

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

JORGE FELIPE GRYBOSI

**DESEMPENHO EM REDES WLAN MU-MIMO COM
SELEÇÃO DE USUÁRIO E DIVERSIDADE**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2019

JORGE FELIPE GRYBOSI

**DESEMPENHO EM REDES WLAN MU-MIMO COM
SELEÇÃO DE USUÁRIO E DIVERSIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Automação e Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz

Coorientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante

CURITIBA
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Grybosi, Jorge Felipe

Desempenho em redes WLAN MU-MIMO com seleção de usuário e diversidade [recurso eletrônico] / Jorge Felipe Grybosi. -- 2019.

1 arquivo eletrônico (45 f.) : PDF ; 696 KB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia. Área de Concentração: Automação e Sistemas de Energia, Curitiba, 2019.

Bibliografia: f. 42-44.

1. Sistemas de energia elétrica - Dissertações. 2. Redes locais sem fio. 3. Beamforming. 4. Sistemas MIMO. 5. Ambientes virtuais compartilhados. 6. Sistemas de transmissão de dados. 7. Sistemas de comunicação sem fio. 8. Algoritmos. 9. Processamento de sinais - Técnicas digitais. 10. Métodos de simulação. I. Moritz, Guilherme Luiz, orient. II. Brante, Glauber Gomes de Oliveira, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.31

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Desempenho em Redes WLAN MU-MIMO com Seleção de Usuário e Diversidade**”, defendida em sessão pública pelo candidato **Jorge Felipe Grybosi**, no dia 21 de novembro de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de concentração Automação e Sistemas de Energia, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz - UTFPR

Prof. Dr. João Luiz Rebelatto – UTFPR

Prof. Dr. Richard Demo Souza– UFSC

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 21 de novembro de 2019.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

RESUMO

GRYBOSI, Jorge. Desempenho em Redes WLAN MU-MIMO com Seleção de Usuário e Diversidade. 44 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Esquemas utilizando a técnica Multi-User MIMO adicionados aos padrões 802.11ac/ax podem atingir altas taxas por meio de técnicas de *beamforming*, que permitem a transmissão de *streams* de dados para múltiplos usuários de forma simultânea. Porém isso requer o conhecimento do canal do usuário (CSI), que é um processo complexo de ser obtido na prática. Alternativamente, o *access point* pode balancear a taxa estimada com o *overhead* para processamento da CSI, escolhendo um número de antenas de transmissão e recepção apropriado, assim como o número de usuários de acordo com o canal do cliente e sua fila de pacotes. O presente trabalho propõe a aplicação de um algoritmo de seleção de usuário baseado nas propriedades da teoria MU-MIMO e a SNR omnidirecional do usuário chamado PUMA (*Pre-sounding User and Mode selection Algorithm*), e sua aplicação em um cenário de diversidade. A taxa do esquema proposto com métodos tradicionais de seleção fixa e busca exaustiva e os efeitos equivalentes na eficiência energética são comparados. Os resultados apresentam que as vantagens do PUMA são ampliadas em um cenário de diversidade, onde o agrupamento de usuários causa mudanças drásticas na taxa. Ainda, utilizando diferentes esquemas de diversidade na mesma configuração de rede, diferentes taxas e consumo são obtidos. Apesar de o esquema MRC consumir mais energia durante a recepção do *frame*, é o modelo mais eficiente de diversidade na recepção, principalmente pelo ganho de SNR.

Palavras-chave: *WLAN. Beamforming. Multi-User MIMO.*

ABSTRACT

GRYBOSI, Jorge. Performance of MU-MIMO WLAN Systems with User Selection and Receive Diversity. 44 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Multi-User (MU) MIMO schemes introduced to IEEE 802.11ac/ax amendments can achieve high throughput by means of beamforming techniques, which enables transmission of different data streams to multiple users simultaneously. However, it requires the user Channel State Information (CSI), which is not trivial to obtain in practice. Alternatively, the access point can balance the expected rate with the CSI processing overhead by choosing an appropriate number of transmitting and receiving antennas, as well as the number of users according to client channel and backlog. We propose the application of a user selection algorithm based on MU-MIMO theoretical properties and user omnidirectional SNR named PUMA (Pre-sounding User and Mode selection Algorithm), and its application on a diversity scenario. The data rate of the proposed scheme with traditional fixed-mode and exhaustive search user selection and the equivalent effects on energy efficiency are compared. Results show that the PUMA advantages are enhanced in a diversity scenario when client grouping causes dramatic changes in the sum rate. In addition, by using different diversity schemes on the same WLAN configuration, different rates and consumption are obtained. Despite MRC consuming more energy during frame reception, it is the most energy-efficient receive diversity scheme, mainly because of SNR improvement.

Keywords: WLAN. Beamforming. Multi-User MIMO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Modelo da rede WLAN utilizado nas simulações contendo um AP e K_{\max} usuários.	18
Figura 2	– Representação do vetor de canal e sua projeção após a precodificação com os coeficientes de <i>beamforming</i>	20
Figura 3	– Processo de <i>sounding</i> no modo Multi-Usuário para uma transmissão com 2 e 3 usuários em paralelo.	24
Figura 4	– Diagrama do funcionamento da busca exaustiva em conjunto com outras camadas do padrão 802.11ac.	29
Figura 5	– Diagrama do funcionamento do PUMA em conjunto com outras camadas do padrão 802.11ac.	30
Figura 6	– Diagrama do funcionamento do Modo Fixo em conjunto com outras camadas do padrão 802.11ac.	33
Figura 7	– Comparação entre modos PUMA e Fixo sem diversidade e adicionando todos os usuários com diversidade MRC para $N = 2$	36
Figura 8	– Comparação dos modos PUMA e Fixo com diversidade utilizando usuários com $N = 3$ antenas.	37
Figura 9	– <i>Throughput</i> de saturação para os modos PUMA e Fixo aumentando o número de clientes com diversidade para $N = 2$	38
Figura 10	– Eficiência energética do PUMA comparando diferentes números de clientes com diversidade SC e MRC para $N = 2$	38
Figura 11	– Eficiência energética do PUMA comparando diferentes números de clientes com diversidade SC e MRC para $N = 3$	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Relação entre o número de subportadoras e largura de canal para o padrão 802.11ac.	22
Tabela 2	–	Relação entre MCS e a SNR mínima para 10% PER.	25
Tabela 3	–	Relação entre a potência adicional nos blocos de RF durante a recepção/transmissão e o índice MCS.	26

LISTA DE SIGLAS

AP	do inglês <i>Access Point</i>
BA	do inglês <i>Block Ack</i>
BFS	do inglês <i>Brute Force Search</i>
CBFR	do inglês <i>Compressed Beamforming Report</i>
CSI	do inglês <i>Channel State Information</i>
IEEE	do inglês <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMMULA	do inglês <i>Intelligent MU-MIMO User Selection with Link Adaptation</i>
ISI	do inglês <i>Inter-Symbol Interference</i>
MCS	do inglês <i>Modulation and Coding Scheme</i>
MRC	do inglês <i>Maximal Ratio Combining</i>
MRT	do inglês <i>Maximum Ratio Transmission</i>
MU-MIMO	do inglês <i>Multi-User Multiple Input Multiple Output</i>
NDP	do inglês <i>Null Data Packet</i>
NDPA	do inglês <i>Null Data Packet Announcement</i>
OFDM	do inglês <i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OFDMA	do inglês <i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Multiple-Access</i>
PER	do inglês <i>Packet Error Rate</i>
PLR	do inglês <i>Packet Loss Ratio</i>
PUMA	do inglês <i>Pre-Sounding User and Mode selection Algorithm</i>
RBF	do inglês <i>Random Beamforming</i>
SC	do inglês <i>Selection Combining</i>
SIC	do inglês <i>Successive Interference Cancellation</i>
SINR	do inglês <i>Signal-to-Interference plus Noise Ratio</i>
SNR	do inglês <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SVD	do inglês <i>Singular Value Decomposition</i>
WLAN	do inglês <i>Wireless Local Area Network</i>
ZFBF	do inglês <i>Zero-Forcing Beamforming</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

M_{\max}	Número máximo de antenas de transmissão do AP
K_{\max}	Número de usuários na rede
N	Número de antenas por usuário
K	Número de <i>streams</i> paralelos criados pelo AP
K_R	Cardinalidade do grupo no espaço de busca
M	Número de antenas de transmissão do AP
\mathbf{y}_k	Sinal recebido pelo usuário k
P_L	Perdas de percurso e sombreamento
\mathbf{h}_k	Vetor de canal para o usuário k
\mathbf{x}	Sinal transmitido pelo AP
\mathbf{n}_k	Ruído branco gaussiano para o usuário k
\mathbf{H}	Matriz de canal do sistema
N_0	Densidade espectral do ruído
P	Potência de transmissão
d	Distância do usuário em metros
β	Expoente de perda de percurso
d_0	Distância de referência para a perda de percurso
ψ_{dB}	Variável aleatória que representa o sombreamento
σ_{dB}^2	Variância dos efeitos de sombreamento
λ	Comprimento de onda da portadora
\mathbf{w}_k	Vetor de precodificação para o usuário k
$\sqrt{p_k}$	Fator de alocação de potência para o usuário k
s_k	Símbolo a ser enviado para o usuário k
θ	Ângulo entre o vetor de precodificação e o vetor de canal
SNR_k^{orig}	SNR correspondente ao canal estimado
SNR_k^{proj}	SNR após a projeção da precodificação
\mathbf{h}_k^{p}	Vetor de canal projetado após precodificação para o usuário k
\mathbf{W}	Matriz de precodificação do sistema
$(\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k \sqrt{p_k})$	Ganho efetivo do canal paralelo
F_{BF}	Tamanho do <i>feedback</i> do <i>beamforming</i> em bits
n_s	Número de subportadoras do usuário
n_a	Número de ângulos por subportadora
n_q	Quantidade de bits por ângulo
\mathbf{N}_a	Matriz de relação entre número de ângulos e modo de transmissão
\mathbf{T}_{OH}	Matriz de relação entre <i>overhead</i> e modo de transmissão
\mathcal{P}_{AP}	Consumo de potência total numa transmissão do AP
δ	Fator adicional devido à não-linearidades no amplificador de potência
P_{TX}	Consumo do circuito de RF transmitindo dados
P_{RX}	Consumo do circuito de RF recebendo dados
\mathcal{P}_U	Consumo de potência total numa transmissão do usuário
E_{frame}	Consumo total durante a transmissão de um <i>frame</i>

b_s	Quantidade de bits recebidos com sucesso
c_{BFS}	Número de combinações para a busca exaustiva
R	<i>Throughput</i> de um <i>frame</i>
L_D	Quantidade de dados a serem enviados
T_{OH}	Tempo de <i>overhead</i> total
T_D	Tempo para envio dos dados
b_k	Tamanho da fila de pacotes do usuário k
L_p	Tamanho do pacote em bits
T_S	Tempo de estimação do canal (<i>sounding</i>)
T_{CF}	Tempo de <i>feedback</i> do canal
T_{ACK}	Tempo de confirmação de recebimento
r_k	Taxa de dados do usuário k
γ_Σ	SNR obtida após o ganho por diversidade
$\bar{\gamma}$	SNR média das antenas do usuário

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	16
2	PRELIMINARES	17
2.1	MODELO DO SISTEMA	17
2.2	PADRÃO 802.11AC	21
2.2.1	Modelo de consumo de energia	26
2.3	MÉTODOS DE SELEÇÃO DE USUÁRIO	28
2.3.1	Busca Exaustiva	28
2.3.2	PUMA	30
2.3.3	Modo Fixo	32
2.4	PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	33
3	ANÁLISE NUMÉRICA	35
4	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	40
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Após a primeira aprovação do padrão 802.11 pelo IEEE, a utilização de redes LAN sem fio popularizou-se de forma global. Então, surgem aplicações que demandam cada vez mais taxa, implicando em novas atualizações do padrão que são lançadas constantemente pelo IEEE.

