

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

GEORGIA GARCIA

AVALIAÇÃO DE UM PROTOCOLO MAC SEM FIO *FULL DUPLEX*

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA
2016

GEORGIA GARCIA

AVALIAÇÃO DE UM PROTOCOLO MAC SEM FIO *FULL DUPLEX*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação, do Departamento Acadêmico de Informática, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Foronda

PONTA GROSSA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa

Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Informática
Bacharelado em Ciência da Computação



TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DE UM PROTOCOLO MAC SEM FIO *FULL DUPLEX*

por

GEORGIA GARCIA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 17 de maio de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Augusto Foronda
Orientador

Prof. MSc. Geraldo Ranthum
Membro titular

Prof. Dr. Richard Duarte Ribeiro
Membro titular

Prof. Dr. Augusto Foronda
Responsável pelo Trabalho de Conclusão
de Curso

Prof. Dr. Erikson Freitas de Moraes
Coordenador do curso

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

GARCIA, Georgia. Avaliação de um protocolo MAC sem fio Full Duplex, 2016. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

O avanço das técnicas de cancelamento de auto interferência possibilitou o projeto de rádios *Full Duplex* (FD), i.e. rádios capazes de dobrar a capacidade de um enlace *Half Duplex* através do envio e recepção de dados em simultâneo. Uma importante questão suscitada por tal avanço consiste em verificar se um protocolo de acesso ao meio (*Medium Access Control*, MAC) consegue escalar os ganhos de um rádio FD em uma rede com uma quantidade crescente de nós. Nesse contexto, esse trabalho avalia o protocolo MAC FD PbP-EDCA (*Piece-by-Piece Enhanced Distributed Channel Access*). O protocolo PbP-EDCA é uma extensão FD para o protocolo padrão IEEE 802.11 para redes locais sem fios. O protocolo foi primeiramente implementado utilizando a linguagem de programação Java, para depois poder ser avaliado em um cenário de redes sem fio *Full Duplex* em comparação ao CSMA/CA do IEEE 802.11. Nos resultados foram feitas comparações em diferentes cenários utilizando o protocolo PbP-EDCA para um canal de 10 MHz, ou seja, 2 subcanais, utilizando o protocolo PbP-EDCA para um canal de 5 MHz, ou seja, 4 subcanais, e utilizando o protocolo IEEE 802.11 DCF CSMA/CA com um canal de 20 MHz. Foi observado que o PbP-EDCA com 4 subcanais só não possui o melhor desempenho em um cenário de intenso ruído, no caso, -82 dBm.

Palavras-chaves: *Full Duplex. Medium Access Control. IEEE 802.11. PbP-EDCA.*

ABSTRACT

GARCIA, Georgia. Analysis of a Full Duplex wireless MAC protocol, 2016. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

The advance of self-interference cancellation techniques allowed the development of Full Duplex (FD) radios, i.e. radios capable of doubling the capacity of a Half Duplex link by sending and receiving data at the same time. An important question raised by such advance consists in determining if a Medium Access Protocol (MAC) can scale FD gains in a network with an increasing amount of nodes. In this context, this study will evaluate the FD MAC protocol PbP-EDCA (Piece-by-Piece - Enhanced Distributed Channel Access) in noisy channels. The PbP-EDCA protocol is an FD extension of the IEEE 802.11 MAC for wireless local area networks. The protocol was first implemented in Java, and then can be evaluated in a FD wireless network scenario in comparison to IEEE 802.11's CSMA/CA. Different scenarios were evaluated using the protocol PbP-EDCA with 2 subchannels of 10 MHz, PbP-EDCA using 4 subchannels of 5 MHz, and IEEE 802.11 DCF CSMA/CA with one channel of 20 MHz. It was observed that PbP-EDCA with 4 subchannels has the best performance except in cases of intense noise, here, -82 dBm.

Key-words: Full Duplex. Medium Access Control. IEEE 802.11. PbP-EDCA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação da utilização ou não do mecanismo RTS/CTS	13
Figura 2 – Diminuição do ganho <i>Full Duplex</i> por reuso espacial.....	16
Figura 3 – Diminuição do ganho <i>Full Duplex</i> por disputa assíncrona.	17
Figura 4 – Fluxograma do protocolo PbP-EDCA baseado no procedimento padrão de transmissão do IEEE 802.11 EDCA.....	19
Figura 5 – Estrutura principal do código que trata do envio e recebimento de <i>frames</i>	23
Figura 6 – Fluxograma do algoritmo da implementação do protocolo PbP-EDCA.....	24
Figura 7 – Exemplo de uma rede ad hoc	25
Figura 8 – Gráfico de comparação entre o tempo de transmissão dos protocolos	26
Figura 9 – Gráfico de comparação entre o tempo de transmissão dos protocolos com RSSI de -77 dBm	27
Figura 10 – Gráfico de comparação entre o tempo de transmissão dos protocolos com RSSI de -82 dBm	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo da vazão entre os protocolos	27
Tabela 2 – Comparativo da vazão entre os protocolos com RSSI igual a -77 dBm	28
Tabela 3 – Comparativo da vazão entre os protocolos com RSSI igual a -82 dBm	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVO GERAL	9
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.3	JUSTIFICATIVA	9
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	RÁDIOS <i>FULL DUPLEX</i>	10
2.2	PROTOCOLOS MAC EM REDES IEEE 802.11	10
2.3	PROTOCOLOS MAC <i>FULL DUPLEX</i>	13
2.3.1	Protocolo MAC <i>Full Duplex</i>	14
2.3.2	<i>ContraFlow</i>	14
2.3.3	Janus	15
2.3.4	<i>A Distributed MAC Protocol for Full Duplex Radio</i>	15
2.4	REQUISITOS DE ESCALABILIDADE DOS GANHOS <i>FULL DUPLEX</i>	16
2.4.1	Reuso Espacial	16
2.4.2	Disputa Assíncrona	17
2.5	PROTOCOLO MAC FD PBP-EDCA	17
2.5.1	Aspectos de Escalabilidade do Pbp-EDCA	18
2.6	AVALIAÇÃO DE PROTOCOLOS MAC <i>WIRELESS</i>	20
3	IMPLEMENTAÇÃO DO PROTOCOLO	21
4	RESULTADOS	26
5	CONCLUSÃO	30

1 INTRODUÇÃO

A demanda em redes locais sem fio tem sido cada vez maior devido ao aumento no número de usuários conectados e aumento nas transmissões de áudio e vídeo. Serviços como videoconferência e vídeo sob demanda requerem altas velocidades e qualidade de serviço pois possuem necessidades mais rígidas em relação ao atraso. Para garantir que esses serviços serão prestados de forma eficiente são desenvolvidos novos protocolos de acesso ao meio (*Medium Access Control*, MAC) que implementam especificações para a comunicação mais eficaz entre computadores conectados por redes sem fio (ZHAI *et al.*, 2006).

Tendo em vista responder a necessidade por maiores taxas de transmissão, a versão *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11ac (CISCO, 2012) da série de padrões WLAN (*Wireless Local Area Network*) introduziu mudanças significativas no mecanismo de acesso ao meio. Em particular, foi introduzido o algoritmo de gerenciamento dinâmico de larguras de canal (PARK, 2011) cujo objetivo é aumentar a quantidade de dados transmitidos através do uso de canais mais largos.

O avanço de técnicas de cancelamento de auto interferência possibilitou e incentivou o projeto de rádio *Full Duplex* (BHARADIA; MCMILIN; KATTI, 2013), ou seja, rádios que são capazes de dobrar a capacidade de um único enlace *Half Duplex* através do envio e recepção de dados simultaneamente. Nesse contexto, protocolos como o IEEE 802.11ac subutilizam as funcionalidades suportadas por uma placa *Full Duplex* (FD) visto que todo o seu projeto lógico assume apenas placas *Half Duplex* (CISCO, 2012), que só são capazes de enviar ou receber dados em um dado momento.

O problema crítico de transmissões FD pode ser entendido a partir do seguinte cenário:

Considere duas estações FD A e B e um ponto de acesso (*Access Point*, AP) também FD. O AP, que recebeu um sinal de A , deve ser capaz de determinar se deve utilizar sua capacidade FD para transmitir um outro sinal para B . Se o AP efetuar a transmissão, pode acontecer uma colisão em B , pois o AP não consegue determinar se B está no alcance de interferência de A .

A questão fundamental consiste em verificar se um protocolo MAC consegue escalar os ganhos de um rádio FD em uma rede com uma quantidade crescente de nós.

