste trabalho, a simulação é modificada para se aproximar da operação real do protocolo, com partes críticas do M2MMAC sendo implementadas no NS-3, como negociação de canal na janela ATIM. Ainda, é proposto um M2MMAC melhorado com novas funcionalidades, a fim de lidar com possíveis falhas de recepção de pacotes, que podem introduzir problemas na operação do protocolo. Em suma, este trabalho contribui com o aperfeiçoamento da simulação do M2MMAC e com sua versão melhorada.

Além disso, em um cenário real, há efeitos de desvanecimento de sinal, o qual aumenta a probabilidade de falha de recepção. Para introduzir esse cenário na simulação, dois modelos de propagação implementados no NS-3 são utilizados: modelo de Nakagami- $m$  e o modelo de Friis [7]. O primeiro introduz variações na potência do sinal, devido ao efeito de *multipath*. A distribuição de Nakagami- $m$  foi escolhida pela capacidade de variar o desvanecimento de acordo com o parâmetro  $m$ , quanto menor o valor do parâmetro, mais severo é o desvanecimento causado [8]. Já o modelo de Friis foi utilizado para incluir desvanecimento relacionado com a distância percorrida pelo sinal nas simulações [9]. Por fim, o NS-3 considera o canal na presença de AWGN (do inglês *additive white Gaussian noise*).

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II revisita o protocolo M2MMAC e as limitações nas simulações originais. A Seção III descreve as melhorias realizadas na simulação. A Seção IV explica a proposta de melhoria no protocolo M2MMAC. Os resultados são mostrados na Seção V e a Seção VI contempla a conclusão do trabalho.

## II. O PROTOCOLO M2MMAC

A Fig. 1 ilustra um exemplo do modo de operação do M2MMAC durante um intervalo entre *beacons* entre três nós.

J. P. P. G. Marques e R. M. de Moraes estão no Centro de Informática (CIn), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife-PE, Brasil. E-mail: jppgm@cin.ufpe.br e renatomdm@cin.ufpe.br. Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco.

Cada nó negocia uma frequência distinta dos demais para recepção de dados, através da troca de pacotes de controle ATIM e ATIMACK em um canal comum durante a janela ATIM. Cada negociação habilita fluxos de comunicação de dados nos dois sentidos para a janela de comunicação (janela COM). Nesse cenário, do ponto de vista da estação A, a troca de pacotes de dados ocorre com as estações B e C enviando pacotes de dados para a estação A em sua frequência de recepção. Enquanto isso, A envia pacotes de dados simultaneamente para as estações B e C em seus respectivos canais. Para cada pacote de dado, é enviado um pacote de *acknowledgment* (ACK), e os dois são transmitidos dentro de um *slot* de tempo, a fim de manter sincronismo. Esse modo de operação muitos-para-muitos [10] é o que faz o M2MMAC superar em vazão os protocolos multicanaís citados previamente [5].

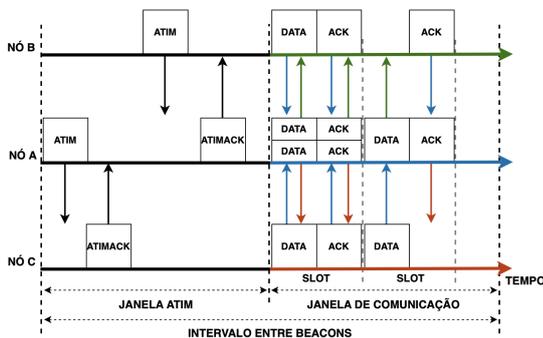


Fig. 1. Funcionamento do M2MMAC com três nós durante um intervalo entre *beacons* [5], [6].

O M2MMAC faz uso da tecnologia MU-MIMO (do inglês *Multiple User Multiple Input Multiple Output*) para viabilizar a recepção e decodificação de múltiplos sinais simultâneos na janela COM. É necessário que cada nó esteja equipado com um transceptor com cadeias paralelas de processamento de sinais, capaz de transmitir simultaneamente em diferentes frequências, enquanto recebe em uma frequência distinta. Tal transceptor é composto por um único transmissor *simplex* com uma antena e um único receptor *simplex* com um conjunto de antenas de recepção [5], [6].