A cada aprimoramento do padrão, novas tecnologias de transmissão/recepção são incorporadas para atender às especificações de banda. Nesse contexto foi estabelecido o padrão 802.11 *ac* e *ax* (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2013, 2018), que compreendem novas tecnologias de alto desempenho, tanto na modulação de alta densidade (até 1024-QAM) quanto na utilização do esquema MU-MIMO, que envolve comunicações com múltiplas antenas para criar *streams* paralelas.

O grande crescimento nas tecnologias utilizando múltiplas antenas alavancou o surgimento de novos sistemas de comunicação. A utilização de um *Access Point* (AP) com tecnologia MIMO já existe no mercado, porém, segundo (ARYAFAR et al., 2010), o *throughput* de um sistema como este estaria limitado pelo número de antenas do AP e do receptor. Desta forma percebeu-se que uma solução otimizada seria transmitir para múltiplos usuários de forma simultânea.

O esquema *Multi-User* (MU) MIMO suporta múltiplas conexões em um único canal, onde os diversos usuários estão distribuídos espacialmente. Segundo (ANAND et al., 2015), um AP com essa tecnologia pode obter ganhos na capacidade, pois pode gerenciar transmissões simultâneas para múltiplos clientes através da técnica conhecida como *beamforming* (YOO; GOLDSMITH, 2006).

A técnica do *beamforming* constitui na utilização de uma matriz de antenas omni-direcionais, que são controladas através de técnicas aprimoradas de processamento de sinais, sendo que os sinais aplicados a cada um destes elementos são ponderados em amplitude e fase para produzir um feixe que pode aumentar a SNR no receptor (ARYAFAR et al., 2013). Em contrapartida, para atingir uma transmissão efetiva idealmente é necessário obter a informação de estado de canal (do inglês *Channel State Information* (CSI)), que pode ser estimada com a utilização de pilotos enviados pelo AP.

O processo de estimação do canal envolve o envio de sinais piloto pelo transmissor, utilizados como referência para o usuário determinar os coeficientes do canal, que após determinados podem ser enviados para o transmissor. Observa-se que o processo de

estimação cresce de forma linear de acordo com o número de transmissões simultâneas.

Existem diversos fatores que influenciam na alteração do estado de canal, dentre eles um fator relevante é o tempo de coerência, que corresponde ao intervalo de tempo em que o estado do canal permanece constante. Conforme o tempo de coerência diminui (se o usuário estiver em movimento, por exemplo) é preciso atualizar os dados com maior frequência. Em determinados casos, o *feedback* do canal deve ser realizado a cada transmissão de dados para um usuário, implicando em baixa eficiência espectral.

É importante mencionar que a precodificação dos dados com estimativas imperfeitas do canal, além de causar perdas na SNR do sinal recebido, pode causar interferência entre os símbolos transmitidos (do inglês *Inter-Symbol Interference (ISI)*), ou seja, afeta a comunicação de outros usuários da rede. Portanto, uma caracterização correta do estado do canal é a chave para a comunicação efetiva em esquemas MU-MIMO.

Nesse contexto, soluções que busquem encontrar valores otimizados de *feedback* dos coeficientes de canal de acordo com o estado da rede é um tópico relevante de estudo, devido aos impactos diretos tanto na eficiência quanto nas taxas atingidas. O caso ótimo envolve obter o estado dos canais e quantidade de dados de todos os usuários e realizar uma busca exaustiva dentro desse grupo. Porém, além de causar um *overhead* intenso, as operações envolvem cálculos com matrizes, que necessitam de processadores mais robustos para embutir nas aplicações, tornando-os inviáveis para o mercado. Técnicas simplificadas de seleção de usuário tornam-se relevantes nesse cenário.

Nos casos de *feedback* limitado pelos usuários (para redução de *overhead*), ou de tempos de coerência pequenos existem soluções que utilizam dados anteriores do canal disponíveis no AP para estimar o estado atual do canal. Em (ARYAFAR et al., 2013) por exemplo, é apresentado um algoritmo que distribui os clientes em grupos de acordo com a proximidade dos coeficientes do canal, desta forma é possível aplicar um método adaptativo para clientes que estão num mesmo grupo. Porém, estes algoritmos são aplicáveis somente após o *feedback* do canal.

Para amortizar os efeitos do *overhead* causado pelo envio das matrizes de canal pelos clientes, em (BEJARANO et al., 2015) é apresentado o CUiC (*Concurrent Uplink Control Messages*). Essa técnica permite o envio da CSI de forma paralela pelos usuários, e o AP determina as respostas individuais através de técnicas de equalização, como por exemplo o *Zero-Forcing (ZF)* ou *Minimum-Mean Square Error (MMSE)*. Porém sua adição no padrão 802.11ac pode trazer incompatibilidade entre os dispositivos que já utilizam essa tecnologia, além de exigir uma sincronização mais precisa.

Em casos em que o canal possui um tempo de coerência menor, quando o cliente é móvel ou a quantização do canal é imprecisa, (BEJARANO et al., 2016) apresenta o CHRoME (*CHannel Resilient Multi-User bEamforming*). A proposta tem como objetivo aprimorar a seleção de esquemas de modulação e codificação (do inglês *Modulation and Coding Scheme* (MCS)) para melhorar o desempenho, e implementa um esquema de retransmissão mais rápida em caso de falha de pacotes. Esta técnica apresenta ganhos de pelo menos 66% em *throughput* em casos de instabilidade de canal, porém nenhum esquema de seleção de usuários é apresentado, desta forma mantendo o extenso *overhead* de leitura dos canais da rede.

Como retratado em (YANG; ALOUINI, 2011), é importante reduzir a quantidade de *feedback*, mas ainda aproveitar as mesmas vantagens multi-usuário. Portanto, um sistema de seleção de usuário que consiga definir o modo e agrupamento de usuários sem necessidade de ler o estado de todos os canais pode ser uma solução promissora para a escalabilidade do padrão.

Nesse contexto, surgem soluções que possuem enfoque na seleção de modo (quantidade de antenas que vão transmitir) e usuários antes do processo de *sounding*. Em (KARMAKAR et al., 2019) os autores apresentam o algoritmo IMMULA (*Intelligent MU-MIMO User Selection with Link Adaptation*), um algoritmo de seleção dinâmico que apresenta resultados promissores comparando com outras técnicas discutidas em (SUR et al., 2016; DU et al., 2015; SHEN et al., 2015). Em (ANAND et al., 2015), por exemplo, é apresentado o PUMA (*Pre-Sounding User and Mode selection Algorithm*), que é um algoritmo executado antes de qualquer transmissão, com o objetivo de rastrear o ponto de maior eficiência com relação à métricas previamente estabelecidas (eficiência de banda, por exemplo).

Resultados apresentados em (ANAND et al., 2015) comprovam que nem sempre utilizar todas as antenas de transmissão é o método mais eficiente, devido ao compromisso existente entre o *overhead* para obter a CSI de todos os usuários e a quantidade de dados a ser transmitida para os mesmos. Neste ponto, o PUMA otimiza o processo de seleção de usuários, comparado ao padrão 802.11ac atual, que obtém o *feedback* de todos os usuários antes de realizar uma transmissão.

As técnicas anteriormente mencionadas utilizam múltiplas antenas para transmitir *streams* em paralelo, porém em todos os casos considera-se que o cliente possui apenas uma antena. Desta forma, técnicas de diversidade na recepção por meio de múltiplas antenas podem ser efetivas em aumentar a eficiência energética e

o *throughput*. Desta forma, o AP cria múltiplas *streams* paralelas que são recebidas por diferentes percursos no receptor. A partir de então, o receptor pode utilizar de técnicas de diversidade como MRC (*Maximal Ratio Combining*) ou SC (*Selection Combining*) (GOLDSMITH, 2005) para melhorar a SNR.

Neste trabalho o PUMA é avaliado com métricas de *throughput* e eficiência energética numa rede WLAN 802.11ac, porém o algoritmo é estendido para múltiplas antenas no receptor, considerando os casos em que usuários possuem 2 e 3 antenas. O PUMA foi escolhido por ser um dos mais simples dentre os mencionados, necessitando apenas de informações previamente disponíveis no AP, e uma busca exaustiva com valores escalares, tornando o processo mais simples de adicionar nos chips disponíveis no mercado, já que os fabricantes limitam a capacidade de processamento para tornar o custo mais acessível.

Os resultados obtidos são comparados com o esquema de modo fixo, onde não há nenhum método de seleção de usuários, com o PUMA original (onde cada receptor possui apenas uma antena) (ANAND et al., 2015), e com a busca exaustiva, que é realizada após obter-se o *feedback* de canal de todos os clientes. Os resultados numéricos demonstram que a diversidade na recepção pode ampliar o *throughput* e a eficiência energética em redes MU-MIMO. Ademais, o método de seleção do PUMA resulta em um ganho de 35% em taxa, enquanto o modo fixo atinge um ganho de 29% quando todos os usuários possuem três antenas com diversidade SC. Enquanto adicionar diversidade MRC em todos os usuários apresenta ganhos de 88% para o PUMA, e 71% para o modo fixo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver, por meio de análise de referências e simulações, um esquema de seleção de modo e usuário aplicado ao padrão 802.11ac com múltiplas antenas, propondo melhorias nos trabalhos já estabelecidos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Modelar o canal WLAN do padrão 802.11ac considerando as perdas em larga e pequena escala;
- Reproduzir resultados já existentes com levantamento dos pontos positivos e

negativos dos métodos;

- Adicionar a lógica de diversidade ao algoritmo do PUMA;
- Criar o modelo de consumo para o padrão 802.11ac;
- Analisar as taxas atingidas no modo fixo, no PUMA e com a busca exaustiva;
- Comparar as taxas obtidas com diversidade na recepção e a eficiência energética em cada modo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O restante do documento é organizado da seguinte forma. No Capítulo 2 são apresentados os modelos utilizados para simular uma rede WLAN utilizando o esquema MU-MIMO, descrevendo a técnica de *beamforming* utilizada e as implicações no modelo. Na sequência é apresentada uma visão detalhada dos algoritmos de seleção de usuário, que são a busca exaustiva, PUMA e Modo Fixo. Com o objetivo de simular as taxas e eficiência energética para o padrão 802.11ac, na sequência é apresentado o modelo de consumo para o padrão.

A análise numérica é apresentada no Capítulo 3, onde é possível verificar os resultados tanto em taxa quanto em eficiência energética para diferentes modos de seleção e níveis de diversidade MRC e SC. O Capítulo 4 conclui o documento, expondo as considerações finais e proposições para trabalhos futuros relacionados ao assunto.

2 PRELIMINARES

Letras maiúsculas e minúsculas em negrito são utilizadas para representar matrizes e vetores, respectivamente. \mathbf{H}^\dagger simboliza a matriz pseudo-inversa de Moore-Penrose. $E\{\cdot\}$ é o valor esperado de uma variável, e $\mathbf{h}^*(\mathbf{H}^*)$ é o(a) transposto(a) conjugado(a) de um(a) vetor(matriz). Vetores são representados como colunas no documento.

