



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

ANDRÉ WASHINGTON MORAIS DE FREITAS

ALINHAMENTO DE INTERFERÊNCIA EM REDES MIMO MULTICAST

FORTALEZA

2017

ANDRÉ WASHINGTON MORAIS DE FREITAS

ALINHAMENTO DE INTERFERÊNCIA EM REDES MIMO MULTICAST

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Teleinformática (PPGETI) da Universidade Federal do Ceará (UFC) como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Sinais e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Carvalho Barbosa Silva.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F936a Freitas, André Washington Morais de.
Alinhamento de Interferência em Redes MIMO Multicast / André Washington Morais de Freitas. –
2017.
52 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Yuri Carvalho Barbosa Silva.
1. MIMO. 2. Alinhamento de Interferência. 3. Minimização Alternada. 4. Canal Multicast.. I. Título.
CDD 621.38
-

ANDRÉ WASHINGTON MORAIS DE FREITAS

ALINHAMENTO DE INTERFERÊNCIA EM REDES MIMO MULTICAST

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Teleinformática (PPGETI) da Universidade Federal do Ceará (UFC) como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Sinais e Sistemas.

Aprovada em: 31 de Julho de 2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Yuri Carvalho Barbosa Silva. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Walter da Cruz Freitas Júnior.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Renato Machado.
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por todas as bênçãos ao longo da minha vida.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo
para todo o propósito debaixo do céu.”

(Eclesiastes 3:1)

RESUMO

A evolução da tecnologia móvel se expandiu consideravelmente nos últimos anos e o acesso a estas tecnologias se tornou popularizado principalmente com smartphones e notebooks. Esses dispositivos permitiram o acesso a conteúdo multimídia e na nuvem de uma forma muito dinâmica e efetiva, e com isso o uso de internet e dados na rede móvel teve um grande salto. Dado o aumento do número de elementos se comunicando na rede, a interferência nesse sistema se tornou um problema que exige maior atenção em seu tratamento para que a eficiência da banda possa ser maximizada e para que a capacidade de aceitar a demanda de novas conexões com uma boa taxa de transferência de dados seja alcançada. Para suprir a necessidade do grande tráfego gerado por estes novos dispositivos inseridos no sistema, novas técnicas de mitigação de interferência vêm sendo propostas, e uma técnica bastante promissora consiste em alinhar a interferência gerada nos transmissores de forma que os receptores indesejados não sejam afetados negativamente pelo sinal interferente e possam detectar o seu sinal de interesse. Nesta dissertação considera-se um cenário MIMO (do inglês Multiple-Input Multiple-Output) interferente multicast no qual cada transmissor deseja enviar um sinal para um grupo de receptores, havendo interferência entre as diferentes células. Este cenário corresponde a um caso mais geral do que o tradicional canal MIMO interferente. Neste trabalho é realizada uma análise das condições de realizabilidade necessárias para que o alinhamento de interferência possa ser realizado, considerando diferentes cenários com variações nos números de receptores, transmissores, grupos e antenas.

Palavras-chave: MIMO. Alinhamento de Interferência. Minimização Alternada. Canal Multicast.

ABSTRACT

The evolution of mobile technology has expanded considerably in recent years and the access to these technologies has become popularized mainly with smartphones and notebooks. These devices allowed access to multimedia content and the cloud in a very dynamic and effective way, and with that the use of internet and data in the mobile network took a big leap. Given the increase in the number of elements communicating in the network, the interference in this system has become a problem to be carefully addressed so that bandwidth efficiency can be maximized, so that the ability to accept the demand for new connections with a good data transfer rate is achieved. To meet the need for the large traffic generated by these new devices inserted into the system, new interference mitigation techniques have been proposed, and a very promising technique is to align the interference generated on the transmitters so that the unwanted receivers are not negatively affected by the interfering signals and can detect their useful signal. This dissertation considers an interfering MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) multicast channel, in which each transmitter wants to send a signal to a group of receivers, causing interference between different cells. This scenario corresponds to a more general case than the traditional MIMO interfering channel. In this work, an analysis of the feasibility conditions is performed so that the interference alignment can be realized, considering different scenarios with variations in the numbers of receivers, transmitters, groups and antennas.