Em um trabalho recente, Queiroz e Hexsel (2015) propuseram um protocolo MAC FD, o *Piece-by-Piece - Enhanced Distributed Channel Access* (PbP-EDCA), e identificaram alguns cenários onde a escalabilidade é possível. O trabalho mostrou ganhos de até 3 vezes em relação ao protocolo MAC padrão IEEE 802.11. Contudo, o referido estudo de desempenho assumiu canais sem ruídos no intuito de restringir as perdas de *frames* às colisões não evitadas pelos protocolos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Nesse trabalho de conclusão de curso é proposta a implementação e a avaliação de desempenho do protocolo FD PbP-EDCA (QUEIROZ; HEXSEL, 2015) em comparação ao protocolo MAC padrão IEE 802.11.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Reportar uma síntese do estado da arte na área de protocolos MAC FD sem fio, algo não existente na literatura atual;
- Implementar o protocolo PbP-EDCA em uma linguagem de programação;
- Comparar o desempenho dos protocolos MAC PbP-EDCA com o protocolo IEEE 802.11 *Half Duplex*.
- Simular cenários de redes com ruído utilizando os protocolos citados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Protocolos MAC FD estão em uma fase primitiva de desenvolvimento. A análise do protocolo PbP-EDCA (QUEIROZ; HEXSEL, 2015) em um simulador de redes utilizando cenários próximos da realidade sanará algumas dúvidas quanto a escalabilidade dos ganhos de um rádio FD em uma rede com uma quantidade crescente de nós.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 possui toda a fundamentação teórica necessária para o entendimento deste trabalho. Isto inclui o funcionamento dos protocolos MAC IEEE 802.11 e o PbP-EDCA, além de protocolos que foram criados para redes *Full Duplex*. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, assim como alguns detalhes da implementação dos protocolos. O Capítulo 4 contém o resultado da comparação entre os protocolos protocolos MAC IEEE 802.11 e o PbP-EDCA, utilizando a mesma taxa de transmissão e também a análise em um cenário com ruídos. Por fim, o Capítulo 5 possui a conclusão deste trabalho, e também sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que os objetivos deste trabalho sejam cumpridos, é preciso que seja desenvolvida uma composição de definições relevantes e trabalhos relacionados. Estes conceitos serão expostos aqui, para que seja possível continuar com o desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso.

2.1 RÁDIOS *FULL DUPLEX*

Rádios *Full Duplex*, como dito anteriormente, são rádios que conseguem transmitir e receber dados simultaneamente dentro do mesmo canal de comunicação sem fio. Dessa forma, é possível perceber que esse tipo de sistema de comunicação pode teoricamente dobrar a capacidade de um enlace *Half Duplex* (TANENBAUM, 2002).

O principal problema para rádios FD era a criação de dispositivos que diminuíssem ou até mesmo cancelassem a auto interferência. Se um nó não sofrer interferência de seu próprio sinal, então ele poderá receber e decodificar sinais a ele destinados mesmo enquanto transmite para outro nó na rede.

Atualmente, é possível encontrar variadas propostas de projeto de rádio FD na literatura (BHARADIA; MCMILIN; KATTI, 2013) (DUARTE *et al.*, 2013) (HONG; MEHLMAN; KATTI, 2012) (KHANDANI, 2010). Como protocolos MAC desenvolvidos até então assumiam placas *Half Duplex*, iniciou-se um campo de pesquisa consistindo em gerenciar o acesso ao meio disputado por nós equipados com rádios FD.

2.2 PROTOCOLOS MAC EM REDES IEEE 802.11

Protocolos MAC tem como principal finalidade regular o uso do meio, e isso é feito através de mecanismos de acesso ao meio. Um dos principais objetivos de um protocolo MAC é maximizar a vazão diminuindo colisões e atrasos. O mecanismo de acesso ao meio é o método em que se divide os recursos de acesso entre os nós (estações), regulando os seus usos e determinando quando um nó pode transmitir ou receber. O método de acesso ao meio mandatório em WLANs IEEE 802.11 atuais é o *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA) o qual emprega o mecanismo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*) para evitar colisões (IEEE... , 2012).

O principal princípio do CSMA/CA consiste em monitorar o meio antes de transmitir e tornar aleatório o acesso caso o canal seja detectado como ocupado. Este é um modo assíncrono de troca de mensagens. O CSMA/CA é derivado do CSMA/CD (*CSMA/Collision Detection*),

que é usado em redes padrão *Ethernet* (IEEE..., 2011). A diferença é que a rede cabeada é *Full Duplex* por natureza, portanto é capaz de escutar enquanto transmite e assim detectar colisões (IEEE..., 2011).

O protocolo funciona de tal maneira que, antes da transmissão de um *frame*, os nós devem primeiro escutar o canal de transmissão, o meio, para determinar se existem outros nós transmitindo. Se o meio estiver ocioso por uma quantidade específica de tempo, é possível realizar a transmissão. Caso o meio esteja ocupado, então o nó deverá escolher um número aleatório (CW) entre um valor mínimo (CW_{min}) e o tamanho máximo da janela de disputa (CW_{max}), e então esperar o decremento deste número chegar a zero para poder verificar se o meio está livre e então transmitir. Este é o elemento de disputa do protocolo e o tempo de espera é chamado de período de *backoff*. O nó que recebe o *frame* transmitido deve então enviar um outro *frame* de confirmação (ACK) depois de esperar uma quantidade de tempo específica determinada pelo padrão IEEE 802.11. Se o ACK não for recebido, a transmissão do *frame* deve ser considerada perdida e o nó que realizou a transmissão deverá incrementar o valor de CW utilizando a fórmula $CW = ((CW + 1) \times 2) - 1$ até o valor máximo de CW_{max} . Isto será realizado até que a transmissão seja feita com sucesso (IEEE..., 2012).

O protocolo MAC IEEE 802.11 define duas formas de acesso ao meio: o DCF (*Distributed Coordination Function*), que é o método mandatário no padrão IEEE 802.11 e que o originou, e o método PCF (*Point Coordination Function*), que não precisa ser implementado em um dispositivo IEEE 802.11 por ser opcional (GAST, 2002).

O DCF é baseado no CSMA/CA, portanto primeiro é necessário verificar se o meio está livre antes de transmitir. Para evitar colisões, as estações devem selecionar um número aleatório a cada *frame*, e realizar a contagem regressiva. Quem terminar primeiro apodera-se do canal para enviar exatamente um *frame*. Cada *frame* passará por um processo de disputa independente para evitar que uma mesma estação domine o uso do meio. Caso duas estações distintas escolham o mesmo número aleatório, haverá uma colisão de tempo proporcional ao tamanho de um *frame*. Para minimizar os impactos negativos de se colidir um *frame* de dados, o padrão IEEE 802.11 oferece o mecanismo *Request-to-Send/Clear-to-Send* (RTS/CTS) (IEEE..., 2012).

EDCA (*Enhanced DCF Channel Access*) é, como diz o nome, uma versão melhorada do método de acesso ao meio DCF. O EDCA é desenvolvido para prover uma forma diferenciada de acesso distribuído ao meio para *frames* com oito prioridades diferentes para usuários (UP), variando de 0 a 7. Cada MSDU chega da camada superior com um valor UP especificado. Então, esse MSDU é mapeado em categorias de acesso (AC). Existem quatro ACs definidos, onde AC_BK, AC_BE, AC_VI e AC_VO, são usados para *background*, melhor esforço, vídeo e serviços de tráfego de serviços, respectivamente (LEE; CHOI, 2008). O Quadro 1 mostra o mapeamento entre AC e UP, junto com prioridades e designações para cada AC.

O RTS/CTS funciona da seguinte forma: antes de enviar um *frame*, o transmissor envia um RTS e espera pelo CTS do receptor. Se o nó transmissor receber um CTS, isso significará que o nó receptor é capaz de receber o RTS, portanto o canal está livre para que seja enviado

Prioridades	Prioridade de Usuário (UP)	Categoria de Acesso (AC)	Designação
Menor	1	AC_BK	<i>Background</i>
	2	AC_BK	<i>Background</i>
	0	AC_BE	Melhor Esforço
	3	AC_BE	Melhor Esforço
	4	AC_VI	Vídeo
	5	AC_VI	Vídeo
Maior	6	AC_VO	Voz
	7	AC_VO	Voz

Quadro 1 – Mapeamento entre prioridades de usuário e categorias de acesso.

Fonte: Adaptado de Lee e Choi (2008)

o *frame*. Os nós no alcance do receptor também receberão pelo menos o CTS, portanto podem ser capazes de assumir que há uma transmissão ocorrendo, dessa forma evitam enviar *frames* ao receptor pois isso poderia causar uma colisão. Além disso, o RTS/CTS diminui o *overhead* de uma colisão de um *frame* pois as colisões duram muito menos. Se dois nós tentarem transmitir ao mesmo tempo, o RTS irá colidir e nenhum CTS será recebido. Então somente um RTS será perdido, ao invés de um *frame* inteiro (IEEE. . . , 2012) Na prática, o RTS/CTS só é empregado quando o *frame* a ser transmitido ultrapassar um dado tamanho que pode ser configurado pelo administrador da rede. A Figura 1a mostra a utilização do mecanismo RTS/CTS e a Figura 1b mostra como ocorre a transmissão sem o mecanismo RTS/CTS.

A quantidade específica de tempo que deve ser esperada para que um *frame* possa ser transmitido muda de acordo com a sua prioridade. Isto é chamado de espaço *interframe*, que pode ser visto como uma quantidade fixa de tempo que não depende da velocidade de transmissão. *Frames* com grande prioridade não devem esperar demais, após o meio ficar ocioso, logo são transmitidos antes que os *frames* de baixa prioridade. Os espaços *interframe* definidos no protocolo IEEE 802.11 são (GAST, 2002):

- *Short interframe space* (SIFS)

Os SIFS são usados para transmissões de alta prioridade. Para se transmitir um ACK utiliza-se SIFS.