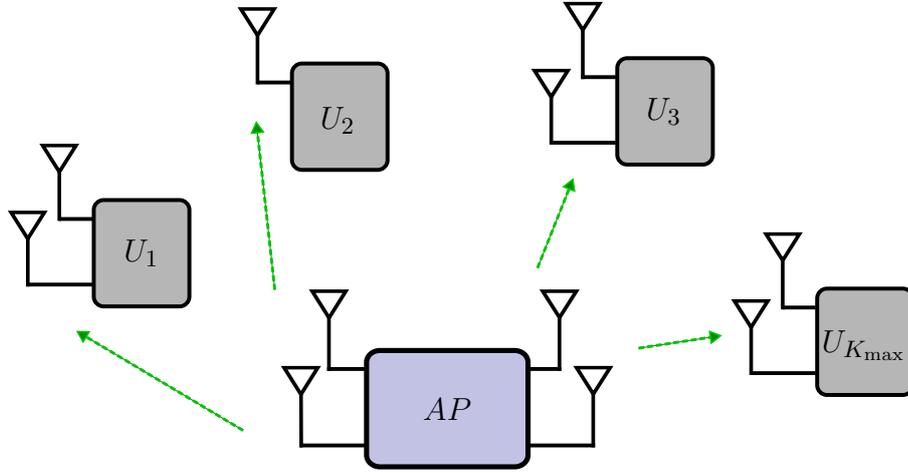
2.1 MODELO DO SISTEMA

Considera-se uma rede WLAN onde são aplicadas transmissões com a técnica *Multi-User* MIMO, conforme a Figura 1, de forma que o AP possui M_{\max} antenas de transmissão e K_{\max} usuários pertencentes à rede, cada um com N antenas. No *downlink*, o AP pode criar K *streams* em paralelo para transmitir para um conjunto de usuários com cardinalidade K_R , de forma que $K_R \leq M_{\max}$. As transmissões no *uplink* não são consideradas no trabalho.

Define-se um modo de transmissão como $[M, K]$, onde M representa as antenas de transmissão, e K é o número de *streams* paralelas criadas. Um modo de transmissão $[4, 3]$, por exemplo, representa 4 antenas de transmissão e 3 *streams* paralelas. Usuários com múltiplas antenas são adicionados, porém técnicas de diversidade são aplicadas na recepção (GOLDSMITH, 2005). Desta forma o AP cria somente um canal paralelo com cada usuário, sendo que é possível estender o modelo para múltiplas *streams* para o mesmo cliente alterando as dimensões dos sinais enviados e recebidos.

Neste trabalho, duas técnicas de diversidade são implementadas: *i.) Selection Combining* (SC), onde o usuário seleciona a antena que possui a melhor SNR instantânea no início do *frame*. *ii.) Maximal Ratio Combining* (MRC), onde o sinal resultante é uma soma ponderada dos sinais recebidos de todas as antenas. A vantagem da diversidade SC é que apenas uma cadeia de recepção necessita estar ligada, enquanto MRC possui a vantagem de obter uma SNR equivalente à soma das SNRs de todas as cadeias de recepção. Em termos de energia, aumentar o número de cadeias de recepção implica em um consumo maior (CUI et al., 2004; PERON et al., 2015). Desta forma, o modo de transmissão mais eficiente pode não ser o que apresenta a melhor SNR ou *throughput*.

Figura 1 – Modelo da rede WLAN utilizado nas simulações contendo um AP e K_{\max} usuários.



Fonte: Elaborado pelo autor

Desta forma, o sinal recebido pelo usuário k pode ser definido como (YOO et al., 2007):

$$\mathbf{y}_k = \sqrt{P_L} \mathbf{h}_k \mathbf{x} + \mathbf{n}_k, \quad (1)$$

onde P_L representa as perdas de percurso e sombreamento, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ e $\mathbf{y}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ são os sinais transmitidos e recebidos, respectivamente. Considera-se que o canal observado por cada uma das antenas de recepção é independente dos outros. O canal do usuário $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ é composto pelos coeficientes de desvanecimento, e a matriz de sistema $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{K \times M}$ é composta por \mathbf{h}_k vetores de canal, onde $k \in K_R$. Cada coeficiente de desvanecimento é modelado como uma variável aleatória Rayleigh $\mathcal{CN}(0,1)$ (GOLDSMITH, 2005) que permanece constante entre o processo de *sounding* e a transmissão de dados, porém varia entre *frames*. O ruído branco gaussiano é representado por $\mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, com variância $N_0/2$ por dimensão, onde N_0 é a densidade espectral de potência de ruído (GOLDSMITH, 2005). O vetor de sinal possui restrição de potência $P = E\{\mathbf{x}^* \mathbf{x}\}$. Então, é possível representar as perdas de percurso e sombreamento para uma distância d como (GOLDSMITH, 2005)

$$P_L [\text{dB}] = \mathcal{K} - 10\beta \log_{10}(d/d_0) - \psi_{\text{dB}}, \quad (2)$$

onde ψ_{dB} é uma variável aleatória com distribuição normal, média nula e variância σ_{dB}^2 , que representa os efeitos do sombreamento. β é o expoente de perda de percurso, \mathcal{K} é uma constante adimensional que depende das características do sistema, e d_0 é uma distância de referência. Conforme (GOLDSMITH, 2005), o valor de \mathcal{K} é algumas vezes obtido por

meio da fórmula da perda de percurso em espaço livre para a distância d_0 , portanto

$$\mathcal{K} [\text{dB}] = 20 \cdot \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d_0}, \quad (3)$$

onde λ é o comprimento de onda da portadora.

Por consequência, o AP necessita coordenar os usuários e antenas selecionadas com o objetivo de encontrar o melhor *throughput* e eficiência energética, geralmente envolvendo a técnica de *beamforming*, que permite criar canais de dados paralelos por meio de coeficientes de precodificação. Uma *stream* de dados para múltiplos usuários pode ser representada na forma de uma combinação linear dos dados a serem enviados e dos vetores de precodificação como (HUANG et al., 2013)

$$\mathbf{x} = \sum_{k \in K_R} \mathbf{w}_k \sqrt{p_k} s_k, \quad (4)$$

onde $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ é o vetor de *beamforming*, p_k é o fator de distribuição da potência, e s_k é o símbolo a ser enviado para o usuário k .

Desta forma, reescrevendo (1) com os fatores de precodificação, tem-se

$$y_k = (\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k \sqrt{p_k}) s_k + \sum_{i \in K_R, i \neq k} (\mathbf{h}_k \mathbf{w}_i \sqrt{p_i}) s_i + n_k. \quad (5)$$

A precodificação linear por meio do vetor de coeficientes \mathbf{w}_k pode ser considerada como projetar o vetor de canal \mathbf{h}_k na direção de \mathbf{w}_k (HUANG et al., 2013). Isso pode ser observado também considerando que a multiplicação de $\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k$ em (5) é interpretada como o produto interno entre os dois vetores

$$|\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k| = \|\mathbf{h}_k\| \|\mathbf{w}_k\| \cos(\theta), \quad (6)$$

onde θ é o ângulo formado entre o vetor de precodificação e o vetor de canal (XIE; ZHANG, 2014).

A Figura 2 apresenta um exemplo de precodificação com \mathbf{w}_k , a partir do canal visto pelo receptor \mathbf{h}_k e a projeção do vetor \mathbf{h}_k^p após a precodificação. Desta forma, quanto maior for o produto interno entre os vetores (quanto mais alinhados estiverem \mathbf{h}_k e \mathbf{w}_k), maior será a SNR no receptor k . Porém, para \mathbf{h}_k e \mathbf{w}_i quando $i \neq k$, o produto interno deve ser o mais próximo de zero, pois isto representa a projeção do canal \mathbf{h}_k nos canais dos outros receptores, ou seja, a interferência entre os usuários.

leva em conta a projeção do canal entre os outros usuários, gerando interferência quando aplicada a transmissões Multi-Usuário.

Utilizando a decomposição SVD (do inglês *Singular Value Decomposition*) é possível criar a técnica conhecida como *eigenbeamforming* (HOYDIS et al., 2012). Porém, como é retratado em (WANG; PING, 2011), as técnicas baseadas em SVD não eliminam a interferência entre os usuários para os casos Multi-Usuário, requerendo mais um passo de cancelamento sucessivo de interferência (do inglês *Successive Interference Cancellation* (SIC)).

Outra técnica comumente utilizada para calcular os coeficientes de precodificação é a *Zero-Forcing Beamforming* (ZFBF) (YOO; GOLDSMITH, 2006), que inverte a matriz de canal para criar canais ortogonais com os clientes. Desta forma, a matriz de *beamforming* é obtida como $\mathbf{W}=\mathbf{H}^\dagger$, onde $\mathbf{W}=[\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_k]$.

A técnica de ZFBF foi escolhida neste trabalho pelo seu comportamento de remover a interferência entre os usuários, e também por ser a técnica utilizada em (ANAND et al., 2015) para efeitos de comparação. Portanto para $i \neq k$, $\mathbf{h}_k \mathbf{w}_i$ pode ser desconsiderado, mesmo levando em conta erros de quantização (HUANG et al., 2013). Portanto

$$\mathbf{h}_k \mathbf{w}_i = \begin{cases} 1, & \text{se } k = i \\ 0, & \text{se } k \neq i \end{cases}. \quad (8)$$

Desta forma, o fator de multiplicação ($\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k \sqrt{p_k}$) em (5) pode ser considerado como o ganho efetivo de canal.

Para que os métodos de seleção de usuário possam ser simulados numa rede WLAN com técnicas MU-MIMO, alguns detalhes da camada física do padrão devem ser adicionados ao modelo. Na próxima seção são apresentados os conceitos necessários para estimar as taxas atingidas e a eficiência energética nos diferentes métodos de seleção de usuário.

2.2 PADRÃO 802.11AC

Com a adição de técnicas de MU-MIMO ao padrão 802.11ac, os protocolos de *feedback* do canal pelo usuário foram padronizados, diferente do que ocorreu no padrão 802.11n, onde técnicas de *beamforming* foram adicionadas, porém o processo para o transmissor obter a CSI ficou aberto para implementações dos fabricantes, gerando incompatibilidades no mercado.

Conforme (BEJARANO et al., 2013), clientes registrados em um AP do padrão 802.11ac (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2013) são distribuídos em canais de 20 MHz dentro da faixa de frequência, e os canais de 20 MHz podem ser combinados para aumentar o *throughput*, de forma a obter canais de 40, 80 e 160 MHz.

O AP utiliza técnicas de transmissão multi-portadora como OFDM (do inglês *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), onde os canais de cada usuário de 20 MHz são divididos em subportadoras, cada uma com uma largura de 312.5 kHz. A Tabela 1 apresenta a relação entre a largura de canal e a quantidade de subportadoras por canal. Esta informação está diretamente relacionada com o *overhead* de estimação de canal, pois o *feedback* da CSI contém as informações por subportadora, desta forma, quanto maior a largura de canal de cada usuário, maior será o tamanho dos dados de estimação de canal. Conforme (GAST, 2013), algumas subportadoras não são empregadas para transmissão, e são utilizadas apenas para obter o estado do canal.

Tabela 1 – Relação entre o número de subportadoras e largura de canal para o padrão 802.11ac.

Largura do Canal	Número de Subportadoras
20 MHz	52 subportadoras
40 MHz	108 subportadoras
80 MHz	234 subportadoras
160 MHz	486 subportadoras

Fonte: Adaptado de (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2013)

Em (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2012) são mencionadas duas técnicas principais de se obter os coeficientes de precodificação:

- **Beamforming Implícito:** Considera a reciprocidade entre os canais de *downlink* e *uplink*, então o AP estima o canal no *uplink* para todas as subportadoras e calcula os coeficientes com esta informação. Utilizando este método não é necessário o AP enviar os sinais piloto para o cliente estimar os coeficientes do canal e enviar a estimativa, porém há diferenças na fase e amplitude dos sinais recebidos/enviados devido às características de cada cadeia de recepção/transmissão que podem requerer compensações antes de realizar uma transmissão;
- **Beamforming Explícito:** Este é o processo considerado nesta dissertação, e mais comumente utilizado pelos fabricantes. O cliente deve estimar o vetor de canal \mathbf{h}_k em todas as subportadoras por meio de sinais piloto enviados pelo AP, e posteriormente

responder com o canal estimado. Após o AP receber a matriz de canal, ele a utiliza para calcular os coeficientes de precodificação.