Keywords: MIMO. Interference Alignment. Alternating Minimization. Multicast Channel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Canal com desvanecimento	8
Figura 2 – Esquema de um canal MIMO com um transmissor e um receptor.	9
Figura 3 – Esquema de um canal MIMO com um transmissor e um receptor com M e N antenas, respectivamente.	9
Figura 4 – Célula formada por um transmissor e K receptores.	10
Figura 5 – Célula formada por múltiplos grupos com K receptores em cada grupo.	11
Figura 6 – Esquema MIMO com $K = 3$ pares de transmissores e receptores.	12
Figura 7 – Esquema MIMO multicast com $K = 3$ transmissores e $Q = 2$ receptores por célula.	14
Figura 8 – Canal MIMO com K pares de transmissores e receptores (K células) onde o k -ésimo transmissor com M_k antenas envia sua mensagem para o k -ésimo receptor com N_k antenas.	16
Figura 9 – Célula com canal MIMO Broadcast com 1 transmissor e R_k receptores	18
Figura 10 – Canal MIMO Multicast. O transmissor T_1 envia diferentes sinais para os G grupos presentes em sua célula.	21
Figura 11 – Evolução da soma das capacidades com o número de receptores por transmissor (tamanho do grupo multicast).	29
Figura 12 – Representação do cenário 2: Três células, onde a terceira possui 2 usuários.	32
Figura 13 – O cenário 2 sendo agora representado na arquitetura CoMP.	33
Figura 14 – Transmissor e receptores para a configuração $\{1,1,2\}$	34
Figura 15 – Representação do cenário número quatro: $\{2,2,2\}$, $M = 6$, $N = 2$	35
Figura 16 – Representação do cenário número seis: $\{3,3\}$, $M = 4$, $N = 2$	36
Figura 17 – Transmissor e receptores com $M = 9$ e $N = 3$	37
Figura 18 – Taxa de erro de bit para o cenário número dois, com $M = 6$ e $N = 2$	38
Figura 19 – Eficiência espectral média, com $E_S/N_0 = 15$ [dB]	39
Figura 20 – Evolução da taxa de erro de bit para vários valores de SNR.	40
Figura 21 – Eficiência espectral para todos os cenários da Tabela 3. $E_S/N_0 = 15$ [dB].	41
Figura 22 – Impacto da variação do número de antenas nos receptores e transmissores.	43
Figura 23 – Impacto da variação do número de antenas nos receptores e transmissores considerando cinco células (grupos).	44
Figura 24 – Impacto da variação do número de receptores e grupos.	46