O número de fluxos de comunicação na janela COM que uma estação pode comportar depende do seu número de antenas de recepção. Para um número  $B$  de antenas de recepção, o MU-MIMO pode ser usado para receber até  $B - 1$  sinais diferentes simultaneamente [11]. Além desse fator, colisões de pacotes durante a negociação na janela ATIM e o número de canais disponível na janela COM aparecem também como fatores limitantes de desempenho da rede.

O protocolo M2MMAC foi simulado e validado usando o NS-3. Os nós foram dispostos aleatoriamente em posições fixas, seguindo uma distribuição uniforme de probabilidade. A simulação do M2MMAC foi dividida em duas partes: primeiramente, para um dado número de nós, simulou-se a janela ATIM 20 vezes, mudando a semente do gerador de números aleatórios e, em seguida, a janela COM foi simulada uma vez utilizando como *input* o número médio de negociações da janela ATIM [5].

Nas simulações originais do M2MMAC, as funcionalidades do 802.11 presentes no NS-3 foram modificadas com o propósito de implementar parcialmente o protocolo [7]. Os pacotes

RTS (do inglês *Request to Send*) e CTS (do inglês *Clear to Send*) do padrão 802.11 foram ajustados para serem ATIM e ATIMACK, respectivamente [12]. Entretanto, o campo *Stream Control*, que é usado para a negociação dos canais para a janela COM, não foi implementado no ATIM e ATIMACK. Além disso, a simulação não levou em consideração também possíveis erros de recepção causados por desvanecimento de sinal, que poderiam degradar o desempenho do protocolo e prejudicar a negociação de canais na janela ATIM. Finalmente, o NS-3 não disponibiliza o MU-MIMO nas versões 3.26 e 3.29, as quais foram usadas no desenvolvimento do protocolo [7]. Dessa forma, esse mecanismo foi implementado manualmente, através da criação de dois canais distintos para cada fluxo de comunicação na janela COM [5].

### III. MELHORIAS NA SIMULAÇÃO

Melhorias na simulação do protocolo no NS-3 foram realizadas para aproximar a simulação do seu funcionamento real. Além disso, algumas dessas modificações foram pensadas considerando a inclusão dos modelos de propagação.

O campo *Stream Control* dos pacotes de controle ATIM e ATIMACK, que informa o canal de recepção da estação transmissora para a janela COM, foi incorporado no NS-3. A partir disso, os nós passaram a negociar de fato os canais que serão usados na janela COM. Um nó reserva um canal com sucesso a partir do momento que ele completa uma negociação com outro nó. Do ponto de vista do nó que envia o ATIM, a negociação é completada a partir do momento que recebe o ATIMACK, em contrapartida, o nó que recebe o ATIM, considera a transação completa a partir do momento que envia o ATIMACK.

A escolha dos canais para a janela COM durante a janela ATIM foi configurada com todas as estações começando com o canal de menor frequência. Quando uma estação recebe um pacote de controle e percebe que o canal que ela escolheu já foi reservado por outra estação, ela seleciona o próximo canal de menor frequência disponível. Dessa forma, os nós só precisam armazenar a informação do último canal utilizado. Caso uma estação que ainda não tenha reservado um canal entenda que todos os canais já foram utilizados, ela entra em modo *sleep* até a próxima janela ATIM e não troca dados na janela COM, porque não completou nenhuma negociação, ajudando ainda a economizar energia.

Para considerar os efeitos dos modelos de Friis e Nakagami corretamente, foram realizadas 20 rodadas de simulação da janela COM, em conjunto com a janela ATIM. Depois de cada simulação da janela ATIM, a janela COM foi simulada em seguida, com a mesma semente do gerador de números aleatórios, a fim de manter constante a posição dos nós entre as janelas. Somado a isso, foi utilizada uma matriz que contém dados sobre os nós que negociaram com sucesso na janela ATIM, assim como um *array* com seus respectivos canais reservados. Essas estruturas de dados foram utilizadas como *input* para as simulações da janela COM.