O processo de *beamforming explícito* implica em um extenso *overhead* para cada *frame* a ser transmitido, já que os usuários devem retornar a matriz de canal quantizada para cada subportadora. As Figuras 3a e 3b apresentam esse processo para os casos de 2 e 3 usuários agrupados em um *frame*, respectivamente (ANAND et al., 2015). Inicialmente o AP envia um *Null Data Packet Announcement* (NDPA), que contém formas de onda de treinamento e os usuários selecionados para transmissão. A fase de *Null Data Packet* (NDP) contém os pilotos para que cada usuário estime seu canal. Na sequência, os usuários previamente selecionados enviam para o AP o *Compressed Beamforming Report* (CBFR), que corresponde ao vetor de canal \mathbf{h}_k quantizado e agrupado sobre múltiplas subportadoras (SUR et al., 2016). Após o recebimento e decodificação dos dados, cada cliente responde com ACK em bloco (do inglês *Block Ack* (BA)), reconhecendo os pacotes que foram recebidos corretamente.

O processo de compressão dos vetores de canal envolve a quantização para cada subportadora, e posteriormente o agrupamento entre elas. Conforme (YU; KIM, 2014), inicialmente o cliente normaliza a matriz de canal, e na sequência o vetor \mathbf{h}_k é representado em rotação de Givens, e os ângulos a serem enviados são descritos em (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2013). A decomposição em ângulos de Givens tem como objetivo reduzir o tamanho do *feedback* da matriz de canal. Após o AP receber os ângulos correspondentes, a operação inversa da rotação é realizada para obterem-se os coeficientes de canal.

Como o *overhead* depende do número de antenas, em alguns casos o modo de transmissão mais alto, que significa utilizar mais antenas de transmissão e/ou recepção nem sempre é a solução ótima. Ademais, o cliente pode aumentar a largura de banda de seu canal para aumentar a taxa, porém quanto maior for o número de subportadoras, o tamanho do *feedback* aumenta proporcionalmente. Desta forma, o tamanho em bits do CBFR é dado por

$$F_{\text{BF}} = n_s \cdot n_a \cdot n_q, \quad (9)$$

onde n_s é o número de subportadoras de acordo com a Tabela 1, n_a é o número de ângulos por subportadora, que varia de acordo com o modo de transmissão, e n_q é o número de bits por ângulo, de acordo com (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2013).

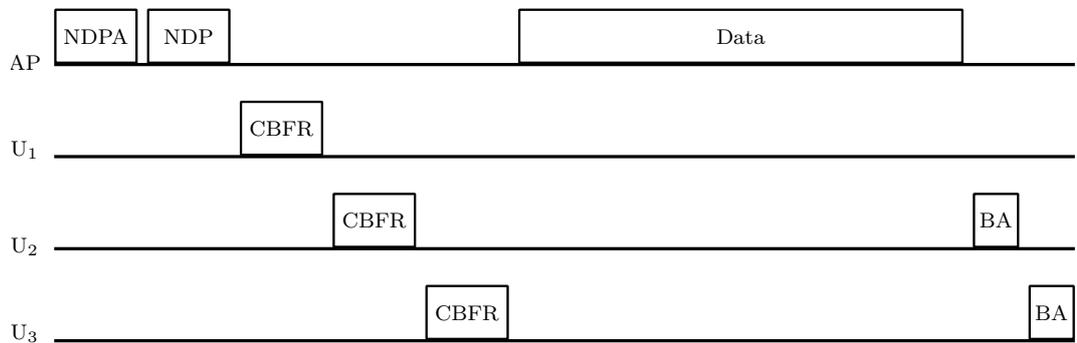
Desta forma é possível construir uma matriz que relaciona os modos de transmissão com o número de ângulos a serem enviados no *feedback*. Considerando que

Figura 3 – Processo de *sounding* no modo Multi-Usuário para uma transmissão com 2 e 3 usuários em paralelo.

(a) Processo de *sounding* no modo Multi-Usuário para 2 usuários.



(b) Processo de *sounding* no modo Multi-Usuário para 3 usuários.



Fonte: Adaptado de (ANAND et al., 2015)

o AP possui o máximo de antenas de transmissão $M_{\max} = 4$, obtém-se a seguinte matriz para os possíveis modos de transmissão $[M, K]$:

$$\mathbf{N}_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 \\ 4 & 6 & 6 & 0 \\ 6 & 10 & 12 & 12 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

onde as linhas representam a quantidade de antenas de transmissão M , e as colunas representam a quantidade de *streams*. Observa-se que os casos em que $K \geq M$ apresentam valor nulo por não ser possível criar mais *streams* paralelos do que o número de antenas de transmissão.

Considera-se que o *feedback* F_{BF} descrito em (9) é enviado na modulação mais simples (MCS0), para diminuir a probabilidade de erro. Para exemplificar o aumento do *overhead* com M e K , abaixo é apresentado a quantidade de *feedback* para os modos $[3, 3]$ e $[4, 3]$ para um canal de 80 MHz, com 16 bits por ângulo e sem agrupamento de

subportadoras

$$F_{\text{BF}}^{[3,3]} = 234 \cdot 6 \cdot 16 = 22,464 \text{ kbits}, \quad (11)$$

$$F_{\text{BF}}^{[4,3]} = 234 \cdot 12 \cdot 16 = 44,928 \text{ kbits}. \quad (12)$$

Porém, reduzindo o modo de transmissão para [2,2], com um canal de 20 MHz, obtém-se

$$F_{\text{BF}}^{[2,2]} = 52 \cdot 2 \cdot 16 = 1,664 \text{ kbits}. \quad (13)$$

Observa-se que o modo de transmissão causa grande influência no tamanho do *feedback*, no caso de aumentar o número de antenas de transmissão de 3 para 4 para $K = 3$ causa um aumento de 100% no tamanho da resposta, porém pode ser viável adicionar mais uma antena de transmissão para aumentar a SNR no cliente, desta forma enviando os dados com modulações mais eficientes. Quando a quantidade de pacotes a serem enviados é menor, utilizar modos de transmissão menores, como [2,2] pode ser interessante, pois é possível aproveitar as vantagens de múltiplas *streams* espaciais com um *overhead* menor.

O padrão 802.11ac apresenta a relação entre a SNR do usuário e a MCS (*Modulation and Coding Scheme*) para uma taxa de recepção de pacotes de 90%. A Tabela 2 apresenta uma parte desta relação, enquanto a versão completa pode ser encontrada em (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2013). Observa-se que SNRs mais altas suportam taxas mais altas, aumentando a eficiência do canal.

Tabela 2 – Relação entre MCS e a SNR mínima para 10% PER.

MCS	Rate	SNR(dB)	MCS	Rate	SNR (dB)
0	BPSK _{1/2}	1.1	5	64-QAM _{2/3}	17.2
1	QPSK _{1/2}	4.1	6	64-QAM _{3/4}	18.4
2	QPSK _{3/4}	6.7	7	64-QAM _{5/6}	19.7
3	16-QAM _{1/2}	9.6	8	256-QAM _{3/4}	23.9
4	16-QAM _{3/4}	12.8	9	256-QAM _{5/6}	25.5

Fonte: Adaptado de (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2013)

Conforme os autores em (ANAND et al., 2015), um grupo selecionado para transmitir um *frame* deve obrigatoriamente conter usuários com a mesma largura de canal. Desta forma, para as simulações realizadas é considerado que os usuários todos possuem uma largura de canal de 20 MHz, portanto, o número de subportadoras torna-se constante em (9).

A partir de (9) obtém-se o tamanho das respostas com as estimativas dos canais pelos clientes. Conforme (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2013), somente os dados

são enviados com a modulação correspondente à SNR, enquanto o *overhead* é enviado com a modulação mais simples (MCS0) para diminuir a probabilidade de erros. Desta forma, é possível completar uma matriz de modos com os valores de *overhead* em *ms* por *frame*, obtidos com base em (9)

$$\mathbf{T}_{\text{OH}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4054 & 0.5771 & 0 & 0 \\ 0.4109 & 0.6099 & 0.7986 & 0 \\ 0.4136 & 0.6263 & 0.8478 & 1.0534 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

O índice MCS deve ser escolhido de acordo com a SNR correspondente para o que receptor consiga decodificar os dados corretamente. Caso o canal experimente um ganho instantâneo baixo no momento de envio, o receptor não irá conseguir decodificar os dados. Desta forma, estimativas com MCS mais elevadas que o estado instantâneo do canal são penalizadas com pacotes sem confirmação de recebimento (NACK). Além de relacionar a perda de pacotes com a SNR e o índice MCS utilizado, o modelo de eficiência energética é importante para definir as vantagens de utilizar técnicas de diversidade na recepção, e se alguma técnica apresenta-se mais eficiente do que outra utilizando diferentes MCS.

2.2.1 Modelo de consumo de energia

Como demonstrado em (PERON et al., 2018), o consumo do circuito de RF é relevante em uma transmissão de um *frame*. Desta forma, o consumo não depende somente da potência de transmissão P , mas de outros blocos dos circuitos de transmissão e recepção que possuem não-linearidades. Ademais, conforme (BENALI et al., 2016), há também o consumo adicional devido ao processamento dos sinais recebidos, que aumenta conforme modulações mais complexas são utilizadas. A Tabela 3 demonstra a relação entre a potência adicional nos blocos de recepção/transmissão e o índice MCS para a largura de banda de 20 MHz.

Tabela 3 – Relação entre a potência adicional nos blocos de RF durante a recepção/transmissão e o índice MCS.

MCS	P_{TX} [mW]	P_{RX} [mW]
MCS 1	15	72
MCS 2	25	99
MCS 5	61	208
MCS 8	113	333

Fonte: Adaptado de (BENALI et al., 2016)

Durante a transmissão de um *frame* do padrão 802.11ac, existem fases onde o AP ou o cliente transmite. Utilizando o modelo de consumo de (PERON et al., 2015), é possível representar o consumo durante uma transmissão do AP como

$$\mathcal{P}_{\text{AP}}(M, K, k) = (1 + \delta)P + MP_{\text{TX}} + \sum_{k=1}^{K_{\text{R}}} N_k P_{\text{RX}}, \quad (15)$$

onde δ representa o consumo adicional no amplificador devido às não-linearidades. P_{TX} e P_{RX} representam o consumo da cadeia RF no transmissor e receptor, respectivamente. Observa-se que a potência \mathcal{P}_{AP} depende de três variáveis, M e K representam o modo de transmissão, e a potência cresce com o aumento do número de antenas, pois existem mais circuitos de transmissão e recepção. A dependência com os usuários k que estão recebendo ocorre pois estes possuem diferentes quantidades de antenas N_k , implicando em mais cadeias de recepção recebendo dados. Para representar o consumo durante uma transmissão do cliente, utiliza-se

$$\mathcal{P}_{\text{U}} = (1 + \delta)P + P_{\text{TX}} + M_{\text{max}}P_{\text{RX}}, \quad (16)$$

neste caso considera-se que cliente transmite com uma antena, e o AP recebe com M_{max} antenas.

Desta forma, o consumo total de um *frame* é expresso pelo somatório das potências na fases de transmissão do AP e do cliente, multiplicado pelos respectivos tempos em cada fase

$$E_{\text{frame}} = \sum_{\text{ACP}} \mathcal{P}_{\text{AP}} \cdot t_{\text{AP}} + \sum_{\text{U}} \mathcal{P}_{\text{U}} \cdot t_{\text{U}}, \quad (17)$$

onde $\text{AP} \in \{\text{NDPA}, \text{NDP}, \text{Data}\}$ e $\text{U} \in \{\text{CBFR}, \text{BA}\}$, são as fases em que o AP e o cliente transmitem, respectivamente, conforme Figura 3. Os tempos t_{AP} e t_{U} são estimados de acordo com (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2013), considerando que o *overhead* é enviado com a taxa mais baixa (MCS0), e os dados são enviados com o MCS correspondente à SNR.