Figura 25 – Impacto da variação do número de receptores e grupos quando o sistema não é realizável. 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Condições de Realizabilidade para $d = 2$ símbolos e $K = 3$	27
Tabela 3 – Configuração dos cenários simulados para aplicar o Alinhamento de Interferência.	31
Tabela 4 – Variação do número de antenas nos receptores.	42
Tabela 5 – Variação do número de antenas nos transmissores.	42
Tabela 6 – Variação do número de grupos por célula.	45
Tabela 7 – Variação do número de receptores por grupo.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CoMP	<i>Coordinated Multi Point</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
EDGE	<i>Enhanced Data for GSM Evolution</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
IA	<i>Interference Alignment</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MF	<i>Matched Filter</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MMSE	<i>Minimum Mean Square Error</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
SDMA	<i>Spatial Division Multiple Access</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
ZF	<i>Zero Forcing</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Trabalhos Relacionados	3
1.3	Objetivos	5
1.4	Organização do trabalho	6
2	CANAL MIMO MULTICAST	7
2.1	Canal sem fio	7
2.2	Canal MIMO	8
2.2.1	<i>Célula MIMO com um grupo</i>	8
2.2.2	<i>Célula MIMO com Múltiplos Grupos</i>	10
2.3	Canal MIMO com Múltiplas Células	11
2.3.1	<i>Canal MIMO Multicast com Múltiplas Células</i>	13
3	ALINHAMENTO DE INTERFERÊNCIA EM CANAIS MIMO MULTICAST	15
3.1	Alinhamento de Interferência - Conceito	15
3.2	Cancelamento de Interferência em Sistemas Multicast	18
3.2.1	<i>Canal Broadcast</i>	18
3.2.2	<i>Canal Multicast</i>	20
3.3	Alinhamento de Interferência em Sistemas MIMO Multicast	22
3.3.1	<i>Graus de liberdade</i>	24
3.3.2	<i>Realizabilidade do Sistema</i>	25
3.3.3	<i>Minimização Alternada</i>	27
4	SIMULAÇÕES	30
4.1	CoMP	30
4.2	Cenários Simulados Para Comparação de Algoritmos	31
4.2.1	<i>Configuração {1,1,2}</i>	32
4.2.2	<i>Configuração {2,2,2}</i>	34
4.2.3	<i>Configuração {3,3}</i>	36
4.2.4	<i>Eficiência espectral e taxa de erro de bit</i>	37
4.3	Análise do Algoritmo de IA com a variação do número de antenas	42

4.4	Análise do Algoritmo de IA com a variação do número de grupos e receptores	45
5	CONCLUSÃO	48
5.1	Considerações Finais	48
5.2	Trabalhos Futuros	49
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é introduzida a técnica de alinhamento de interferência no âmbito da mitigação de interferências em redes MIMO com múltiplos usuários. São apresentadas as motivações e as principais características da técnica de maneira mais introdutória. Algumas definições importantes utilizadas durante o decorrer do trabalho são descritas, como o grau de liberdade. Com base nos algoritmos descritos nesta dissertação, resultados obtidos por simulação computacional para determinadas redes MIMO foram publicados no XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações em 2016, sendo estes algoritmos expandidos no Capítulo 4 para outros esquemas de rede.

1.1 Motivação

Os avanços nas tecnologias de dispositivos móveis que trazem para o usuário final serviços multimídia fizeram com que o meio de comunicação sem fio se tornasse cada vez mais popular e o número de usuários portando *smart phones* crescesse de forma abundante. Em 2014, 93,5% de todos os domicílios do Brasil possuíam algum tipo de telefone celular, totalizando 62,7 milhões de unidades domiciliares, e a região Nordeste apresentou 71,8% de suas residências portando apenas telefones celulares. (PNAD, 2014). A busca por aplicações na nuvem, stream de vídeos e músicas, dentre outros serviços disponíveis *online*, tornou-se o ponto chave na evolução das comunicações, haja visto que para suportar tamanho crescimento de usuários em uma rede celular utilizando cada vez mais a banda disponível fez com que as pesquisas em comunicações móveis voltassem sua atenção especialmente para encontrar formas de aumentar as taxas de transmissão de dados e buscar um aumento na eficiência espectral.

A partir da segunda geração das comunicações móveis, 2G, começou-se a utilizar modulação digital e tecnologias diferentes de múltiplo acesso, como divisão por tempo ou por código, visando o aumento da eficiência espectral. A evolução da tecnologia utilizada no 2G é dada pelo aumento da velocidade de acesso à internet e a utilização de serviços de transmissão mais rápidos como o EDGE (do inglês, *Enhanced Data for GSM Evolution*). Na terceira geração das comunicações móveis foi introduzido o acesso à internet em alta velocidade utilizando tecnologias de múltiplo acesso por divisão de código de banda larga (WCDMA, do inglês *Wideband Code Division Multiple Access*). O padrão 3GPP (do inglês, *3rd Generation*