- *PCF interframe space* (PIFS)

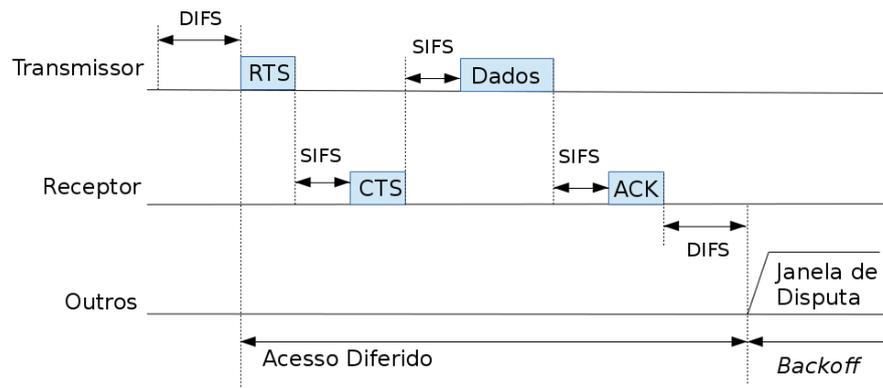
Usado pela operação onde não há disputa do PCF.

- *DCF interframe space* (DIFS)

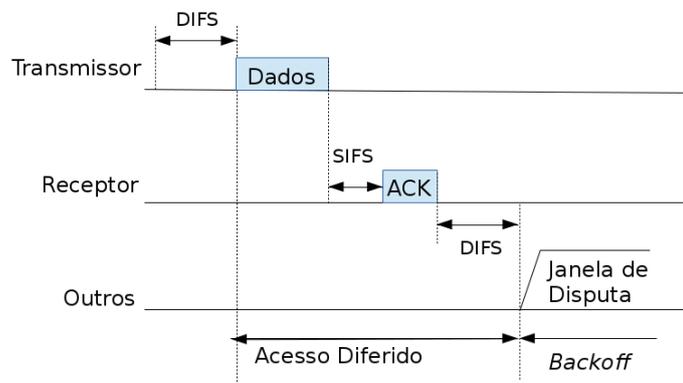
O mínimo de tempo de espera necessário para serviços onde há disputa.

- *Extended interframe space* (EIFS)

Não é um intervalo fixo, e é somente usado quando acontece um erro na transmissão de *frames*.



(a) Utilização do mecanismo RTS/CTS



(b) Sem a utilização do mecanismo RTS/CTS

Figura 1 – Comparação da utilização ou não do mecanismo RTS/CTS

Fonte: Adaptação de IEEE... (2012)

2.3 PROTOCOLOS MAC FULL DUPLEX

Protocolos MAC *Full Duplex* estão em uma fase inicial de desenvolvimento, já que dispositivos que possuem capacidades FD são recentes, mas também porque existe um problema crítico de transmissões FD que deve ser resolvido ou amenizado. Esse problema pode ser ilustrado em uma rede IEEE 802.11 centralizada típica. O problema consiste em determinar quando é seguro a um ponto de acesso (*Access Point*, AP) FD recorrer à sua capacidade FD para transmitir um *frame* para uma estação *B* enquanto recebe um *frame* de uma estação *A*. Se o AP transmitir para *B* enquanto recebe de *A*, e *A* estiver no alcance de interferência de *B*, então uma colisão poderá acontecer em *B*, comprometendo assim o potencial da tecnologia FD de dobrar a capacidade da rede *wireless* (KIM *et al.*, 2013).

Na Subseção 2.3.1, serão reportados os avanços alcançados na área de projeto de protocolos MAC para redes *wireless* FD. Na Seção 2.4, serão discutidos os requisitos de projeto de protocolos MAC necessários à questão da escalabilidade de desempenho, conforme reportado

no estado da arte.

2.3.1 Protocolo MAC *Full Duplex*

O protocolo FD-MAC foi desenvolvido por Sahai, Patel e Sabharwal (2011) juntamente com um método de cancelamento de auto interferência chamado FD-PHY. Para o funcionamento, o protocolo necessita que seja adicionado um cabeçalho na estrutura de pacotes usado pelo padrão IEEE 802.11. O objetivo do protocolo é maximizar o número de vezes que um nó pode transmitir e receber ao mesmo tempo. Este protocolo utiliza três mecanismos para atingir este objetivo: *shared random backoff* (SRB), *snooping* e *virtual contention resolution* (SAHAI; PATEL; SABHARWAL, 2011).

O primeiro mecanismo, o SRB, utiliza o cabeçalho adicionado para que um nó possa descobrir se os nós a qual destinam-se os seus pacotes em sua fila também possuem pacotes para ele. Para que os dois nós não ocupem o meio continuamente e não permita que outros nós transmitam, é utilizado o cabeçalho adicionado novamente para que os dois nós possam compartilhar um número de *backoff* com o outro. Os dois nós ficam sincronizados e ao mesmo tempo outros nós podem acessar o meio (SAHAI; PATEL; SABHARWAL, 2011).

O segundo mecanismo, *snooping*, faz com que os nós bisbilhotem os cabeçalhos adicionais enviados nos pacotes para que possam estimar a topologia local. Dessa forma, um ponto de acesso sabe que só poderá enviar um pacote para um nó enquanto recebe de outro se os nós não estiverem no alcance de interferência um do outro (SAHAI; PATEL; SABHARWAL, 2011).

Por último, o FD-MAC utiliza o mecanismo *virtual contention resolution* que é o caso onde o ponto de acesso pode utilizar a sua fila de pacotes para decidir estatisticamente qual pacote transmitir, sempre tentando maximizar o modo FD (SAHAI; PATEL; SABHARWAL, 2011).

2.3.2 *ContraFlow*

ContraFlow é um protocolo MAC FD desenvolvido por Singh *et al.* (2011) para redes *wireless* de baixo consumo de energia. Este protocolo tenta resolver dois desafios: a utilização da capacidade FD quando o tráfego não é simétrico, ou seja, quando uma primeira estação transmite para uma segunda e essa segunda transmite para uma terceira; além de criar um sistema de gerenciamento MAC distribuído que realize a transmissão de forma justa e eficiente. O dispositivo transmissor que inicia a conexão é chamado de transmissor primário, e quem recebe o pacote enviado pelo transmissor primário é chamado de receptor primário. Devido ao cancelamento de auto interferência, é possível que exista uma segunda transmissão concomitante. Estes nós da segunda transmissão são chamados de transmissor e receptor secundário (SINGH *et al.*, 2011).

Para evitar colisões, somente o receptor primário pode iniciar uma transmissão secundária. Isso torna o procedimento de disputa desnecessário. O *ContraFlow* utiliza o histórico de transações bem sucedidas para poder assumir a estrutura topológica da rede, para identificar pares de transmissão FD que são livres, garantindo uma baixa probabilidade de nós escondidos que causam colisões (KIM *et al.*, 2013).

2.3.3 Janus

O protocolo Janus, desenvolvido por Kim *et al.* (2013), tem como objetivo identificar oportunidades para se aplicar o modo *Full Duplex*, realizar uma espécie de agendamento para a troca de pacotes com o intuito de maximizar a vazão, e prover equidade, para garantir uma forma mais justa de acesso ao meio para os nós (KIM *et al.*, 2013).

O protocolo MAC Janus funciona de forma similar aos protocolos MAC *Full Duplex* (Subseção 2.3.1) e *ContraFlow* (Subseção 2.3.2), exceto pelo fato de que ele considera o grau de interferência a que um nó é submetido durante a transmissão de outro nó. Este protocolo utiliza um mecanismo centralizado para calcular o mapa de interferência entre todos os nós da rede e, assim, definir que transmissões podem ocorrer em modo FD. O protocolo funciona por rodadas, e no começo de cada rodada o ponto de acesso pergunta para cada nó o tamanho do pacote que deseja transmitir. Além disso, o ponto de acesso também coleta informações sobre a topologia de cada nó, afim de maximizar operações *Full Duplex* (KIM *et al.*, 2013).

2.3.4 A Distributed MAC Protocol for Full Duplex Radio

O protocolo desenvolvido por Goyal *et al.* (2013) utiliza uma notificação/sinal de dois *bits* chamada *Full Duplex Acknowledgment* (FDA), usada para um nó indicar para o outro que também possui um pacote para transmitir para ele, que não possui pacotes para transmitir, que não possui capacidade FD, ou que não permite transmissões (GOYAL *et al.*, 2013).

Este protocolo também implementa uma notificação/sinal de um *bit* chamado *transmission flag* (TF) usado na situação onde o nó A deseja transmitir para um nó B e o nó B deseja transmitir para o nó A. Então B envia um TF com o *bit* 0 para que nenhum vizinho de A envie pacotes para ele, dessa forma, evitando uma colisão e permitindo que haja uma transmissão e recepção simultânea no nó A e B (GOYAL *et al.*, 2013).