Finalmente, a eficiência energética pode ser definida como

$$\text{EE} = b_{\text{s}}/E_{\text{frame}}, \quad (18)$$

onde b_{s} representa a quantidade de bits recebidos com sucesso.

2.3 MÉTODOS DE SELEÇÃO DE USUÁRIO

Agrupar os usuários de forma correta é importante, pois implica diretamente na capacidade instantânea do canal. Transmitir para usuários que de forma natural possuem canais descorrelacionados pode aumentar a SNR na recepção, enquanto criar uma matriz de canal com canais semelhantes implica em interferência entre os usuários. Além do grupo correto, a quantidade de pacotes a serem transmitidos deve ser levada em conta, pois filas de pacotes diferentes significam tempos de transmissão diferentes. Os algoritmos de seleção de usuário utilizam as informações da camada PHY e da camada MAC para encontrar um grupo de transmissão para o próximo *frame*. Na próxima seção é demonstrado o método ótimo de seleção com base na capacidade, que analisa todas as combinações e encontra o melhor grupo.

2.3.1 Busca Exaustiva

A busca exaustiva (do inglês *Brute Force Search* (BFS)) tem como objetivo encontrar a combinação de usuários que apresente a maior taxa, a partir das diversas combinações de grupos de usuários e filas de pacotes, e quando utilizada ocorre após a obtenção da CSI de todos os usuários. A SINR de cada cliente é calculada com base em (7) para cada usuário k , e as possibilidades de agrupamento são calculadas para encontrar a maior taxa.

Desta forma, é realizada uma busca exaustiva dentre os usuários selecionados para transmissão e que enviaram os coeficientes de canal de forma a encontrar a combinação que maximize o *throughput*. Dependendo do número de usuários na rede, esta operação pode tornar-se inviável para a capacidade de processamento dos APs atuais, além de que avaliar todas as combinações para cada transmissão pode implicar em aumento da latência da rede. De acordo com (YOO; GOLDSMITH, 2006) o número de combinações para a busca exaustiva pode ser obtido por

$$c_{\text{BFS}} = \sum_{i=1}^{M_{\text{max}}} \binom{K_{\text{max}}}{i}. \quad (19)$$

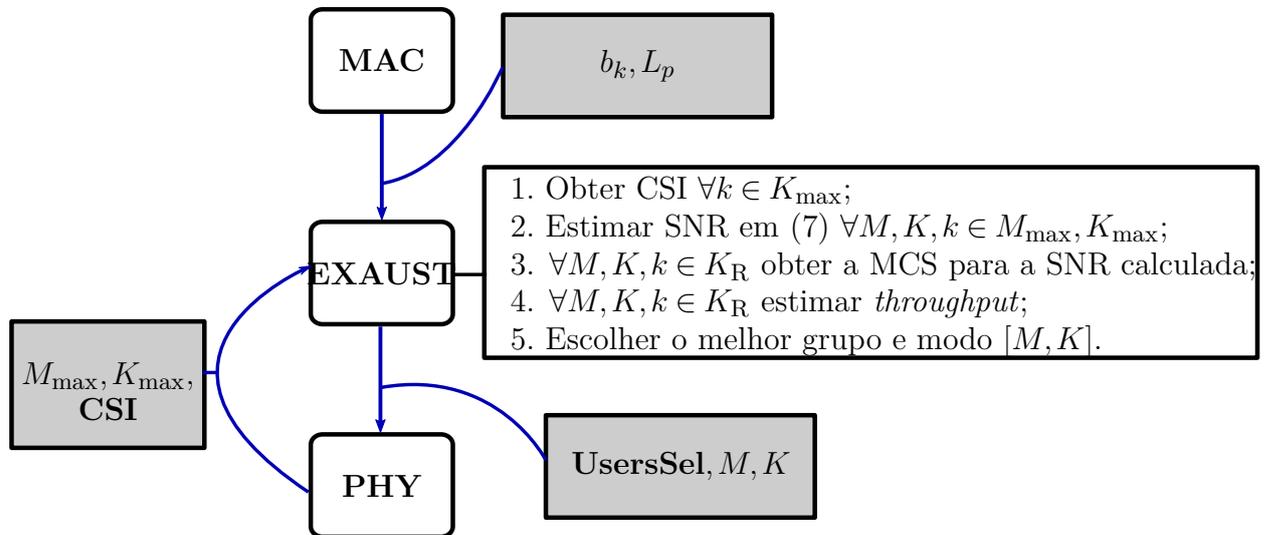
Considerando os casos abordados no documento, por exemplo, onde $K_{\text{max}}=8$ e $M_{\text{max}}=4$, obtém-se a seguinte quantidade de combinações

$$c_{\text{BFS}} = \binom{8}{1} + \binom{8}{2} + \binom{8}{3} + \binom{8}{4} = 8 + 28 + 56 + 70 = 162. \quad (20)$$

Portanto, para poucos usuários, realizar a busca exaustiva é possível. Porém, para casos em que o AP possui $K_{\max}=100$ e $M_{\max}=4$ mais de 4×10^6 combinações são geradas. Realizar a busca exaustiva da capacidade por meio de todas as combinações torna-se inviável, devido ao esforço computacional necessário e requisitos de latência da rede, pois o processamento de cada combinação requer estimar os coeficientes de precodificação, implicando em calcular uma matriz inversa para cada combinação. Além de exigir o conhecimento do canal de cada usuário.

A Figura 4 apresenta um diagrama do funcionamento da busca exaustiva com as outras camadas do padrão. Observa-se que um requisito para realizar a busca exaustiva é que a camada PHY obtenha a CSI do canal, que implica em um *overhead* elevado. Além disso, avaliar todas as combinações de usuários implica na inversão da matriz de canal para cada combinação, estimativa de SINR, conversão para MCS e estimativa da taxa atingida.

Figura 4 – Diagrama do funcionamento da busca exaustiva em conjunto com outras camadas do padrão 802.11ac.



Fonte: Elaborado pelo autor

Desta forma, algoritmos simplificados tentam utilizar propriedades da teoria MIMO, ou requisitos de QoS para limitar o espaço de busca. As soluções simplificadas tratadas na sequência incluem o algoritmo PUMA e o modo de seleção fixo, onde a escolha do grupo de usuários para transmissão é obtido de forma aleatória.

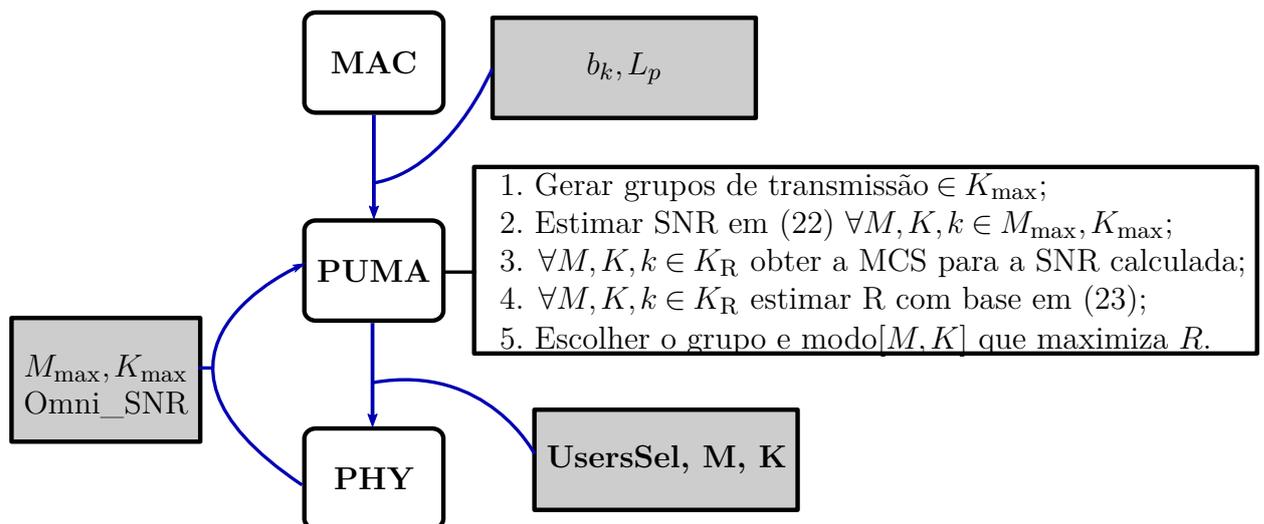
2.3.2 PUMA

O algoritmo do PUMA tem a grande vantagem de conseguir estimar um grupo de transmissão otimizado antes da realização do processo de *sounding* do canal. Para isso, o PUMA utiliza as seguintes informações:

- Quantidades de antenas disponíveis (M_{\max}) para transmissão e recepção (K_{\max});
- Quantidade de pacotes b_k por usuário;
- A SNR omnidirecional, que permanece constante por mais tempo para cada cliente.

Observa-se que o PUMA possui diversas vantagens, dentre elas o aproveitamento da diversidade multi-usuário, considerando que estejam separados espacialmente, seus canais apresentarão diferentes desvanecimentos, desta forma aumenta a probabilidade de que em determinado tempo um canal esteja mais favorável para transmissão. Além disso, o PUMA utiliza apenas informações escalares disponíveis antes do processo de estimação do canal. A Figura 5 apresenta um diagrama com o funcionamento do PUMA em conjunto com o padrão 802.11ac.

Figura 5 – Diagrama do funcionamento do PUMA em conjunto com outras camadas do padrão 802.11ac.



Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando que a alocação de potência é igual para todos os clientes, os fatores $\sqrt{p_k}$ no ganho efetivo de canal tornam-se constantes em (5), de forma que $\forall k, \sqrt{p_k} = 1/M$. Em vista disso, considerando o ganho efetivo do canal, a potência de transmissão e as

perdas em larga escala, a SNR para o usuário k é:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{(P \cdot P_L)/(N_0 B)}{M} (\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k) \right), \quad (21)$$

onde P é a potência de transmissão do AP. Desta forma, quanto mais *streams* paralelas o AP cria, o número de antenas de transmissão (M) cresce proporcionalmente e a SNR por usuário diminui, pois a potência de transmissão é dividida entre as antenas de acordo com (21).

De forma geral, o objetivo do PUMA é encontrar uma combinação de usuário/antena que leve ao *throughput* máximo, levando em conta o *overhead* de *sounding* e a estimativa de SNR de cada usuário. Porém, estimar a SNR em (21) implica em obter a CSI de todos os usuários, gerando um *overhead* ainda maior.

Em (ANAND et al., 2015) é apresentado que os fatores $(\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k \sqrt{p_k})$ seguem uma distribuição Erlang se o canal entre os usuários é Rayleigh, dependendo do tamanho da matriz \mathbf{H} , tendo uma média $(M - K + 1)/K$. Desta forma, substituindo o ganho efetivo de canal por sua média em (21), obtém-se a equação chave de estimativa do PUMA

$$E \{ \text{SNR} \} = 10 \log_{10} \left(\frac{M - K + 1}{K} \cdot \frac{(P \cdot P_L)/(N_0 B)}{M} \right), \quad (22)$$

onde o PUMA busca o maior *throughput*

$$R = \frac{L_D}{T_{\text{OH}} + T_D} \quad (23)$$

para todas as possíveis combinações entre os K usuários, quantidade de pacotes b_k e modo de transmissão $[M, K]$, onde a quantidade de dados a ser enviado é

$$L_D = \sum_{k \in K} b_k \cdot L_p, \quad (24)$$

com L_p como o tamanho máximo de pacote.

Além disso, (T_{OH}) em (23) é definido como

$$T_{\text{OH}} = T_S + T_{\text{CF}} + T_{\text{ACK}}, \quad (25)$$

onde $T_i \in \{S, \text{CF}, \text{ACK}\}$ são o tempo de *sounding*, *feedback* de *beamforming* e ACK do receptor, respectivamente. Finalmente, o tempo de transmissão dos dados é definido por

$$T_D = \frac{\max(b_k \cdot L_p)}{r_k}, \quad (26)$$

onde r_k é a taxa do usuário k para sua respectiva MCS, conforme Tabela 2.