A simulação original do M2MMAC considera que a rede está em saturação, ou seja, os nós enfileiram pacotes ATIM para todos os outros nós no começo da janela ATIM [5]. Para evitar possíveis negociações duplicadas, o seguinte mecanismo

foi usado: um nó, ao receber um pacote ATIM destinado a ele, retira de sua fila MAC e descarta o pacote ATIM direcionado ao transmissor do ATIM (iniciador da negociação).

Por último, as estações utilizam do MU-MIMO para implementar o M2MMAC. O MU-MIMO faz com que as estações decodifiquem um número limitado de sinais na janela COM, dependendo do número de antenas de recepção [11]. Essa questão foi considerada ao fazer com que aqueles nós que atingiram o limite de fluxos de comunicação, não negociem mais na janela ATIM. No entanto, as estações foram configuradas para permanecer ouvindo o meio, caso algum outro nó reservasse um canal já reservado por elas.

#### IV. AJUSTES NA OPERAÇÃO DO PROTOCOLO M2MMAC

Além das melhorias na simulação já mencionadas, o protocolo foi aperfeiçoado, dando origem ao M2MMAC melhorado. As melhorias foram realizadas para evitar que os nós reservem o mesmo canal devido a erros de recepção, e a fim de diminuir a probabilidade de colisão de pacote de dados na janela COM.

##### A. ATIMNACK

No M2MMAC original, quando uma estação não consegue comportar mais fluxos de comunicação, é previsto que ela envie um ATIMNACK ou não responda. No M2MMAC melhorado, o ATIMNACK passa a ser utilizado para evitar que estações possam reservar o mesmo canal de recepção para a janela COM. A Fig. 2 ilustra o fluxograma de ações que uma estação executa, quando detecta que outra estação reservou o mesmo canal. O ATIMNACK é usado para avisar as estações vizinhas que a estação transmissora está reservando outro canal ou que não há mais canal disponível para ela. Não obstante, o ATIMNACK também pode atuar como ATIMACK, caso essa situação ocorra a partir do recebimento de um ATIM direcionado para a estação ouvinte, e com o mesmo canal de recepção que ela havia reservado. Devido à importância do ATIMNACK, a estação não executa *backoff* antes de enviá-lo.

É possível que, no momento da detecção de outra estação reservando o mesmo canal, não haja mais canal disponível, do ponto de vista da estação ouvinte. Nesse cenário, o valor zero é configurado no campo do canal de recepção do pacote ATIMNACK. As estações que negociaram com o nó transmissor, ao receber o ATIMNACK, cancelam o fluxo de comunicação para a janela COM, e voltam a negociar, caso o limite de fluxos tenha sido atingido.

##### B. Stream Control

O campo *Stream Control* dos pacotes de controle foi modificado para o M2MMAC melhorado. No formato original, o *Stream Control* tem um campo chamado *Control Packet ID* que especifica o tipo do pacote, mas esse campo foi retirado, visto que tal informação já se encontra no *Frame Control* [5].

No lugar do *Control Packet ID*, foi incluído campos com diferentes objetivos no ATIMACK e no ATIMNACK. Esse espaço ficou sem função no ATIM e por isso é configurado para zero. No ATIMACK, o novo campo contém a informação do canal de recepção da estação que enviou o ATIM. Essa melhoria foi pensada para permitir que estações que estão escondidas em relação ao transmissor do ATIM, consigam

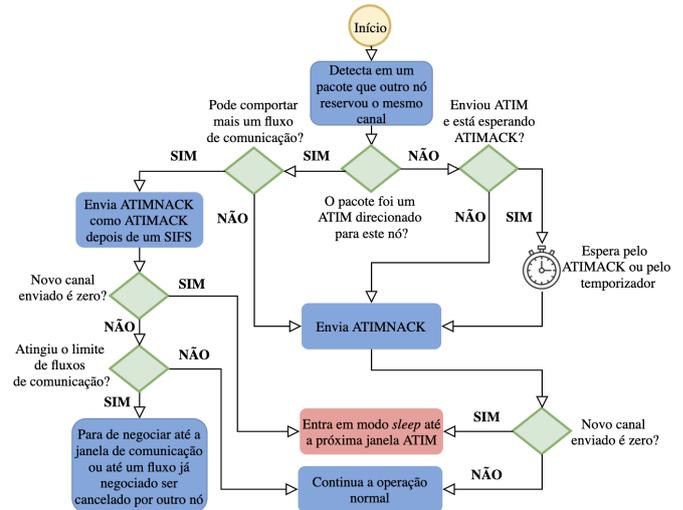


Fig. 2. Fluxograma com sequência de ações para quando uma estação detecta que seu canal foi reservado por outra estação.