Partnership Project) foi introduzido em 2008, sendo sua utilização mundial iniciada em 2010 em mais de 150 países se tornando a mais vendida tecnologia de rádio por mais de 350 provedores de serviço de comunicação (HOLMA; TOSKALA, 2010). A tecnologia de acesso LTE (do inglês, *Long Term Evolution*) é um padrão desenvolvido pelo 3GPP para suportar as definições da quarta geração da comunicação móvel 4G. É baseada na multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM, do inglês *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), suporta largura de banda acima de 20 MHz e suporta transmissão com múltiplas antenas (RAPPAPORT *et al.*, 2013). A tecnologia MIMO (do inglês, *Multiple Input Multiple Output*) torna possível a transmissão de múltiplos fluxos de dados (*streams*) visando uma alta eficiência espectral e possibilita a utilização de técnicas de mitigação de interferência como o direcionamento de feixes (*beamforming*) e o alinhamento de interferência.

A interferência é um forte fator limitante nas comunicações sem fio. O caso comumente abordado na literatura é um sinal interferente com o mesmo nível de energia do sinal útil, onde normalmente não se pode apenas subtrair o sinal interferente do útil. Estes casos podem ser contornados utilizando técnicas de ortogonalização do acesso ao meio, fazendo uso da divisão da frequência (FDMA, do inglês *Frequency Division Multiple Access*) ou do tempo (TDMA, do inglês *Time Division Multiple Access*) para mitigar esta interferência. Por se tratar de uma divisão do recurso de rede entre os transmissores, o desempenho do sistema é da mesma forma limitada.

Com a utilização de múltiplas antenas da tecnologia MIMO, a multiplexação espacial pode ser aplicada trazendo um aumento linear, com o número de pares transmissor-receptor, na taxa de transmissão para uma mesma largura de banda e sem demandar energia adicional. Quando aplicado em um canal MIMO com múltiplos usuários a técnica recebe o nome de SDMA (do inglês, *Spatial Division Multiple Access*), e permite que os transmissores enviem seus sinais com a aplicação de filtragem espacial, de forma que cada receptor possa decodificar o seu sinal desejado, proporcionando um aumento na capacidade do canal proporcional ao número de antenas no transmissor e ao número de usuários (PAULRAJ *et al.*, 2003). A redução de interferência que um transmissor gera nos receptores indesejados pode ser feita minimizando a energia do sinal interferente entregue aos usuários indesejados ao mesmo tempo que disponibiliza o sinal útil ao receptor desejado, levando em consideração as limitações do esquema utilizado, como o grau de liberdade espacial definido pelo número de antenas na rede (CADAMBE; JAFAR,

2008).

A utilização de técnicas de cooperação ou coordenação entre os transmissores é conhecida por atingir a meta de reduzir ou mesmo eliminar a interferência entre as células com pouca mudança na infraestrutura do sistema (MARSCH; FETTWEIS, 2011). Sendo conhecida como coordenação multi-ponto (CoMP, do inglês *Coordinated Multi Point*), esta técnica permite que os transmissores realizem *beamforming* coordenado ou então transmitam conjuntamente para os múltiplos receptores (precodificação conjunta), obtendo grande eficiência espectral pelo efetivo cancelamento da interferência. No entanto, esta técnica apresenta algumas desvantagens, como questões relacionadas a sincronismo, alocação de potência ponderada entre os múltiplos transmissores, bem como um maior grau de exigência sobre o *backhaul*.

Uma outra técnica que busca mitigar a interferência entre as células de um sistema MIMO, tornando possível que os pares de transmissores e receptores possam se comunicar livres de interferência dos transmissores vizinhos, é chamada de alinhamento de interferência (IA, do inglês *Interference Alignment*). O IA possui um grau de acoplamento menor que a precodificação conjunta, pois não exige que os *streams* sejam compartilhados entre os diferentes transmissores. A técnica, aplicada a uma rede MIMO com K pares de transmissor e receptor, foi provada alcançar o máximo grau de liberdade espacial igual a $K/2$, forçando o sinal interferente a ficar confinado em um subespaço reduzido do espaço de sinal total de receptores (PETERS; HEATH, 2009).