Apesar de o PUMA ser um método de seleção simplificado, os resultados apresentados em (ANAND et al., 2015) mostram que utilizar o PUMA implica em redução de apenas 3% em taxa, comparado com o método de busca exaustiva. A seguir é apresentado o método fixo de seleção de usuário, que será utilizado para comparar os resultados do PUMA.

2.3.3 Modo Fixo

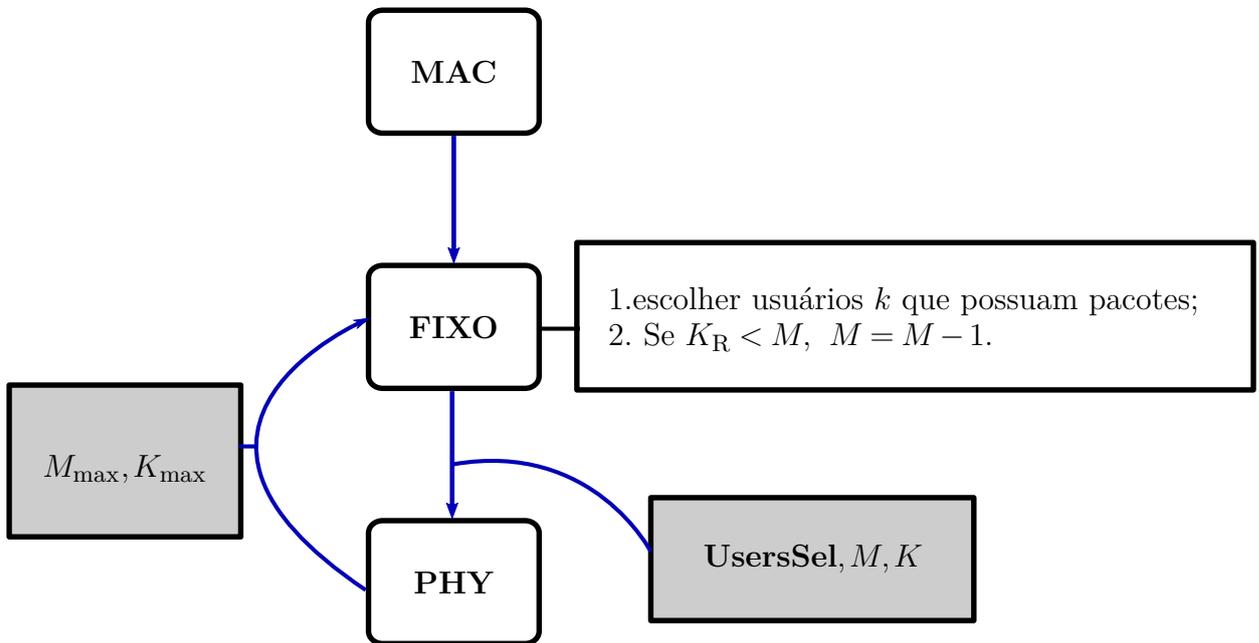
O modo de seleção de usuário fixo não possui nenhum algoritmo para agrupar os clientes. Desta forma, antes de iniciar a transmissão do *frame*, o AP verifica todos os usuários em sua lista que possuem pacotes a receber, e os agrupa com o modo máximo de transmissão M_{\max} . A partir de então, sorteia aleatoriamente um índice da lista de usuários agrupados. Em caso de o número de usuários com pacotes a receber ser menor que o modo de transmissão M , as antenas de transmissão são reduzidas até encontrar um grupo de transmissão compatível com o número de *streams* paralelos.

Em caso positivo, o processo de estimação de canal para os usuários selecionados é realizado. Após a recepção do *feedback*, o AP forma a matriz de canal, estima a SNR com base em (7), e o MCS correspondente de cada usuário.

Este método possui desvantagens, pois observando as estimativas do PUMA em (23)-(26), quando usuários com quantidades de pacotes diferentes são agrupados, a transmissão torna-se ineficiente devido à diferença entre os tempos T_D . Além disso, escolher usuários aleatoriamente pode selecionar usuários com canais que estejam correlacionados de alguma forma, gerando uma matriz de canal mal-condicionada, ou seja, além de o ganho efetivo de canal ($\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k \sqrt{p_k}$) em (5) ser menor, pode causar interferência entre os usuários.

Na Figura 6 é apresentado um diagrama com as variáveis informadas em cada etapa do processo de transmissão no AP, observa-se que o modo fixo é mais simplificado que os outros métodos, pois o grupo de transmissão é escolhido de forma aleatória, utilizando apenas a informação da quantidade de antenas de transmissão e recepção.

Figura 6 – Diagrama do funcionamento do Modo Fixo em conjunto com outras camadas do padrão 802.11ac.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na sequência é descrita a otimização realizada no algoritmo PUMA para que possa aproveitar melhor os ganhos obtidos com diversidade na recepção.

2.4 PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Pode ser visto de (23)-(26) que a combinação de usuários pode causar grandes mudanças na taxa da rede. Selecionar clientes com poucos pacotes b_k pode aumentar o *overhead* T_{OH} sem aumentar significativamente L_D . Ademais, (26) demonstra que T_D depende somente do usuário mais lento para enviar seus pacotes. Desta forma, o PUMA realiza uma busca exaustiva num espaço de busca com objetivo de maximizar R em (23).

Para evitar que o PUMA realize uma busca exaustiva em todas as combinações, é possível criar métricas para limitar o espaço de busca, como quantidade mínima de pacotes a serem transmitidos, tempo do pacote na fila de transmissão, dentre outros. Conforme o espaço de busca aumenta, as combinações ficam mais complexas, porém ter mais usuários para combinar pode ser interessante, pois há mais probabilidade de encontrar canais com SNR instantânea melhor. Além disso, é possível combinar usuários que possuem canais melhores no momento juntamente com clientes mais robustos que possuem múltiplos receptores utilizando técnicas de diversidade.

Adicionar diversidade aos usuários tem como objetivo criar diferentes percursos para o sinal, desta forma cada percurso possui coeficientes de desvanecimento independentes. Isso implica em ganhos de SNR que podem ser utilizados para aumentar o índice de modulação e conseguir enviar os dados com um tempo menor. Com a adição da diversidade, o modelo de estimativa do PUMA foi estendido com base em (GOLDSMITH, 2005), onde são retratados os ganhos de SNR para cada tipo de diversidade implementado.

Desta forma, a partir das informações de SNR omnidirecional das múltiplas antenas de um cliente, é possível estimar a SNR obtida após a combinação dos sinais de cada receptor. Para diversidade SC, o PUMA estima a SNR obtida após a combinação dos sinais por meio de

$$\gamma_{\Sigma} = \bar{\gamma} \sum_{i=1}^N \frac{1}{i}, \quad (27)$$

onde γ_{Σ} é a SNR obtida com o ganho de diversidade, $\bar{\gamma}$ é a SNR média de todas as antenas do cliente e N é o número de antenas de recepção de cada cliente. (GOLDSMITH, 2005)

Para a diversidade MRC, o ganho em SNR médio após a combinação dos sinais por diferentes percursos é dada por (GOLDSMITH, 2005)

$$\gamma_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \gamma_i. \quad (28)$$

Desta forma, a partir dos valores de SNR das duas antenas do receptor que são atualizadas a cada *frame*, é possível estimar qual será a SNR para a combinação das antenas e conseqüentemente a taxa a ser utilizada para a transmissão dos dados. A estimativa de ganho de SNR devido à diversidade implica na adição de mais uma etapa no algoritmo do PUMA, que é realizada após a definição do espaço de busca, com base em (27) e (28).

3 ANÁLISE NUMÉRICA

Para as simulações, considera-se uma WLAN conforme Figura 1 com $K_{\max} = 8$ usuários para comparar os resultados com (ANAND et al., 2015), e um AP com $M_{\max} = 4$ antenas. Três simulações foram consideradas, denotadas por *Modo Fixo*, *Modo PUMA* e *Busca Exhaustiva*, que são os métodos de seleção de usuário abordados neste trabalho.

As simulações são baseadas no conceito de taxa de geração de dados, *throughput* agregado, e *throughput* de saturação. A taxa de geração de dados é definida como pacotes gerados por unidade de tempo, dado em bits por segundo e seguindo uma distribuição de Poisson em cada nó da rede. *Throughput* agregado representa o tráfego de dados recebidos com sucesso na rede. *Throughput* de saturação é definido como a taxa de dados atingida quando o *throughput* agregado não aumenta mais com o aumento da carga oferecida.

A potência de transmissão do AP é 100 mW (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2013), a frequência da portadora é de 5.1 GHz, a largura de banda é de $B = 20$ MHz e um ambiente com perda de percurso $\beta = 2.5$ (GOLDSMITH, 2005) é considerado. Assume-se uma densidade espectral de potência de ruído $N_0 = -174$ dBm/Hz, de acordo com (PERON et al., 2018).

Os valores de perdas e não linearidades na transmissão são utilizados com base em (PERON et al., 2018; BENALI et al., 2016), e um fator de consumo adicional $\delta = 1.86$. Cada usuário é posicionado à uma distância $d_k = 10$ m. Cada transmissão pode agregar o máximo de 64 pacotes, cada um com o tamanho de 1500 bytes. Para a simulação do PUMA, a seleção de usuário é realizada a cada 100 ms, com os dados de SNR sendo obtidos dos últimos 5000 pacotes.

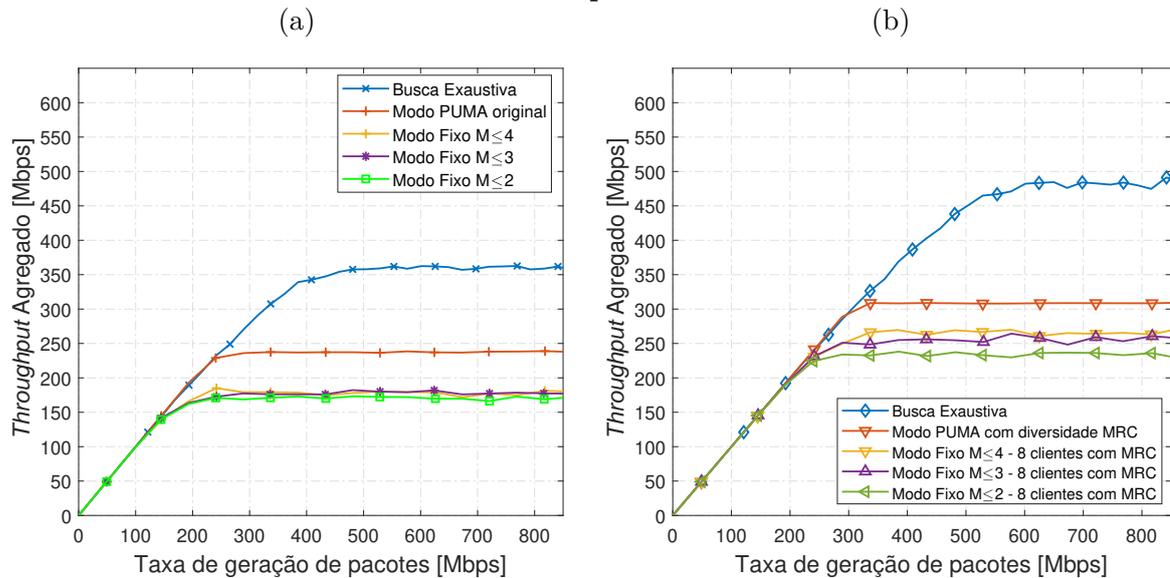
Para avaliar o *throughput* agregado da busca exaustiva, o *overhead* utilizado é o do modo de transmissão escolhido após obter a CSI de todos os usuários, para que seja realizada uma comparação mais justa com os outros algoritmos. Caso o *overhead* de estimar todos os canais fosse considerado, a busca exaustiva não apresentaria bom desempenho, tanto em taxas menores quanto no regime de saturação.