saber o canal que ele reservou, diminuindo a possibilidade de duas estações escolherem o mesmo canal. No ATIMNACK, esse campo passou a ser uma *flag* que indica se o ATIMNACK está sendo usado também como ATIMACK, caso em que todos os bits são um. Esse mecanismo foi implementado no ATIMNACK para o seguinte cenário: uma estação, ao receber um ATIM endereçado para ela com o mesmo canal que ela havia reservado, pode ter atingido o limite de fluxos e não poder enviar o ATIMNACK como ATIMACK. Nesse caso, o valor zero é atribuído a *flag*. Sem essa funcionalidade, como a estação não realiza *backoff* para enviar o ATIMNACK, há a possibilidade do ATIMNACK ser recebido dentro do temporizador do ATIMACK, o que levaria a estação ouvinte a considerar erroneamente a negociação bem sucedida.

##### C. CTS na Janela de Comunicação

Apesar do uso de mecanismos que evitem que duas estações reservem o mesmo canal, como o envio de ATIMNACK, ainda há a possibilidade desse evento ocorrer, devido aos erros de recepção. Nessa situação, é essencial que o protocolo M2MMAC tenha mecanismos para evitar possíveis colisões de pacotes de dados na janela COM.

O mecanismo proposto para o M2MMAC melhorado faz uso de um CTS no começo da janela COM. Os nós que vão participar de algum fluxo de comunicação enviam um pacote CTS em seu canal de recepção com seu endereço encapsulado. As estações que receberem o CTS com sucesso poderão prosseguir para o envio de pacote de dados. Utilizando desse mecanismo, pode-se evitar problemas de terminal exposto.

É vital citar que esse mecanismo não realiza completamente sua função na simulação, pela falta do MU-MIMO no NS-3. Como citado antes, o MU-MIMO foi manualmente incorporado no NS-3, através da criação de dois canais distintos para cada fluxo de comunicação entre dois nós. Ainda que os nós escolham a mesma frequência de recepção, o simulador considera os canais independentes e que não interferem entre si. Assim, não ocorre colisão de CTS no simulador e as trocas de pacotes de dados acontecem sem impedimento. No entanto, ao incluir na simulação o desvanecimento do sinal ocasionado pelos modelos de propagação, há a possibilidade de o CTS não ser recebido com sucesso.

## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela I apresenta os parâmetros com os quais as novas simulações foram conduzidas. As simulações originais do M2MMAC utilizam a camada física (PHY) HR/DSSS (do inglês *High-Rate Direct Sequence Spread Spectrum*) do 802.11b com uma modulação DQPSK (do inglês *Differential Quadrature Phase Shift Keying*) [5], [12]. Entretanto, nas novas simulações, foi utilizada a tecnologia VHT (do inglês *Very High Throughput*) da PHY OFDM (do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) do 802.11ac [13]. A tecnologia VHT do 802.11ac foi escolhida porque o formato de *frame* PHY do VHT inclui campos importantes para o correto funcionamento do MU-MIMO, utilizado no M2MMAC. O MCS 2 (do inglês *Modulation and Coding Set*) do 802.11ac foi selecionado por usar a modulação QPSK (do inglês *Quadrature Phase Shift Keying*), a qual transmite o mesmo número de bits por símbolo da simulação original. Além disso, esse MCS usa uma taxa de código de 3/4 que, juntamente com um intervalo de guarda curto entre símbolos OFDM de 400 ns, incrementa a taxa de transferência [13].