1.2 Trabalhos Relacionados

A técnica de alinhamento de interferência é realizada por meio da combinação linear dos vetores de pré-codificação e os dados que devem ser transmitidos. Esta técnica é utilizada para alinhar os sinais de interferência em determinadas dimensões de forma a obter uma transmissão livre de interferência. Foi primeiramente investigado em (MADDAH-ALI *et al.*, 2006), considerando o impacto da interferência em uma rede MIMO de canal cruzado (MIMO-X, do inglês *MIMO-Cross Channel*), contendo dois pares de transmissores e receptores portando três antenas cada. Neste cenário foi demonstrado que o esquema do alinhamento de interferência alcançou ganho de multiplexação igual a quatro, sendo maior que os convencionais canal MIMO interferente (MIMO-IC, do inglês *MIMO-Interference Channel*), canal MIMO de múltiplo acesso (MIMO-MAC, do inglês *MIMO-Multiple Access Channel*) e canal MIMO

broadcast (MIMO-BC, do inglês MIMO-Broadcast Channel) (UTSCHICK, 2016).

A aproximação da capacidade das redes por meio do grau de liberdade (DoF, do inglês Degree of Freedom) tornou-se uma métrica muito utilizada na literatura, e as seguintes observações devem ser feitas a seu respeito (JAFAR; FAKHEREDDIN, 2005):

1. O grau de liberdade de uma rede pode ser tido como a quantidade de dimensões resolvíveis no espaço de sinal.
2. Uma rede tem d graus de liberdade se e somente se a capacidade somada da rede puder ser expressa como $d \log(SNR) + o(\log(SNR))$ ¹.
3. O grau de liberdade é uma aproximação da capacidade que atinge maior acurácia em regime de altos valores de SNR.

A caracterização das redes por meio do grau de liberdade quando se utiliza a técnica do alinhamento de interferência se seguiu no trabalho de Cadambe e de Jafar (CADAMBE; JAFAR, 2008), onde os autores utilizaram a técnica em um canal MIMO interferente com K pares de usuários. Foi demonstrado no referido trabalho que para tal rede é possível alcançar $K/2$ graus de liberdade, ou seja, foi possível concentrar a interferência em metade do espaço de sinal em cada receptor, deixando a outra metade livre de interferência para transmissão. Foi mostrado ainda que em canais MIMO interferentes, o alinhamento pode ser realizado para um arbitrário número de usuários (pares transmissor-receptor), porém com o custo de aumentar o espaço de sinal necessário em cada receptor para recuperar o sinal útil (CADAMBE; JAFAR, 2008).

Apesar de o grau de liberdade aumentar linearmente com o número de usuários, soluções de forma fechada para mais de três pares transmissor-receptor são difíceis de ser obtidas. Em (PETERS; HEATH, 2009), um algoritmo de minimização alternada foi proposto para a realização do alinhamento de interferência em redes MIMO com um número arbitrário de usuários, antenas ou *streams* de dados. O algoritmo proposto provou convergir para qualquer canal interferente. Ele gera os vetores de pré-codificação que são responsáveis por minimizar o total de interferência na rede observando que os receptores usam um equalizador de forçagem a zero (ZF, do inglês *Zero Forcing*).

¹ A função $o()$ descreve o comportamento limitante de uma função quando o seu argumento tende para um valor específico ou para o infinito.

Em (YETIS *et al.*, 2009), foram abordados os conceitos e condições da realizabilidade de um alinhamento de interferência dado um determinado esquema de rede MIMO. Os autores representaram o problema do alinhamento por meio de um sistema de equações bilineares e comparando o número de equações e de variáveis determinaram se era possível ou não efetuar o alinhamento, considerando que um sistema provável é quase certo de ser realizável quando o número de variáveis excede o número de equações. De outra forma um sistema não provável é quase certo de não ser realizável. Os autores utilizaram o canal MIMO interferente com K usuários, onde os receptores contaram com filtros de ZF.