A Figura 7a apresenta o *throughput* agregado em função da carga oferecida para a busca exaustiva, Modo PUMA e Fixo, com um número máximo de $K_R = 4$ *streams* paralelas. É possível observar que o PUMA atinge um *throughput* de saturação maior quando comparado com o modo fixo para o mesmo número de *streams* paralelas. Além disso, quando todos os usuários possuem múltiplas antenas utilizando MRC, o *throughput*

de saturação do PUMA é mais positivamente influenciado pela diversidade na recepção, como observado na Figura 7b. Neste exemplo em particular, o algoritmo do PUMA obteve 167% de ganho em relação ao caso sem diversidade, enquanto o modo Fixo obteve apenas 67% de melhoria, porém adicionar diversidade ao Modo Fixo apresentou resultados melhores em saturação do que o PUMA original.

O algoritmo da busca exaustiva atingiu taxas maiores em comparação aos outros métodos de seleção, desta forma, comprova-se que o PUMA não consegue prever todos os comportamentos do canal, já que ele trabalha apenas com a SNR Omnidirecional. Portanto, a busca exaustiva consegue atingir taxas maiores pois consegue estimar quais canais estão mais aptos para a transmissão de forma instantânea.

Figura 7 – Comparação entre modos PUMA e Fixo sem diversidade e adicionando todos os usuários com diversidade MRC para $N = 2$.

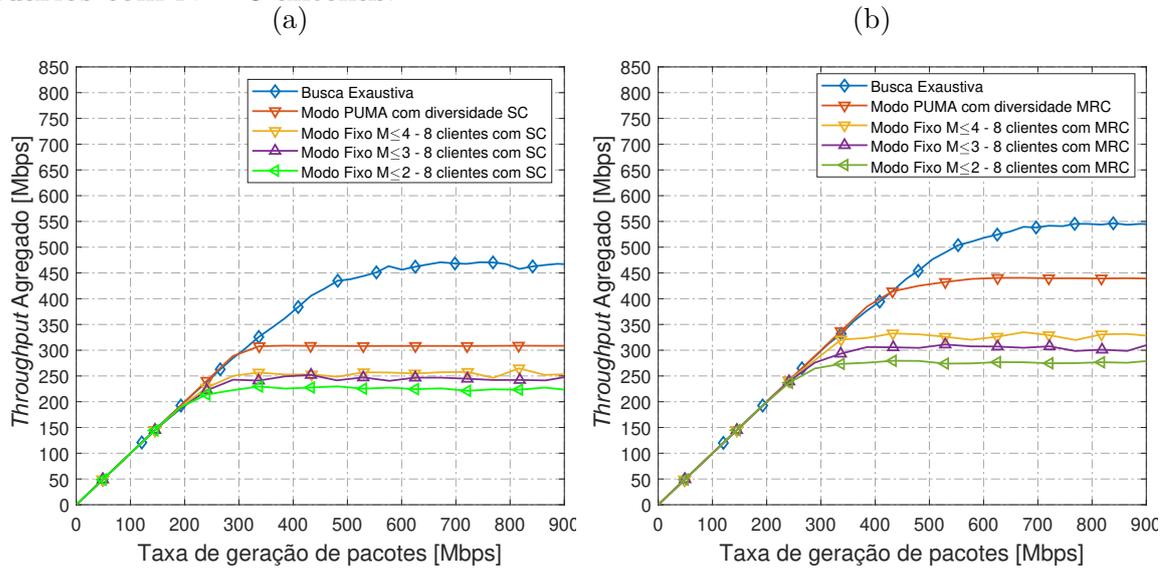


Fonte: Elaborado pelo autor

Esse resultado pode ser explicado considerando o fato que o Modo Fixo tem uma alta probabilidade de selecionar um usuário com taxas menores, que aumenta T_D em (26) e reduz o *throughput* da rede. Para verificar essa hipótese, foram realizadas simulações considerando que os nós possuem 3 antenas de recepção, cujos sinais recebidos são combinados com técnicas de diversidade. As Figuras 8a e 8b apresentam os resultados para diversidade SC e MRC, respectivamente.

Uma investigação mais profunda sobre o impacto do uso de múltiplas antenas para diferentes modos e diversidades é apresentado na Figura 9, onde *throughput* de saturação é avaliado para MRC e SC, e o modo Fixo é apresentado para todos os casos

Figura 8 – Comparação dos modos PUMA e Fixo com diversidade utilizando usuários com $N = 3$ antenas.



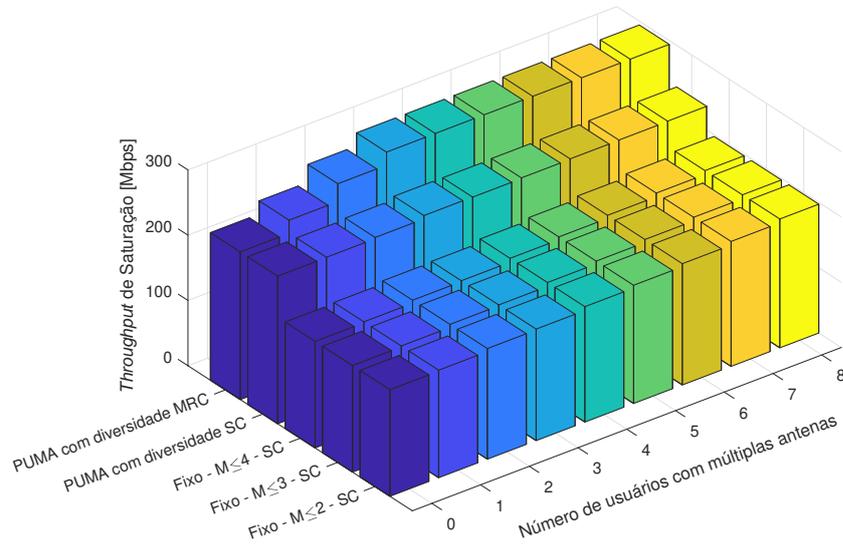
Fonte: Elaborado pelo autor

de máximo número de *streams*, variando de 0 a K . Este resultado apresenta novamente que os ganhos de diversidade são acentuados quando o PUMA é utilizado, considerando que o modo Fixo não possui nenhuma estratégia para evitar o agrupamento de usuários com grandes diferenças no T_D . Por outro lado, o PUMA consegue combinar usuários com uma antena que possuem uma SNR instantânea mais elevada com clientes que possuem um canal melhor em virtude da diversidade.

A eficiência energética do PUMA utilizando ambos MRC e SC é apresentada na Figura 10 quando usuários aplicam diversidade com duas antenas ($N = 2$). É possível observar que MRC apresenta os melhores resultados, mesmo utilizando mais cadeias RF. Esse comportamento é devido ao fato de que receptores MRC possuem uma SNR média maior, permitindo utilizar modulações mais complexas, desta forma enviando os dados mais rápido no ar. Ademais, outra observação é que aumentando os usuários com múltiplas antenas não aumenta a eficiência energética no regime de saturação. Além disso, utilizar diversidade SC com duas antenas apresentou um ganho de 12% em relação ao caso sem diversidade, enquanto para diversidade MRC os ganhos são de aproximadamente 32%.

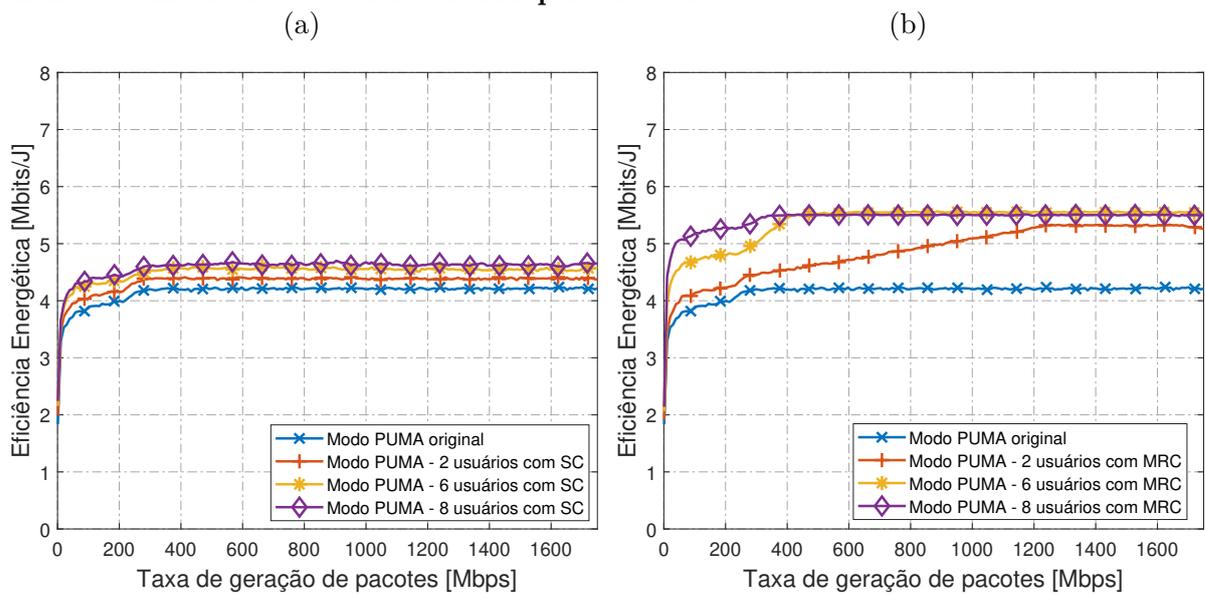
Para verificar o comportamento da eficiência energética em casos em que o cliente utiliza técnicas de diversidade com mais antenas, a Figura 11 apresenta os resultados para $N = 3$, ou seja, três antenas são combinadas no receptor com técnicas de diversidade.

Figura 9 – *Throughput* de saturação para os modos PUMA e Fixo aumentando o número de clientes com diversidade para $N = 2$.



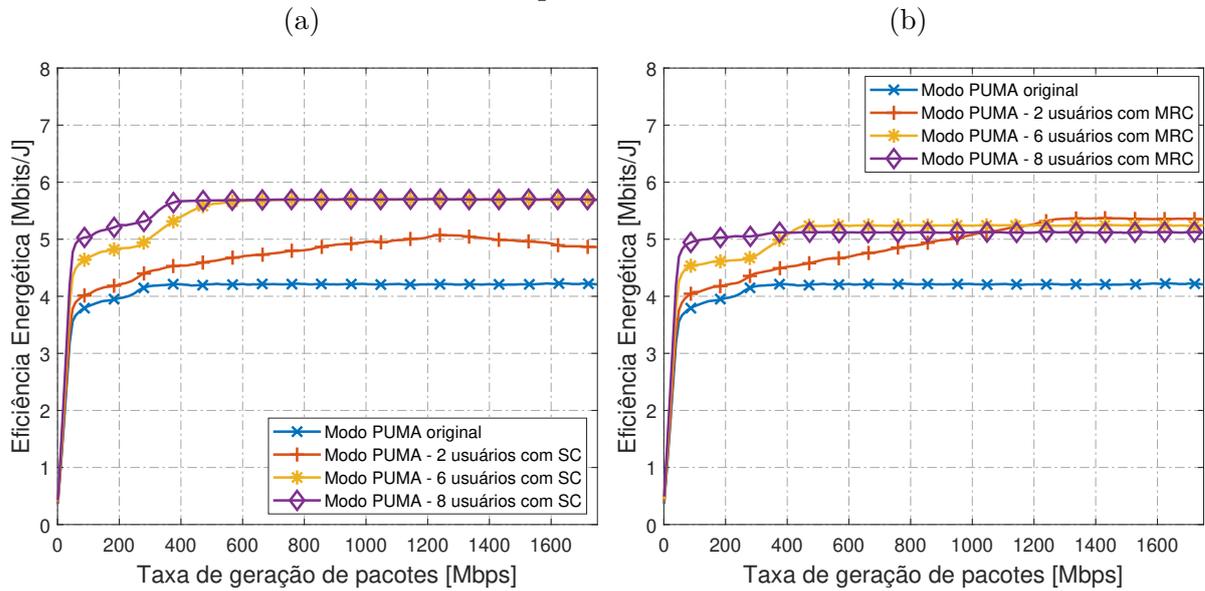
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10 – Eficiência energética do PUMA comparando diferentes números de clientes com diversidade SC e MRC para $N = 2$.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11 – Eficiência energética do PUMA comparando diferentes números de clientes com diversidade SC e MRC para $N = 3$.