As Figs. 3 e 4 ilustram a quantidade de negociações na janela ATIM e a vazão agregada de saturação da rede na janela COM, respectivamente, *versus* o número de nós. Os intervalos de confiança foram obtidos usando a distribuição *t-Student* com um nível de confiança de 95% e 20 graus de liberdade (20 rodadas). Os gráficos do M2MMAC melhorado correspondem aos resultados considerando as melhorias na simulação e no protocolo. Além disso, essas simulações foram feitas também adicionando os modelos de propagação de Friis e Nakagami-m, a fim de ilustrar os cenários com e sem desvanecimento (C/D e S/D, respectivamente)<sup>1</sup>. Os resultados do M2MMAC original consideram o protocolo e sua simulação como foram originalmente propostos, mas com duas mudanças para que as versões do M2MMAC sejam executadas sob o mesmo cenário. Primeiro, a janela COM foi simulada também 20 vezes, utilizando como *input* a quantidade de negociações da janela ATIM anterior. Segundo, a PHY do M2MMAC original foi configurada para ser a mesma do M2MMAC melhorado, ou seja, a VHT do 802.11ac. Finalmente, a vazão do protocolo 802.11ac é mostrada no gráfico da janela COM para efeitos de comparação com o M2MMAC melhorado. A simulação do 802.11ac foi configurada de forma a considerar o mesmo cenário e parâmetros que a simulação do M2MMAC melhorado e, pelo fato que o 802.11ac usa somente um canal, a largura de banda utilizada foi a maior disponível (160 MHz).

Na Fig. 3, pode-se ver que o M2MMAC original apresentou uma quantidade de negociações muito superior às outras simulações. Entretanto, os resultados mostrados não condizem com a realidade. Isso fica claro ao observar que, com 5 nós, houve 20 negociações, quando o máximo de negociações possíveis para esse caso seria 10, como mostrado no M2MMAC melhorado. Esse comportamento se deve a negociações duplicadas. Além disso, não há limitação de negociações considerando os canais disponíveis para a janela COM e o número de antenas de recepção. Portanto, a queda de negociações no gráfico é

TABELA I

PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO DO M2MMAC.

Parâmetros	Valores
Número de nós	5 a 40
Número de antenas de recepção	5
Número de antenas de transmissão	1
Número de canais	25
Largura de banda	20 MHz
VHT OFDM PHY	QPSK - 21.7 Mbps Taxa de código: 3/4 Intervalo de guarda: 400 ns
Intervalo de frequência (GHz)	5,17 - 5,33; 5,49 - 5,725; 5,735 - 5,825
Número máximo de retransmissões	3
Área de distribuição dos nós	250 m por 250 m
Duração da janela ATIM	40 ms
Duração da janela COM	60 ms
Intervalo entre <i>beacons</i>	100 ms
Tamanho dos pacotes ATIM	352 bits
Pacotes ATIMACK e ATIMNACK	304 bits
Tamanho dos pacotes de dados	512 bytes
<i>Slot</i> de tempo da janela do <i>backoff</i>	20 $\mu$ s
<i>Short Interframe Space</i> (SIFS)	10 $\mu$ s
<i>Distributed Interframe Space</i> (DIFS)	50 $\mu$ s
Potência de transmissão	16 dBm
Ganho de transmissão	1 dB
Ganho de recepção	1 dB
<i>Noise figure</i>	7 dB
Limiar de detecção de energia	-96 dBm
Parâmetro <i>m</i> do Nakagami-m	1,5 até 80 m; 0,75 a partir de 80 m

causada pela colisão de pacotes, que cresce com o aumento do número de nós. Todos esses problemas contribuem para o resultado errôneo da janela ATIM do M2MMAC original.

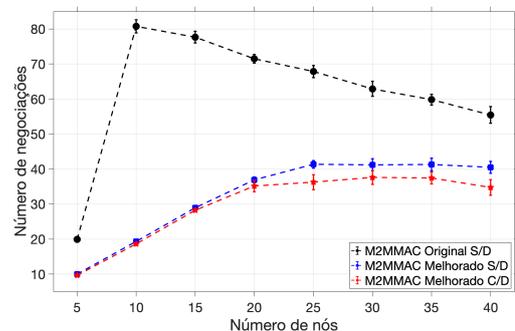


Fig. 3. Simulação da janela ATIM.