Mais recentemente (RAO; LAU, 2015) abordou o alinhamento de interferência em sistemas onde o conhecimento das condições do canal (CSI, do inglês *Channel State Information*) é parcialmente conhecido pelos transmissores, trazendo a análise para uma abordagem mais realística onde foi levado em consideração o sobrecarregamento da rede pelo *feedback* de CSI. Estabelecendo um *framework* para o CSI parcial e respeitando as limitações do requisito do grau de liberdade da rede e das condições mínimas de realizabilidade, os autores propuseram abordagens para a redução do *feedback* de CSI, além de estabelecerem novas condições de realizabilidade para uma rede com CSI parcial. Nesta dissertação foram consideradas as condições de realizabilidade para o conhecimento perfeito do CSI.

1.3 Objetivos

Tomando como base os estudos realizados na literatura para a aplicação do alinhamento de interferência em redes MIMO, foi desenvolvido e avaliado o algoritmo de minimização alternada aplicado ao alinhamento de interferência para redes MIMO com canal de transmissão multicast. Como o algoritmo de minimização alternada se mostrou bastante versátil para redes MIMO com diferentes números de usuários (PETERS; HEATH, 2009), o objetivo desta dissertação é avaliar diferentes cenários para identificar o impacto que o número de receptores e de grupos pode trazer para o desempenho do sistema quando o alinhamento de interferência é aplicado. Para isto foram estabelecidos diferentes cenários de redes multicast para a aplicação do algoritmo de minimização alternada proposto.

A variação do número de antenas nos receptores foi considerada para avaliar o seu impacto na eficiência espectral alcançada pelo IA. Também foram variados o número de grupos por transmissor e o número de receptores por grupo para identificar de que forma o

alinhamento de interferência sofre com essa variação. Estes cenários contaram com células com variados números de receptores divididos em grupos, onde cada grupo deseja receber uma informação diferenciada do mesmo transmissor. Alguns resultados deste algoritmo em determinados cenários multicast foram organizados em um artigo e apresentados no XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações. Como forma de avaliar o desempenho do algoritmo de minimização alternada, alguns algoritmos de cancelamento de interferência bastante abordados na literatura foram utilizados para obter um comparativo de desempenho do alinhamento de interferência.

1.4 Organização do trabalho

No Capítulo 1 foram apresentados alguns trabalhos relevantes com relação ao alinhamento de interferência e foram introduzidos os principais requisitos para se aplicar esta técnica em canais MIMO multicast.

O Capítulo 2 apresenta as principais características dos canais de comunicação sem fio e faz uma introdução aos canais MIMO, além de exemplificar e descrever as formas de comunicação unicast, broadcast e multicast para redes MIMO.

No Capítulo 3 são apresentados mais detalhes sobre o alinhamento de interferência no cenário multicast e suas condições de realizabilidade. O projeto do algoritmo utilizando minimização alternada é apresentado no final do capítulo.

No Capítulo 4 os resultados de simulações são mostrados, onde foram propostos alguns cenários para avaliar o desempenho do algoritmo de minimização alternada em comparação com algoritmos de cancelamento de interferência comumente utilizado em redes MIMO, como o filtro de forçagem a zero (ZF) e o mínimo erro quadrático médio (MMSE, do inglês *Minimum Mean Square Error*).

No Capítulo 5 são indicadas as principais conclusões obtidas com este trabalho e são enumeradas as perspectivas de trabalhos futuros.

2 CANAL MIMO MULTICAST

Este capítulo apresenta um levantamento do estado da arte em canais de comunicação sem fio, considerando diferentes cenários. Aqui são apresentadas as principais características que definem o canal sem fio, bem como suas limitações. O canal sem fio está sujeito aos efeitos da propagação no espaço causado por obstáculos que interferem no caminho de propagação do sinal, interferência destrutiva e construtiva do sinal que é refletido e espalhado, ao desvanecimento e à atenuação do sinal.