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que adicionar três antenas de recepção aumentou a eficiência para diversidade SC além da eficiência obtida com MRC para a mesma quantidade de antenas de recepção. O consumo de energia causado pelas cadeias de recepção ligadas simultaneamente tornou o MRC com três antenas de recepção menos eficiente do que MRC com duas antenas. Desta forma, dependendo dos recursos do cliente, utilizar três antenas de recepção com diversidade SC pode ser vantajoso, pois é o método mais simples, já que necessita apenas uma cadeia de RF ligada na recepção. Ademais, para certos valores de taxa de geração de dados, a quantidade de usuários com diversidade MRC não causa aumento na eficiência energética, ou seja, é melhor utilizar apenas dois usuários com diversidade MRC neste caso. A partir de 1200 Mbps, por exemplo, uma rede com 2 usuários com diversidade MRC é mais eficiente do que 6 ou 8 clientes com MRC. Do ponto de vista de eficiência energética, utilizar diversidade SC é mais vantajoso para este caso.

4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho o algoritmo de seleção de usuário PUMA numa simulação de rede WLAN 802.11ac com diversidade na recepção foi avaliado. A análise do trabalho baseia-se no *throughput* de saturação e na eficiência energética, demonstrando que um algoritmo de seleção de usuário como o PUMA é essencial para aproveitar os ganhos obtidos com a diversidade. Os resultados apresentaram que o Modo Fixo consegue melhorar o *throughput* da rede em 29%, enquanto o PUMA pode apresentar 35% de ganho em *throughput*. Ademais, a análise de eficiência energética apresentou um viés alternativo sobre os esquemas de diversidade em redes MU-MIMO: embora o consumo com diversidade MRC seja maior que do SC, a eficiência energética possui uma dependência com a quantidade de usuários com diversidade na rede, número de antenas aplicando diversidade, e a taxa de geração de dados.

Outros resultados na área, como (PERON et al., 2015) apontam SC como a técnica mais eficiente do que MRC, porém, neste caso como diferentes índices de modulações são considerados na simulação, o compromisso entre quantidade de antenas de recepção, técnicas de diversidade e tráfego da rede torna-se mais complexo. Porém, em todos os casos aplicar diversidade na recepção aumentou a eficiência da rede.

A respeito do número de usuários com múltiplas antenas, a análise demonstra que a melhor opção depende da carga oferecida média pela rede. Em baixas taxas, o AP se beneficia dos usuários com diversidade, enquanto sistemas com saturação elevada conseguem atingir a mesma eficiência energética com menos usuários com diversidade.

O trabalho pode ser estendido para uma análise de outros métodos de seleção de usuário, como (KARMAKAR et al., 2019; SUR et al., 2016; DU et al., 2015; SHEN et al., 2015), onde diferentes técnicas de estimativa do melhor grupo de transmissão são apresentadas. Ademais, uma comparação de métricas como razão de perda de pacotes (do inglês *Packet Loss Ratio*(PLR)) e tempo médio para enviar pacotes dos resultados de (KARMAKAR et al., 2019) e (ANAND et al., 2015) ainda necessita ser realizada.

Um dos grandes aprimoramentos do padrão 802.11ax (IEEE STANDARD ASSOCIATION, 2018) envolve estender a técnica de OFDM para incluir alocação de usuários no domínio da frequência, conhecido como OFDMA (do inglês *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Multiple-Access*). Adicionar técnicas de alocação de subportadoras por usuário pode apresentar resultados relevantes.

Adicionar critérios de *scheduling* como os apresentados em (KIM et al., 2004) nos algoritmos de (ANAND et al., 2015; SUR et al., 2016; DU et al., 2015; SHEN et al., 2015) pode melhorar o desempenho da rede, já que essas implementações são baseadas no grupo de transmissão ótimo, pode ocorrer que grupos menos favorecidos tenham atrasos grandes para receber seus pacotes. Somente em (KARMAKAR et al., 2019) é que critérios de tempo médio de pacote são adicionados.

Ademais, a estimativa de SNR do algoritmo PUMA foi baseada em canais com distribuição Rayleigh sendo que os canais dos clientes são independentes entre si, e a resposta do PUMA para outras distribuições pode apresentar conclusões relevantes.

Enquanto o PUMA simplifica a alocação de potência de forma igual para todos os usuários no grupo de transmissão, em (LIN et al., 2017) é apresentado um algoritmo que utiliza alocação de potência diferente para cada usuário de acordo com os pacotes a serem enviados para igualar os tempos de transmissão dos dados. Em altas taxas, onde todos os usuários possuem grandes filas de pacotes a enviar, esse fator pode não ser tão relevante quanto no caso com poucos pacotes, onde alocar potência para cada cliente em específico pode aumentar a eficiência espectral, pois diminui consideravelmente o tempo que o canal fica vazio nas transmissões paralelas.

REFERÊNCIAS

- ANAND, N.; LEE, J.; LEE, S. J.; KNIGHTLY, E. W. Mode and User Selection for Multi-User MIMO WLANs without CSI. In: **IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)**. 2015. p. 451–459. ISSN 0743-166X.
- ARYAFAR, E.; ANAND, N.; SALONIDIS, T.; KNIGHTLY, E. W. Design and Experimental Evaluation of Multi-User Beamforming in Wireless LANs. In: **Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking**. New York, NY, USA: ACM, 2010. (MobiCom '10), p. 197–208. ISBN 978-1-4503-0181-7.
- ARYAFAR, E.; KHOJASTEPOUR, M. A.; SUNDARESAN, K.; RANGARAJAN, S.; KNIGHTLY, E. ADAM: An Adaptive Beamforming System for Multicasting in Wireless LANs. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 21, n. 5, p. 1595–1608, Oct 2013. ISSN 1063-6692.
- BEJARANO, O.; HOEFEL, R. P. F.; KNIGHTLY, E. W. Resilient Multi-User Beamforming WLANs: Mobility, Interference, and Imperfect CSI. In: **35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)**. 2016. p. 1–9.
- BEJARANO, O.; KNIGHTLY, E.; PARK, M. IEEE 802.11ac: From Channelization to Multi-User MIMO. **IEEE Commun. Mag.**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 51, n. 10, p. 84–90, oct 2013.
- BEJARANO, O.; QUADRI, S.; GUREWITZ, O.; KNIGHTLY, E. W. Scaling Multi-User MIMO WLANs: the Case for Concurrent Uplink Control Messages. In: **12th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)**. 2015. p. 238–246.
- BENALI, W.; BOT, M. L.; LANGLAIS, C.; KEROUEDAN, S. Power consumption of wi-fi transceivers. In: **2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)**. IEEE, 2016.
- CUI, S.; GOLDSMITH, A.; BAHAI, A. Energy-Efficiency of MIMO and Cooperative MIMO Techniques in Sensor Networks. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 22, n. 6, p. 1089–1098, aug 2004.
- DU, Y.; ARYAFAR, E.; CUI, P.; CAMP, J.; CHIANG, M. SAMU: Design and implementation of selectivity-aware MU-MIMO for wideband WiFi. In: **12th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)**. IEEE, 2015.
- GAST, M. S. **802.11ac: A Survival Guide: Wi-Fi at Gigabit and Beyond**. O'Reilly Media, 2013. ISBN 1449343147. Disponível em: <<https://www.xarg.org/ref/a/1449343147/>>.

GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521837162.

HOYDIS, J.; BRINK, S. ten; DEBBAH, M. Comparison of linear precoding schemes for downlink massive MIMO. In: **2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. IEEE, 2012.

HUANG, S.; YIN, H.; WU, J.; LEUNG, V. C. M. User Selection for Multiuser MIMO Downlink With Zero-Forcing Beamforming. **IEEE Trans. Veh. Technol.**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 62, n. 7, p. 3084–3097, sep 2013.

IEEE STANDARD ASSOCIATION. **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**. 2012.

IEEE STANDARD ASSOCIATION. **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—Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz**. IEEE, dez. 2013.

IEEE STANDARD ASSOCIATION. **Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications; Amendment 6: Enhancements for High Efficiency WLAN**. IEEE P802.11ax Draft 3.0: IEEE, 2018.

KARMAKAR, R.; CHATTOPADHYAY, S.; CHAKRABORTY, S. Intelligent MU-MIMO User Selection With Dynamic Link Adaptation in IEEE 802.11ax. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 18, n. 2, p. 1155–1165, feb 2019.

KIM, H.; KIM, K.; HAN, Y.; YUN, S. A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems. In: **IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004**. IEEE, 2004.

LIN, C.-H.; CHEN, Y.-T.; LIN, K. C.-J.; CHEN, W.-T. acPad: Enhancing channel utilization for 802.11ac using packet padding. In: **IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications**. IEEE, 2017.

LO, T. Maximum ratio transmission. In: **1999 IEEE International Conference on Communications (Cat. No. 99CH36311)**. IEEE, 1999.

PERON, G.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D.; PELLENZ, M. E. Physical and MAC cross-layer analysis of energy-efficient cooperative MIMO networks. **IEEE Transactions on Communications**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 66, n. 5, p. 1940–1954, may 2018.

PERON, G. de S.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D. Energy-Efficient Distributed Power Allocation With Multiple Relays and Antenna Selection. **IEEE Trans. Commun.**,

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 63, n. 12, p. 4797–4808, dec 2015.

SHARIF, M.; HASSIBI, B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information. **IEEE Transactions on Information Theory**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 51, n. 2, p. 506–522, feb 2005.

SHEN, W.-L.; LIN, K. C.-J.; CHEN, M.-S.; TAN, K. SIEVE: Scalable user grouping for large MU-MIMO systems. In: **IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)**. IEEE, 2015.

SUR, S.; PEFKIANAKIS, I.; ZHANG, X.; KIM, K.-H. Practical MU-MIMO User Selection on 802.11ac Commodity Networks. In: **22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)**. ACM Press, 2016.

WANG, P.; PING, L. On maximum eigenmode beamforming and multi-user gain. **IEEE Transactions on Information Theory**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 57, n. 7, p. 4170–4186, jul 2011.

XIE, X.; ZHANG, X. Scalable user selection for MU-MIMO networks. In: **IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications**. IEEE, 2014.

YANG, H.; ALOUINI, M. **Order Statistics in Wireless Communications: Diversity, Adaptation, and Scheduling in MIMO and OFDM Systems**. Cambridge University Press, 2011. ISBN 9781139502092.

YOO, T.; GOLDSMITH, A. On the Optimality of Multiantenna Broadcast Scheduling Using Zero-Forcing Beamforming. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, v. 24, n. 3, p. 528–541, March 2006. ISSN 0733-8716.

YOO, T.; JINDAL, N.; GOLDSMITH, A. Multi-Antenna Downlink Channels with Limited Feedback and User Selection. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 25, n. 7, p. 1478–1491, sep 2007.

YU, H.; KIM, T. Beamforming transmission in IEEE 802.11ac under time-varying channels. **The Scientific World Journal**, Hindawi Limited, v. 2014, p. 1–11, 2014.