A simulação do M2MMAC melhorado corrige todas as questões citadas previamente. Assim, na Fig. 3, a curva do caso melhorado sem desvanecimento cresce até atingir 25 nós na rede, que é o mesmo número de canais disponível. Esse comportamento é esperado porque cada nó deve reservar um canal único. Somado a isso, as funcionalidades do M2MMAC melhorado agem para diminuir a possibilidade de dois nós reservarem o mesmo canal. Ao incluir os modelos de propagação na simulação do M2MMAC melhorado, a quantidade de negociações diminuiu levemente. Nesse caso, os aperfeiçoamentos no M2MMAC se tornam ainda mais essenciais, pois além da colisão de pacotes, surge desvanecimento de sinal, que aumenta as chances dos nós reservarem o mesmo canal por erros de recepção.

Foi observada uma pequena diferença nos resultados do M2MMAC melhorado na janela ATIM ao incluir os modelos de propagação. No entanto, os resultados se tornam mais

<sup>1</sup>Os arquivos da simulação estão disponíveis para consulta e download em [github.com/jppgm/Enhanced\\_M2MMAC\\_Simulation](https://github.com/jppgm/Enhanced_M2MMAC_Simulation)

discrepantes na vazão na janela COM, como mostra a Fig. 4. Isso se deve ao fato que, como dito anteriormente, foi criado dois canais diferentes e independentes para cada fluxo de comunicação, a fim de implementar o MU-MIMO manualmente. Assim, não há possibilidade de colisão de pacote de dados na simulação. Contudo, ao incluir desvanecimento de sinal, surgiu a possibilidade de perda de pacote de dados e CTS devido à piora na relação sinal-ruído durante a recepção.

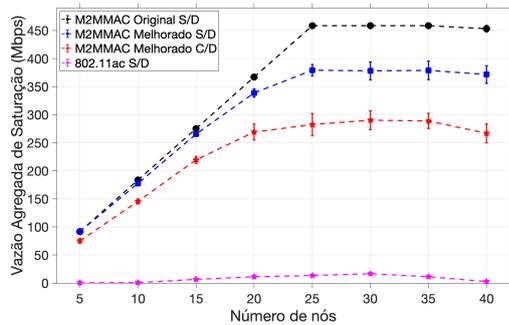


Fig. 4. Simulação da janela de comunicação.

Comparando os resultados na janela COM do M2MMAC original e melhorado sem desvanecimento, percebe-se uma diferença na vazão a favor do M2MMAC original, que cresce com o aumento do número de nós. Esse resultado superior, porém fictício, na simulação original do M2MMAC, é devido à atribuição dos fluxos de comunicação na janela COM, a partir da quantidade de negociações, de forma a implementar manualmente as restrições relacionadas ao número de canais e antenas de recepção. No caso do M2MMAC melhorado, como a simulação da janela COM usa como *input* os nós que negociaram na janela ATIM e seus respectivos canais, o comportamento do gráfico é similar ao mostrado na simulação da janela ATIM.

A implementação manual das restrições no M2MMAC original não considera dois fatores limitantes de desempenho que ocorrem na prática, e que aparecem na simulação do M2MMAC melhorado. Primeiro, com o aumento do número de nós, cada nó negocia menos e passa a subutilizar os recursos disponíveis, como antenas de recepção e canal. Esse comportamento não ocorre no M2MMAC original, pois a simulação atribui fluxos de comunicação de forma a tirar o máximo proveito do MU-MIMO e do canal. Segundo, pode ocorrer de alguns canais não serem utilizados na janela COM do M2MMAC melhorado. Isso acontece quando os nós tentam negociar na janela ATIM, mas falham, enquanto que outros nós podem conseguir decodificar o pacote e assumir que aqueles canais já estejam reservados. Portanto, quando o número de nós se aproxima do número de canais, alguns nós podem ficar sem canal mesmo com canal ainda disponível. No M2MMAC original, por haver uma atribuição manual de canais na janela COM, esse cenário não ocorre e todos os canais são utilizados. Por considerar os fatores expostos, o protocolo M2MMAC melhorado representa mais fielmente a realidade e, mesmo nesse caso, as vazões obtidas são ainda elevadas.