2.4 REQUISITOS DE ESCALABILIDADE DOS GANHOS *FULL DUPLEX*

Um trabalho recente (XIE; ZHANG, 2014) utilizou um *framework* analítico para responder a pergunta mais importante relacionada ao projeto de protocolos MAC FD sem fio: rádios *Full Duplex* conseguem dobrar a capacidade de uma rede *wireless*? Em se tratando do método de acesso baseado no padrão IEEE 802.11, a resposta é negativa a menos que dois aspectos sejam “cuidadosamente” considerados no projeto do protocolo: reuso espacial e disputa assíncrona. Protocolos desenvolvidos até então não levam em consideração estes dois aspectos mencionados por Xie e Zhang (2014), dessa forma é possível entender porque eles não conseguem escalar o desempenho teórico.

2.4.1 Reuso Espacial

Transmissões *Full Duplex* permitem que pacotes sejam enviados concorrentemente, porém isso aumenta o alcance de interferência dos nós (XIE; ZHANG, 2014).

Na Figura 2 é possível verificar que na transmissão *Half Duplex*, onde TX1 transmite para RX1 e TX2 transmite para RX2, não há conflito, portanto as duas transmissões podem ser feitas ao mesmo tempo. Na transmissão *Full Duplex*, TX1 transmite para RX1 e RX1 transmite para TX1. Como RX2 está no raio de interferência de RX1, então TX2 não pode transmitir para RX2 sem a possibilidade de uma colisão em RX2 (XIE; ZHANG, 2014).

Em ambos casos, a capacidade da rede é a mesma, portanto não há ganhos na rede *Full Duplex* (XIE; ZHANG, 2014).

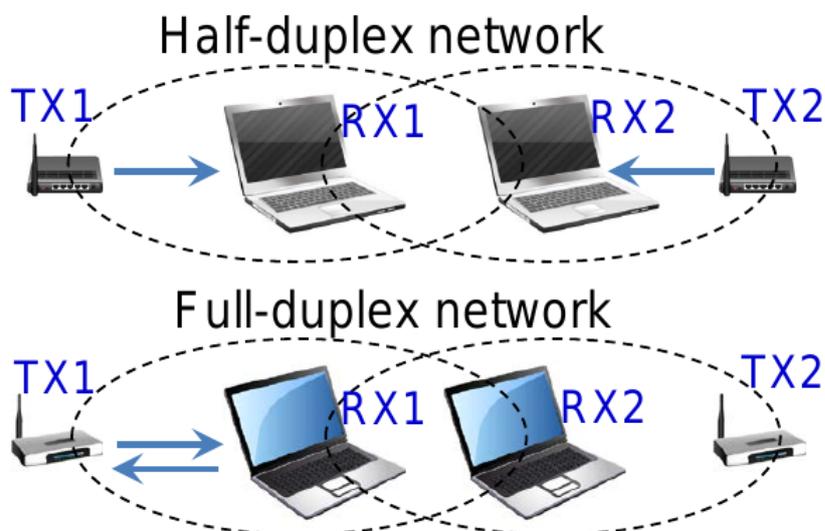


Figura 2 – Diminuição do ganho *Full Duplex* por reuso espacial.

Fonte: Xie e Zhang (2014)

2.4.2 Disputa Assíncrona

Algoritmos CSMA são assíncronos por natureza, e por isso não podem garantir que dois nós acessem o canal ao mesmo tempo para permitir uma transmissão *Full Duplex*. Na Figura 3 é possível ver que dois nós que desejam transmitir um para o outro (RX1 e TX1) podem estar em estágios diferentes de *backoff*. Enquanto o TX1 está pronto pra transmitir, o RX1 pode ainda ter de esperar mais tempo até alcançar zero em sua contagem regressiva de *backoff*. Isso inviabiliza que duas transmissões ocorram em simultâneo e, conseqüentemente, impede que a capacidade da rede seja dobrada pela tecnologia FD (XIE; ZHANG, 2014).

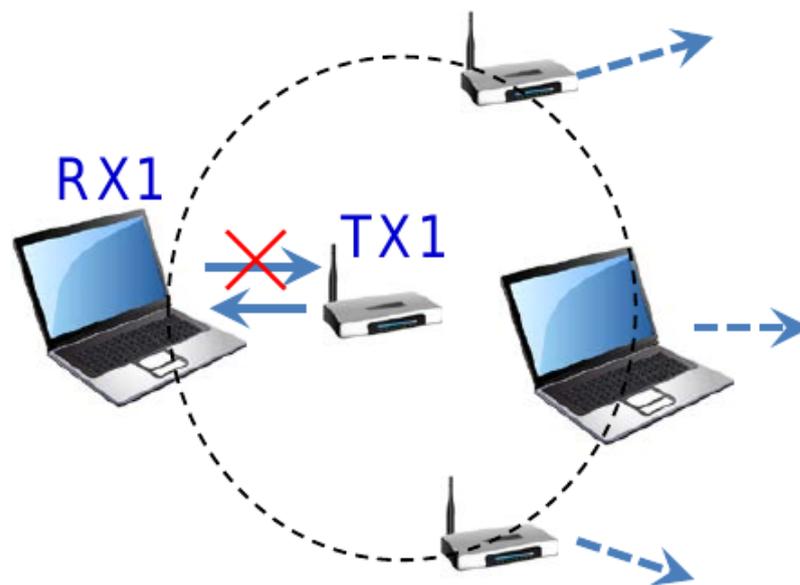


Figura 3 – Diminuição do ganho *Full Duplex* por disputa assíncrona.

Fonte: Xie e Zhang (2014)

2.5 PROTOCOLO MAC FD PBP-EDCA

O protocolo MAC Piece-by-Piece - Enhanced Distributed Channel Access (PbP-EDCA), desenvolvido por (QUEIROZ; HEXSEL, 2015), pode ser considerado como uma generalização do protocolo IEEE 802.11 DCF CSMA/CA.

O paradigma Piece-by-Piece tem como objetivo dividir um canal largo B_w em N_C canais menores (denotados por B_c MHz tal que $c \in [0, N_C - 1]$) pois dessa forma não será necessária uma razão sinal/interferência (SNR) tão alta quanto na transmissão de *frames* utilizando o canal inteiro. Além disso, canais estreitos exigem que um menor número de portadoras do canal sejam sensoriadas como livres para acessar o meio, o que pode diminuir consideravelmente o tempo de espera até a transmissão. Portanto o paradigma PbP faz um melhor uso do espectro

disponível (QUEIROZ, 2013).

No PbP-EDCA, um dos N_C canais deve ser denotado de canal primário P_c ($c = 0$) e os outros canais devem ser chamados de canais secundários. No protocolo MAC IEEE 802.11ac, que possui largura dinâmica de canal, as transmissões utilizam o canal inteiro caso os canais secundários estejam desocupados. Isso é o oposto do que é feito pelo PbP-EDCA, pois mesmo que os canais secundários estejam desocupados, o nó que vencer realizará uma sequência de transmissões em canais estreitos em vez de uma única transmissão em um canal largo. Com o PbP-EDCA o nó aproveita uma transmissão em um canal para indicar sua intenção em transmitir no outro canal, até o máximo de N_C transmissões possíveis. Tal solicitação é feita através do *Bit* de Negociação de Canal (*Channel Negotiation Bit*) (CNB) (QUEIROZ; HEXSEL, 2015). O nó de destino deverá enviar um ACK também indicando o CNB para que o nó transmissor possa continuar enviando *frames* e aguardar por um período de tempo T_α no próximo canal ($c = 1$) (QUEIROZ; HEXSEL, 2015).

O nó transmissor e receptor agora deverão transmitir e esperar a transmissão no próximo canal ($c = 1$). Enquanto isso, o canal primário estará livre para disputa, inclusive caso o nó receptor queira transmitir, já que ele é FD.

Quando o nó transmissor recebe o ACK, ele poderá continuar a transmissão no canal $c = 1$, e também poderá receber transmissões que estão vindo do canal primário. Para transmitir o nó transmissor deverá aguardar um período de tempo T_β tal que $T_\beta < T_\alpha$ para evitar colisões causadas por agentes externos atuando na mesma frequência de banda. Queiroz e Hexsel (2015) sugerem que os valores de T_β podem ser 0 em condições ideais ou $T_\beta = \text{DIFS}$.

Esse processo garante que um nó poderá realizar N_C transmissões após somente uma disputa pelo canal primário. Caso algum erro ocorra, o protocolo reenvia o *frame* e reinicia a disputa CSMA/CA no P_c .

A Figura 4, na página a seguir, mostra o fluxograma do protocolo MAC PbP-EDCA baseado no procedimento padrão de transmissão do IEEE 802.11 EDCA.

2.5.1 Aspectos de Escalabilidade do PbP-EDCA

Como discutido na Seção 2.4, para garantir que rádios FD possam dobrar a capacidade de um rede IEEE 802.11 é preciso considerar o emprego de reuso espacial e resolver o impacto negativo que a assincronia do CSMA/CA causa no ganho FD. Os protocolos desenvolvidos até então não cumpriam os dois requisitos e, dessa forma, não dobravam a capacidade da rede como era esperado teoricamente. O PbP-EDCA, ao contrário, satisfaz os dois requisitos (QUEIROZ; HEXSEL, 2015).