2.1 Canal sem fio

A transmissão do sinal em um canal sem fio é feita pela propagação de ondas eletromagnéticas oriundas de um transmissor com destino a um receptor, que são principalmente afetadas por três tipos de fenômenos físicos: difração, reflexão e espalhamento (CHO *et al.*, 2010). A difração é o fenômeno que ocorre quando a onda encontra um obstáculo com pequenas irregularidades ou aberturas no caminho entre o transmissor e o receptor, de forma que ao passar pela abertura sua direção de propagação sofre uma variação. A reflexão é um fenômeno físico que ocorre quando uma onda eletromagnética se propaga na direção de um objeto de dimensões maiores que o seu comprimento de onda, provocando uma reflexão da onda. O fenômeno físico do espalhamento ocorre quando uma onda eletromagnética atinge vários obstáculos com dimensões menores que seu comprimento de onda, fazendo com que o sinal se espalhe por diferentes trajetórias de propagação.

Além destes fenômenos, a transmissão em canal sem fio também sofre uma variação da amplitude do sinal com relação ao tempo e frequência, fenômeno este chamado de desvanecimento (*fading*). O desvanecimento pode ser causado devido à propagação de multi-percurso, sendo chamado de desvanecimento induzido, ou devido a obstáculos que afetam a propagação da onda de rádio causando o "sombreamento", sendo chamado então de desvanecimento de sombra. Pode ser classificado em dois tipos: desvanecimento de larga escala e de pequena escala. No caso da larga escala, ele ocorre conforme o receptor móvel se desloca em uma grande distância, sendo a perda de percurso do sinal função da distância e o sombreamento causado por obstáculos como prédios e morros. O desvanecimento de pequena escala remete à rápida variação do nível do sinal devido à interferência destrutiva e construtiva dos múltiplos percursos do sinal quando o

receptor se movimentar a curtas distâncias. De outra forma, dependendo da variação do canal com o tempo devido à velocidade de locomoção do receptor móvel (espalhamento Doppler), o desvanecimento pode ser classificado como rápido ou lento. A Figura 1 resume os aspectos relacionados ao desvanecimento.

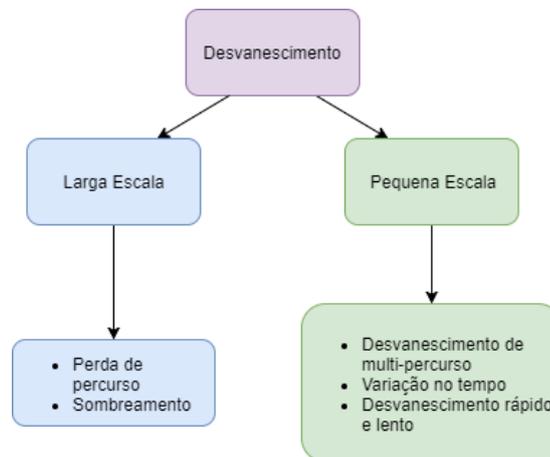


Figura 1 – Canal com desvanecimento

2.2 Canal MIMO

A interferência causada pela transmissão simultânea no mesmo meio também afeta negativamente o canal sem fio, causando a redução das taxas de dados devido às colisões de pacotes (NACHTIGALL *et al.*, 2008). O canal sem fio é formado entre um receptor e um transmissor, e quando se tem múltiplas antenas em ambos os lados, temos um canal MIMO. Os sistemas MIMO, utilizando-se da dimensão espacial do enlace pelo acréscimo de múltiplas antenas, de codificação no transmissor e processamento de sinal no receptor, conseguem aumentar a capacidade do canal, atingindo altas taxas de dados. Além disso são tolerantes ao problema do desvanecimento de multi-percurso e interferência e podem ter seu emprego em um ambiente com múltiplos usuários (FOSCHINI; GANS, 1998). As comunicações com múltiplos canais simultâneos, formados pelos pares transmissor-receptor, tanto causam quanto estão sujeitos à interferência de outros transmissores que estão dividindo o mesmo meio físico (VENKATRAMAN *et al.*, 2016).