É importante também considerar o custo causado pelo envio do CTS no começo da janela COM no caso do M2MMAC melhorado. Por um lado, essa ferramenta é importante para

minimizar as chances de colisão de pacote de dados causada pela reserva de um canal por mais de um nó. Entretanto, a probabilidade de ocorrência desses cenários é minimizada pelo uso do ATIMNACK e pela modificação no *Stream Control*. Assim, quando esse cenário não ocorre, o CTS não é necessário e acaba impactando negativamente no desempenho da rede.

Finalmente, ao comparar a vazão do M2MMAC melhorado com o 802.11ac, ambos sem desvanecimento, percebe-se um desempenho muito superior do M2MMAC para qualquer número de nós. Isto ocorre pelo fato que, em protocolos multicanaís, os nós podem se comunicar simultaneamente no mesmo espaço físico utilizando os múltiplos canais disponíveis, enquanto que no caso do 802.11ac, os nós precisam competir pelo mesmo canal.

## VI. CONCLUSÕES

Mudanças na simulação do M2MMAC foram realizadas e avaliadas. Também foi proposto um protocolo M2MMAC melhorado para lidar com as possíveis falhas de negociação de canal e diminuir a probabilidade de colisão de pacote de dados, ficando mais realista. Por fim, o desempenho do M2MMAC foi ilustrado sob desvanecimento de sinal, cenário previsto em aplicações práticas.

Como trabalho futuro, as melhorias serão aplicadas no H-M2MMAC [14], o qual, assim como o H-MMAC, fornece a possibilidade de transferência de dados na janela ATIM para aumentar a vazão da rede.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. So and N. Vaidya, "Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using a Single Transceiver", *In Proc. of ACM MobiHoc*, Tokyo, Japan, May 2004.
- [2] J. Zhang, G. Zhou, C. Huang, S. H. Son and J. A. Stankovic, "TM-MAC: An Energy Efficient Multi-Channel MAC Protocol for Ad Hoc Networks", *In Proc. of IEEE ICC*, Glasgow, Scotland, June 2007.
- [3] D. N. M. Dang, C. S. Hong and S. Lee, "A hybrid multi-channel MAC protocol for wireless ad hoc networks", *Wireless Networks*, v. 21, n. 2, pp. 387-404, 2015.
- [4] IEEE COMPUTER SOCIETY LAN MAN STANDARDS COMMITTEE, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *IEEE Standard 802.11*, 1997.
- [5] P. C. Ghobad, "Um Novo Protocolo MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos em Redes 802.11", Dissertação (Mestrado), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2017.
- [6] P. C. Ghobad and R. M. de Moraes, "Many-to-Many Communication Multichannel MAC Protocol for 802.11-based Wireless Networks", *In Student Posters and Demos of IEEE WCNC*, S. Francisco, CA, USA, March 2017.
- [7] Network Simulator 3, <https://www.nsnam.org/releases/ns-3-29>, versão 3.29, Acesso: 10/05/2020.
- [8] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, 1º Ed., Cambridge University Press, 2005.
- [9] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula", *in Proceedings of the IRE*, v. 34, n. 5, pp. 254-256, May 1946.
- [10] R. M. de Moraes, H. Sadjadpour, and J.J. Garcia-luna-aceves, "Many-to-many communication for mobile ad hoc networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, v. 8, n. 5, pp. 2388-2399, 2009.
- [11] J. Kim and I. Lee, "802.11 WLAN: History and new enabling MIMO techniques for next generation standards", *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 3, pp. 134-140, 2015.
- [12] M. S. GAST, *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, 2º Ed., O'Reilly Media, 2009.
- [13] M. S. GAST, *802.11 ac: a survival guide: Wi-Fi at gigabit and beyond*, 1º Ed., O'Reilly Media, 2013.
- [14] D. Adauto and R. M. de Moraes, "A Hybrid Many-to-Many Communication Multi-Channel MAC Protocol for Ad Hoc Networks", *In Proc. of ISWCS*, Lisbon, Portugal, Aug. 2018.