A capacidade *Full Duplex* do PbP-EDCA é explorada quando todos os N_C nós estão ocupados, e para isso acontecer, os nós devem selecionar diferentes valores de *backoff*, da mesma

complementam as afirmações realizadas por Xie e Zhang (2014).

2.6 AVALIAÇÃO DE PROTOCOLOS MAC WIRELESS

Protocolos MAC *Wireless* podem ser avaliados de três formas distintas: através de modelos analíticos, simulação e através de experimentos (PATNEY, 2006).

Modelos analíticos são modelos matemáticos que são aplicados a sistemas computacionais e consistem em um conjunto de equações que descrevem um comportamento, nesse caso, o comportamento de um protocolo MAC. Esses comportamentos são medidos e calculados em um tempo finito de tempo. O modelo analítico serve como uma base de predição do comportamento, e como a mudança de cada elemento altera o resultado final (CALIRI, 2000). Por utilizar equações para modelar um protocolo, o modelo analítico necessita de suposições, o que limita cenários do mundo real (KHAN; BILAL; OTHMAN, 2013).

Simulações de redes são os métodos de avaliação mais utilizados na área de redes. Este método é muito utilizado porque permite que uma pessoa modele uma rede arbitrária e especifique tanto o comportamento dos nós da rede quanto o canal de comunicação. Um protocolo implementado em um simulador pode ser analisado em diferentes topologias de rede, pois o que muda são os conjuntos de parâmetros de simulação (WEINGARTNER; LEHN; WEHRLE, 2009).

Avaliações que utilizam experimentos em protocolos MAC normalmente são feitas mais rapidamente do que simulações porém possuem um custo muito alto devido ao número de dispositivos que devem ser utilizados para tornar a avaliação adequada ao mundo real (PATNEY, 2006).

O método utilizado neste trabalho é o de simulação, através da linguagem de programação Java, porque permite avaliar o protocolo proposto com rapidez, além de garantir controle de baixo nível sobre comunicações pela rede (PATNEY, 2006).

3 IMPLEMENTAÇÃO DO PROTOCOLO

Este trabalho de graduação requer a implementação do protocolo PbP-EDCA em uma ferramenta de simulação e uma análise comparativa deste protocolo com o DCF CSMA/CA do IEEE 802.11.

Inicialmente foi escolhida a ferramenta de simulação NS-3 (*Network Simulator 3*), onde deveria ser feita a modificação de sua implementação para suportar o PbP-EDCA. Contudo, devido a sua complexidade de codificação na linguagem C++, foi decidido implementar os dois protocolos de acesso ao meio, PbP-EDCA e DCF CSMA/CA do IEEE 802.11 na linguagem de programação Java pela utilização de *DatagramSocket*, que por sua vez é o mecanismo de comunicação de rede que utiliza o protocolo de transporte UDP. Com o protocolo UDP, um nó transmite um pacote de dados para outro, porém não há uma garantia de que o dado chegará no recipiente, e também não há garantias sobre a ordem de chegada. Essa falta de garantias na transmissão faz com que este protocolo transporte pacotes mais rápido do que outro protocolo de transporte, como o TCP.

O protocolo PbP-EDCA pode ser visto como uma generalização do protocolo DCF CSMA/CA IEEE 802.11 (QUEIROZ; HEXSEL, 2015), portanto foi necessário começar com a implementação do segundo.

A implementação do protocolo DCF CSMA/CA IEEE 802.11 foi baseada em *timeouts* do socket. A função *getSoTimeout* recebe como um parâmetro um inteiro que representa o tempo de *timeout* em milissegundos. Se a função de leitura do *socket* ficar inativa pelo período de *timeout* especificado, então uma exceção será lançada. Esta função específica foi útil pois toda vez que um nó recebe um *frame*, ele deve parar o que estava fazendo, seja isso contando *slots* no procedimento de *backoff*, ou se preparando para enviar o seu próprio *frame*, e processar o *frame* recebido. Isso também significaria que o meio está ocupado, dessa forma a contagem de *backoff* deveria ser interrompida até que o meio ficasse livre novamente.

Com essa função podemos decidir quando é a hora de contar SIFS, DIFS, ACK TIMEOUT, e SLOTS, e tomar as ações necessárias quando cada tempo desses tiver passado. Para simular o tempo de transmissão de um *frame* de forma a ficar consistente com o tempo estipulado pelo protocolo (DIFS, por exemplo), foram inseridos *busy tones*, que simulam o tempo dos outros nós receberem o *frame*. Todas as transmissões neste código são enviadas para todos os nós (em *broadcast*), sendo que fonte e destinos são itens a ser diferenciados pelo cabeçalho do *frame*. O Figura 5 contém o código principal utilizado no envio e recebimento de *frames* no DCF CSMA/CA IEEE 802.11.

Utilizando conceitos da orientação a objetos, foi decidido criar duas classes *PbpPrimaryChannelDispute* e *PbpSecondaryChannelDispute*. A primeira representando o comportamento previsto no canal primário do PbP-EDCA, e a segunda representando o comportamento previsto nos demais canais do protocolo. A classe *PbpPrimaryChannelDispute* herda da classe

DCF, discutida anteriormente, e adiciona a capacidade de poder seguir para um canal secundário quando acordado entre os nós (através do CNB). A classe *PbpSecondaryChannelDispute* herda da classe que representa o comportamento no canal primário removendo apenas os aspectos relacionados a disputa do meio, como o processo de *backoff*.

No começo da execução do programa, todos os canais (a quantidade de canais é apenas um parâmetro do programa), que operam em paralelo através de *threads* são inicializados, porém os canais secundários são colocados para “dormir”, através do método *wait()*. Após a transmissão no canal primário, se houver a intenção de continuar transmitindo para o mesmo nó, o canal primário “acordará” o canal secundário através do método *notify()*. Quando o canal secundário encerra suas atividades, ele é colocado para “dormir” novamente.

A simulação gerou resultados para a comparação entre os dois protocolos. Ela foi feita utilizando diferentes configurações do protocolo PbP-EDCA, como quantidade de canais, diferentes taxas de transmissão, e quantidade de *frames* a serem transmitidos. A comparação foi feita através da vazão, que corresponde a quantidade de dados transmitidos em um determinado tempo.

A idéia do algoritmo da implementação do PbP-EDCA pode ser compreendida pelo fluxograma da Figura 6. A ação principal do código consiste em monitorar o meio. Enquanto não chega nenhum pacote, o algoritmo deve contar DIFS. Se for possível contar DIFS até o final, isso significa que o meio está livre e é possível transmitir. No caso em que a contagem de DIFS é interrompida, isso significa que foi recebido um pacote que deve ser tratado. Se for um pacote de dados, um ACK deverá ser enviado e o *bit* de negociação de canal deverá ser atribuído o valor 1, ou seja, nesse caso é possível realizar a troca de canal. Se for um ACK, isso significa que foi enviado um pacote de dados previamente e que o destinatário está confirmando o recebimento e concordando com a troca de canal.

Os nós, na simulação, estão em uma topologia *ad hoc*. Redes *wireless ad hoc* são compostas de nós que se comunicam através de um canal em comum. Este tipo de topologia é distribuída e descentralizada, portanto não requer uma estação base, ou controladores de redes sem fio (BOUKERCHE, 2008). A Figura 7 mostra um exemplo de rede *ad hoc* sem fio.

A simulação foi feita em um computador com um processador Intel Core i5, com quatro núcleos de processamentos, sendo dois deles dedicados exclusivamente para as simulações.

```

public void begin() throws InterruptedException {
    Phy.setTimeout("DIFS", channel);
    while(true){
        try {
            packet = Phy.senseMedium(channel);
        } catch (DifsTimeoutException e) {
            logInfo("finish counting DIFS");
            if(!packetQueue.isEmpty()){
                logInfo("get next packet");
                Packet pkt = packetQueue.pop();
                if(packetQueue.isEmpty()){
                    logInfo("packetQueue is empty");
                }
                currentPacket = pkt;
                logInfo(pkt.serialize());

                startTransmission(pkt);
                Phy.setTimeout("ACK_TIMEOUT", channel);

                logInfo("waiting for ACK");
            } else {
                logInfo("cannot get next packet.");
                logInfo("packetQueue is empty");
            }
            continue;
        } catch (AckTimeoutException e) {
            System.out.println("ACK timeout. Enqueuing packet");
            logInfo("ACK timeout. Enqueuing packet");

            handleAckTimeout();
            Phy.setTimeout("BACKOFF", channel);

            logInfo("starting backoff");
            continue;
        } catch (DifsBackoffTimeoutException e) {
            logInfo("choosing random slots");

            chooseSlots();
            Phy.setTimeout("SLOTS", channel);

            continue;
        } catch (SlotTimeoutException e) {
            countSlots();
            continue;
        } catch (SifsTimeoutException e) {
            logInfo("Finished waiting SIFS.");
        }
        startTransmission(new Packet(idx, packet.getSrc(), "ack"));
        Phy.setTimeout("BACKOFF", channel);

        logInfo("start backoff");
        continue;
    }

    if(!packet.isFinished()){
        continue;
    }

    logInfo(packet.serialize());

    if(packet.getDst() == idx){
        if (packet.isData()){
            logInfo("data packet received");

            receiveData(packet);
            Phy.setTimeout("SIFS", channel);

            logInfo("Waiting SIFS.");
            continue;
        } else if (packet.isAck()){
            receiveAck(packet);
            Phy.setTimeout("BACKOFF", channel);

            logInfo("start backoff");
            continue;
        }
    } else {
        if (isWaitingAck){
            cancelAck();
        }
        Phy.setTimeout("BACKOFF", channel);

        logInfo("start backoff");
        continue;
    }
}

```

Figura 5 – Estrutura principal do código que trata do envio e recebimento de *frames*

Fonte: Autoria própria

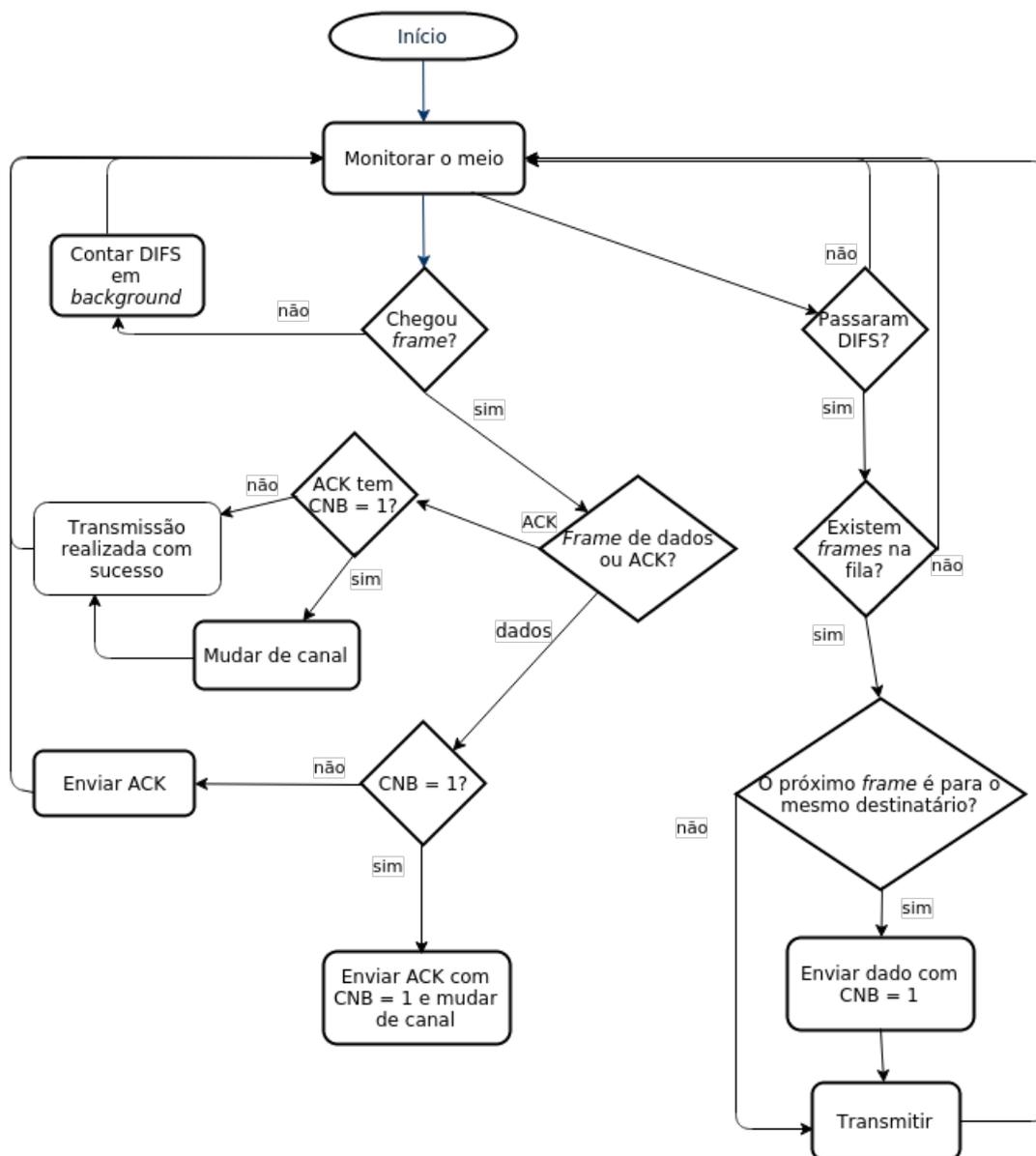


Figura 6 – Fluxograma do algoritmo da implementação do protocolo PbP-EDCA

Fonte: Autoria própria

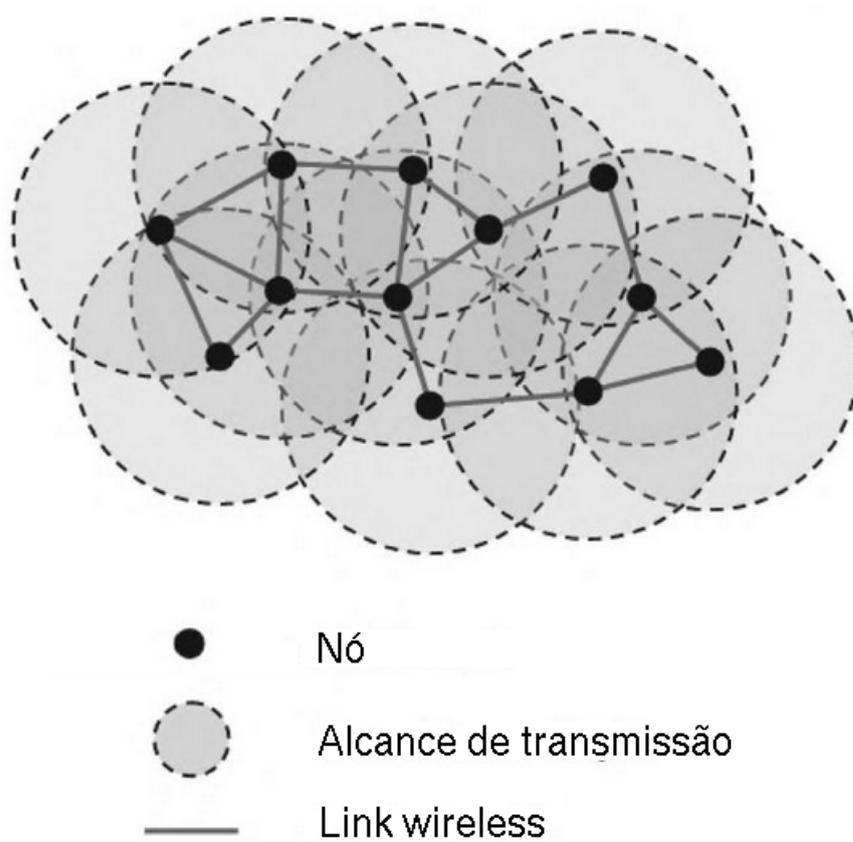


Figura 7 – Exemplo de uma rede ad hoc

Fonte: Adaptado de Boukerche (2008)

4 RESULTADOS

Primeiramente foi feita uma execução da simulação com 2 nós e com 10, 20, ..., 100 pacotes com *payload* de 1460 *bytes*, valor de um datagrama UDP, comparando os protocolos CSMA/CA DCF IEEE 802.11 (20 MHz), PbP-EDCA utilizando dois canais de 10 MHz e o PbP-EDCA utilizando 4 canais de 5 MHz cada com taxa de transmissão de 54 MB/s. A Figura 8 mostra um gráfico da comparação da vazão com os protocolos anteriormente citados.

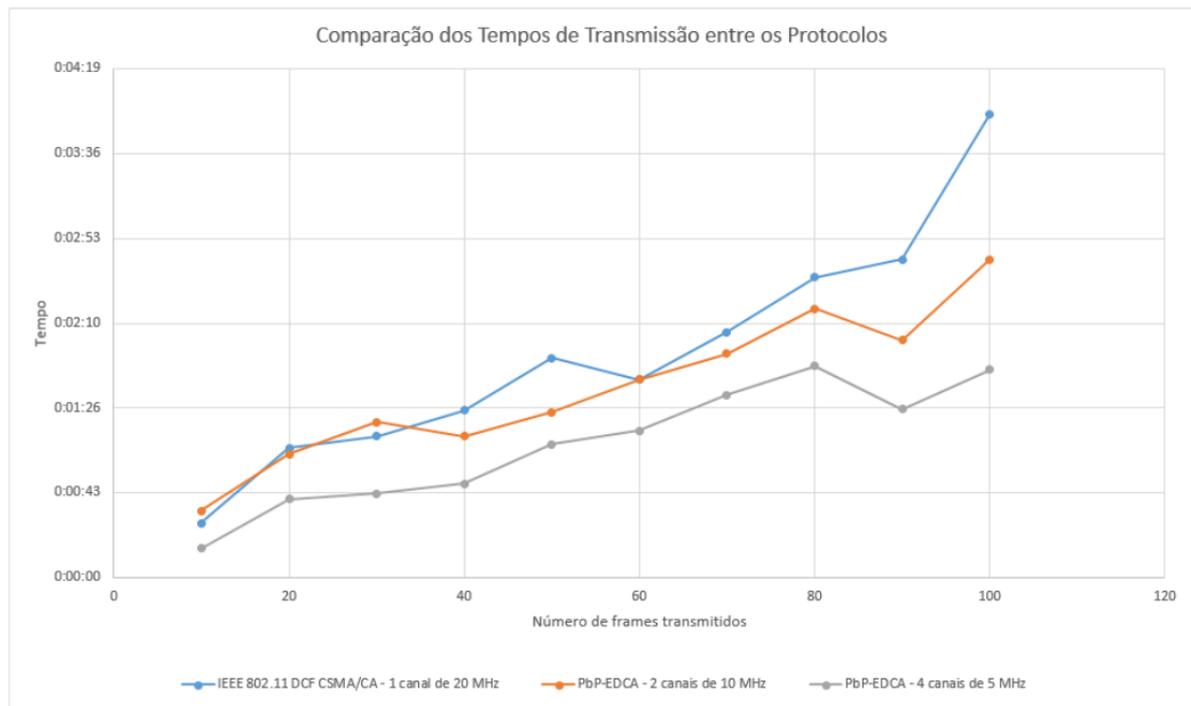


Figura 8 – Gráfico de comparação entre o tempo de transmissão dos protocolos

Fonte: Autoria própria

Os valores de *throughput*, ou seja, a vazão do gráfico na Figura 8 podem ser vistos na próxima página na Tabela 1.

A partir destas informações, fica claro que o desempenho do protocolo PbP-EDCA com quatro canais de 5 MHz é melhor que os demais, visto que sua vazão é maior para todas as quantidades de *frames* que foram testadas. O PbP-EDCA com dois canais de 10 MHz também tem um desempenho superior ao IEEE 802.11 DCF CSMA/CA. Neste cenário é possível concluir que o protocolo padrão, utilizado atualmente nas redes *Half Duplex*, subutiliza as capacidades de uma rede *Full Duplex*.

O ruído em um canal é um fator que limita a taxa de transmissões de dados, e segundo IEEE... (2012), é possível associar uma certa taxa de transmissão a um RSSI (*Receive Signal Strength Indication*). Para o gráfico na Figura 9 foi assumido um RSSI de -77 dBm, o que é equivalente a uma transmissão de 18 MB/s para um canal de 20 MHz, 12 MB/s para um canal

Tabela 1 – Comparativo da vazão entre os protocolos

Quantidade de frames	Vazão para o IEEE 802.11 DCF CSMA/CA (B/s)	Vazão para o PbP-EDCA - 2 canais (B/s)	Vazão para o PbP-EDCA - 4 canais (B/s)
10	521.4	429.4	973.3
20	442.4	463.5	730.0
30	608.3	554.4	1018.6
40	687.1	811.1	1216.7
50	651.8	869.0	1073.5
60	867.3	867.3	1168.0
70	817.6	896.5	1098.9
80	763.4	852.6	1081.5
90	811.1	1086.0	1527.9
100	618.6	901.2	1377.4

Fonte: Autoria própria

de 10 MHz (como o PbP-EDCA com dois canais) e 9 MB/s para um canal de 5 MHz (como o PbP-EDCA com quatro canais).

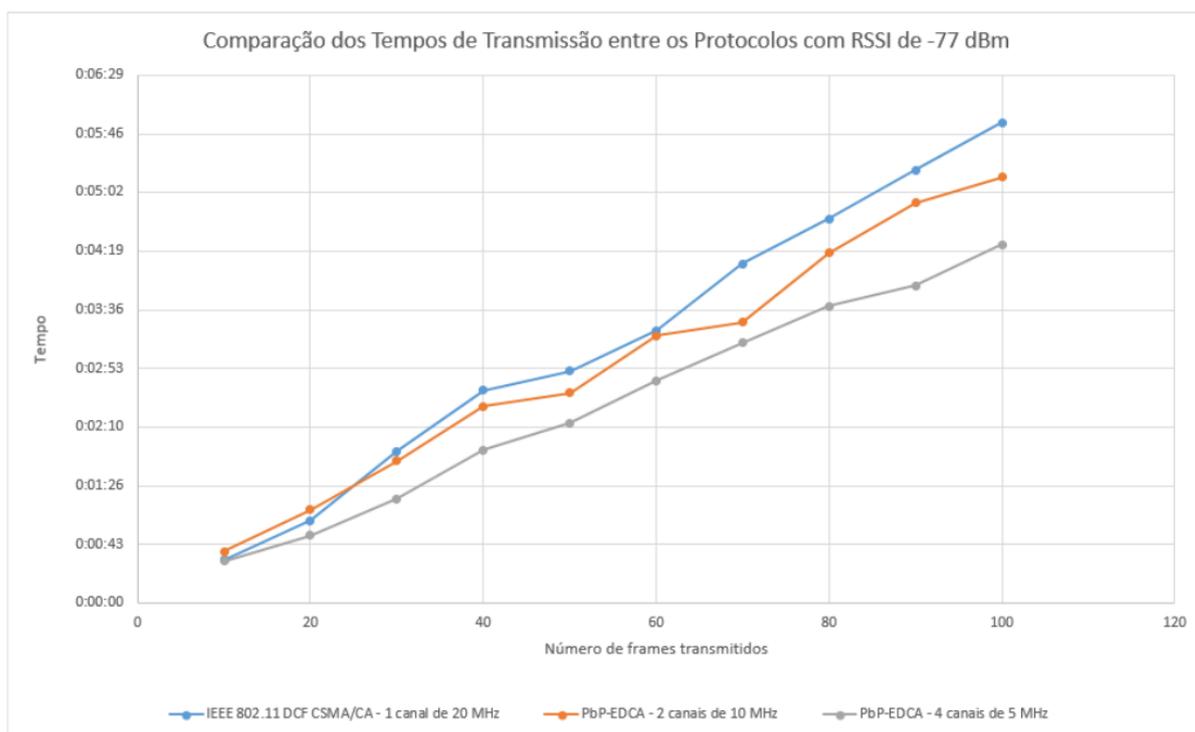


Figura 9 – Gráfico de comparação entre o tempo de transmissão dos protocolos com RSSI de -77 dBm

Fonte: Autoria própria

Os valores de *throughput* correspondentes ao gráfico da Figura 9 podem ser vistos na Tabela 2.

Para este caso com RSSI igual a -77 dBm, é possível ver que o protocolo PbP-EDCA com 2 canais de 10 MHz possui um desempenho parecido com o protocolo padrão, o IEEE

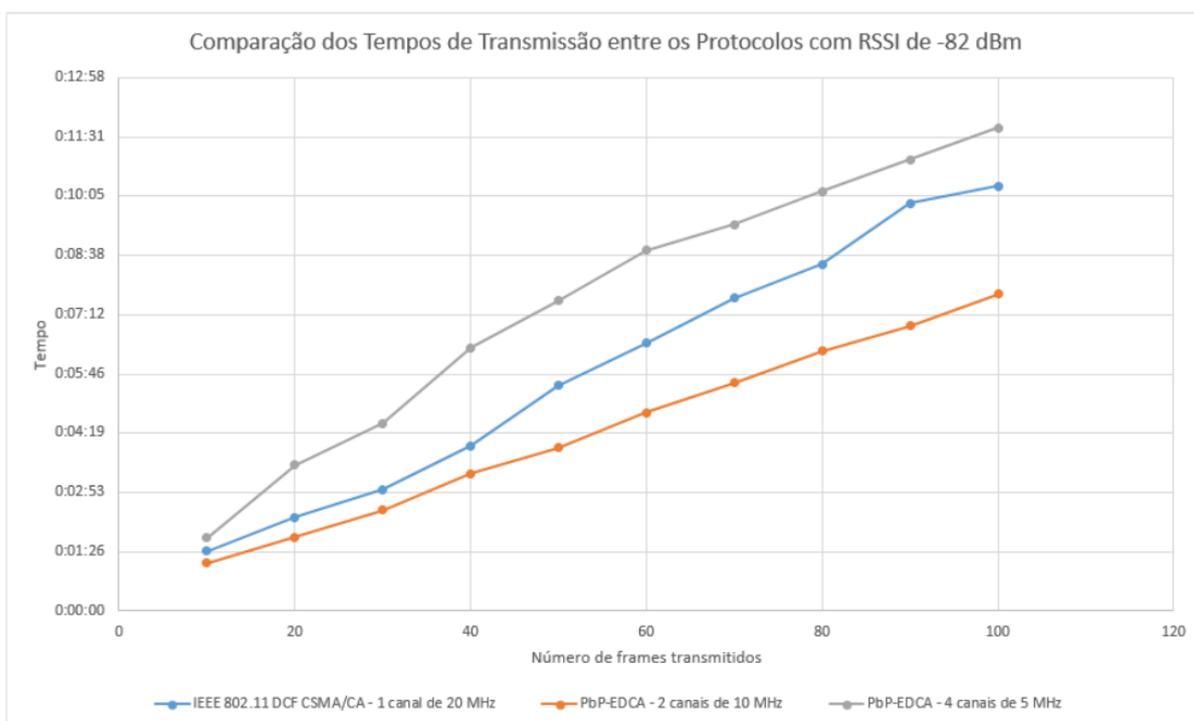
Tabela 2 – Comparativo da vazão entre os protocolos com RSSI igual a -77 dBm

Quantidade de frames	Vazão para o IEEE 802.11 DCF CSMA/CA (B/s)	Vazão para o PbP-EDCA - 2 canais (B/s)	Vazão para o PbP-EDCA - 4 canais (B/s)
10	456.3	384.2	471.0
20	478.7	423.2	584.0
30	391.1	417.1	568.8
40	372.0	402.8	516.8
50	426.9	471.0	548.9
60	435.8	444.7	534.1
70	408.8	493.7	532.3
80	412.7	452.7	533.3
90	411.9	445.4	561.5
100	412.4	465.0	553.0

Fonte: Autoria própria

802.11 DCF CSMA/CA, apesar de conseguir fazer as transmissões ligeiramente mais rápido. No entanto, o PbP-EDCA com 4 canais de 5 MHz ainda obteve um desempenho melhor que os dois protocolos mencionados anteriormente.

A terceira simulação foi realizada com uma rede com RSSI igual a -82 dBm, sendo que a taxa de transmissão para um canal de 20 MHz é de 6 MB/s, para um canal de 10MHz também é 6 MHz e 4,5 MB/s para um canal de 5 MHz. Os resultados podem ser vistos na Figura 10.

**Figura 10 – Gráfico de comparação entre o tempo de transmissão dos protocolos com RSSI de -82 dBm**

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Comparativo da vazão entre os protocolos com RSSI igual a -82 dBm

Quantidade de <i>frames</i>	Vazão para o IEEE 802.11 DCF CSMA/CA (B/s)	Vazão para o PbP-EDCA - 2 canais (B/s)	Vazão para o PbP-EDCA - 4 canais (B/s)
10	167.8	208.6	136.4
20	213.1	270.4	137.1
30	247.5	298.0	159.9
40	242.3	292.0	152.1
50	221.9	306.7	161.5
60	224.0	303.1	166.5
70	224.1	306.9	181.2
80	230.8	308.2	190.8
90	221.2	315.9	199.7
100	235.5	316.0	207.1

Fonte: Autoria própria

Os valores de *throughput* correspondentes ao gráfico da Figura 10 podem ser vistos na Tabela 3.

É possível observar, nessas condições muito ruidosas, que o PbP-EDCA com 4 canais de 5 MHz obteve um desempenho muito pior do que visto anteriormente. Essa grande diferença é dada pela baixa taxa de transmissão, que faz com que cada transmissão demore mais, e seja portanto mais propensa a erros. Quando comparando o CSMA/CA DCF IEEE 802.11 e o PbP-EDCA com 2 canais de 10 MHz, é possível ver que o primeiro ainda é ligeiramente mais devagar que o segundo, fazendo com que sua vazão seja menor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho concluiu seu objetivo geral de comparar o protocolo PbP-EDCA com o protocolo IEEE 802.11, além de garantir uma síntese do estado da arte na área de protocolos MAC FD sem fio, algo inexistente na atual literatura. Foi implementado o protocolo IEEE 802.11 e o PbP-EDCA na linguagem Java, e foi feita uma simulação em cenários diferentes para que os protocolos pudessem ser comparados e avaliados.

Com este trabalho foi possível chegar a conclusão que a utilização do protocolo PbP-EDCA, seja na sua configuração com 2 canais, ou 4 canais, traz grandes benefícios em relação ao atual protocolo padrão, o CSMA/CA DCF IEEE 802.11, em redes *Full Duplex*. Com o protocolo padrão, os grandes benefícios de uma transmissão *Full Duplex* seriam perdidos. O protocolo PbP-EDCA, além de mostrar um desempenho melhor, também é compatível com as outras versões do padrão, inclusive o próprio CSMA/CA DCF 802.11. Isso significa que transmissões entre o atual protocolo padrão e o PbP-EDCA também são aceitas, e verificar em quanto é prejudicada a performance do protocolo é um excelente objeto de estudo para trabalhos futuros.

Em casos que a taxa de transmissão é afetada pelo ruído foi possível observar que o PbP-EDCA ainda possui uma ótima performance, porém devem ser considerados os casos em que a taxa de transmissão fica tão baixa que a grande quantidade de canais se torna uma desvantagem.

A implementação feita neste trabalho possui a capacidade de aceitar mais estações de transmissão. Quanto maior a quantidade de nós, maior o tempo que demora para a simulação terminar, por este motivo o escopo deste trabalho abrange apenas transmissões com dois nós.

Existem várias possibilidades para trabalhos futuros como verificar a performance do protocolo PbP-EDCA em transmissões com mais nós e implementar o protocolo em uma ferramenta de simulação que possuía uma implementação validada do protocolo IEEE 802.11.

REFERÊNCIAS

- BHARADIA, D.; MCMILIN, E.; KATTI, S. Full Duplex Radios. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 43, n. 4, p. 375–386, ago. 2013. ISSN 0146-4833.
- BOUKERCHE, A. **Algorithms and Protocols for Wireless, Mobile Ad Hoc Networks**. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2008. ISBN 0470383585, 9780470383582.
- CALIRI, G. V. Introduction to Analytical Modeling. In: **Int. CMG Conference**. [S.l.]: Computer Measurement Group, 2000. p. 31–36.
- CISCO. **802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi: Technical White Paper**. [S.l.], 2012. Disponível em: <http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps11983/white_paper_c11-713103.pdf>.
- DUARTE, M. *et al.* Design and Characterization of a Full-Duplex Multiantenna System for WiFi Networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 63, p. 1160–1177, 2013.
- GAST, M. S. **802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide**. [S.l.]: O'Reilly, 2002. 464 p. ISBN 0-596-00183-5.
- GOYAL, S. *et al.* A distributed MAC protocol for full duplex radio. In: **Signals, Systems and Computers, 2013 Asilomar Conference on**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 788–792.
- HONG, S. S.; MEHLMAN, J.; KATTI, S. Picasso: Flexible RF and Spectrum Slicing. In: **Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication**. New York, NY, USA: ACM, 2012. (SIGCOMM '12), p. 37–48. ISBN 978-1-4503-1419-0.
- IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications - Amendment 8: MAC Control Frame for Priority-based Flow Control. **IEEE Std 802.3bd-2011 (Amendment to IEEE Std 802.3-2008)**, p. 1–31, Aug 2011.
- IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. **IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)**, p. 1–2793, March 2012.
- KHAN, A. ur R.; BILAL, S. M.; OTHMAN, M. A Performance Comparison of Network Simulators for Wireless Networks. **CoRR**, abs/1307.4129, 2013.
- A.K. Khandani. **Methods for spatial multiplexing of wireless two-way channels**. 2010. US7817641 B1.
- KIM, J. Y. *et al.* **Janus: A Novel MAC Protocol for Full Duplex Radio**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://hci.stanford.edu/cstr/reports/2013-02.pdf>>.
- LEE, B.; CHOI, S. **Broadband Wireless Access and Local Networks: Mobile WiMax and WiFi**. Artech House, 2008. (Artech House mobile communications series). ISBN 9781596932944. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Zo5R1MBp1P4C>>.

PARK, M. IEEE 802.11ac: Dynamic Bandwidth Channel Access. In: **Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5. ISSN 1550-3607.

PATNEY, R. **Survey on Performance Evaluation Techniques for Medium Access Control Protocols**. 2006. Disponível em: <http://www.cs.wustl.edu/~jain/cse567-06/mac_perf.htm>.

QUEIROZ, S. All-at-once or piece-by-piece: How to access wide channels in WLANs with channel width diversity? **Communications Letters, IEEE**, v. 17, n. 11, p. 2188–2191, 2013.

QUEIROZ, S.; HEXSEL, R. Translating Full Duplexity into Capacity Gains for the High-Priority Traffic Classes of IEEE 802.11. 30th Symposium on Applied Computing, ACM SAC. 2015.

SAHAI, A.; PATEL, G.; SABHARWAL, A. Pushing the limits of full-duplex: Design and real-time implementation. **CoRR**, abs/1107.0607, 2011.

SINGH, N. *et al.* Efficient and fair MAC for wireless networks with self-interference cancellation. In: **WiOpt**. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 94–101. ISBN 978-1-61284-822-8.

TANENBAUM, A. **Computer Networks**. 4th. ed. [S.l.]: Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002. ISBN 0130661023.

WEINGARTNER, E.; LEHN, H. vom; WEHRLE, K. A Performance Comparison of Recent Network Simulators. In: **Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5. ISSN 1938-1883.

XIE, X.; ZHANG, X. Does full-duplex double the capacity of wireless networks? In: **INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 253–261.

ZHAI, H. *et al.* Medium access control in mobile ad hoc networks: Challenges and solutions: Research articles. **Wirel. Commun. Mob. Comput.**, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, UK, v. 6, n. 2, p. 151–170, mar. 2006. ISSN 1530-8669. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/wcm.v6:2>>.