2.2.1 Célula MIMO com um grupo

Em sistemas de comunicação sem fio, a área geográfica que um transmissor cobre é denominada célula, sendo normalmente representada na forma hexagonal. Neste trabalho

definimos uma célula com sendo formada por um transmissor e um ou mais receptores que desejam receber informações deste transmissor. A estrutura mais simples de um sistema MIMO é um canal formado por um transmissor e um receptor (que pode ser visto como um grupo de receptores contendo apenas um elemento). Este tipo de transmissão é chamada *unicast* pois o transmissor deseja enviar suas informações unicamente para um receptor. Um exemplo do sistema, no qual um transmissor T1 com M antenas envia seu sinal para um receptor R1 com N antenas, pode ser visto na Figura 2.

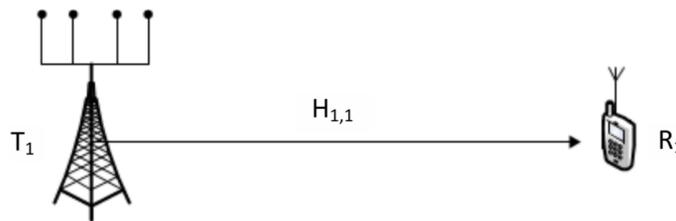


Figura 2 – Esquema de um canal MIMO com um transmissor e um receptor.

O canal de comunicação deste sistema pode ser modelado pela matriz $\mathbf{H}_{1,1}$, que guarda todos os vetores que representam os canais entre as antenas do receptor e as antenas do transmissor.

A Figura 3 mostra em mais detalhes o sistema em questão, onde o vetor h_{r_N,t_M} representa o canal entre a antena r_N do receptor R1 e a antena t_M do transmissor T1.

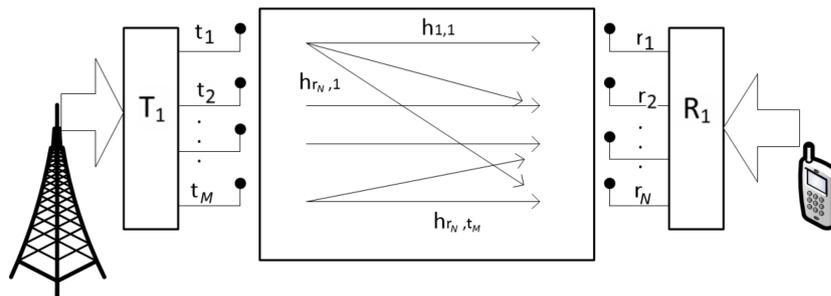


Figura 3 – Esquema de um canal MIMO com um transmissor e um receptor com M e N antenas, respectivamente.

Quando a célula contém K receptores que desejam receber a mesma informação do transmissor, temos um grupo formado com esses K elementos. A Equação (2.1) descreve o vetor de símbolos de dados para cada receptor, em que \mathbf{H}_k é a matriz do canal entre o transmissor e o receptor k e tem dimensões $N_k \times M$, que representa o número de antenas do receptor k e do transmissor, respectivamente. \mathbf{V} é o pré-codificador utilizado pelo transmissor e tem dimensões

$M \times d$, sendo d o número de símbolos de dados que o transmissor envia. \mathbf{s} é o vetor que contém os símbolos¹ que o transmissor envia com dimensões $d \times 1$, e \mathbf{n}_k é o ruído Gaussiano aditivo com distribuição $\mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_k^2 \mathbf{I})$ e dimensões $N_k \times 1$ no receptor k .

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{V} \mathbf{s} + \mathbf{n}_k \quad (2.1)$$

A Figura 4 mostra o sistema formado por uma célula contendo um grupo com K usuários.

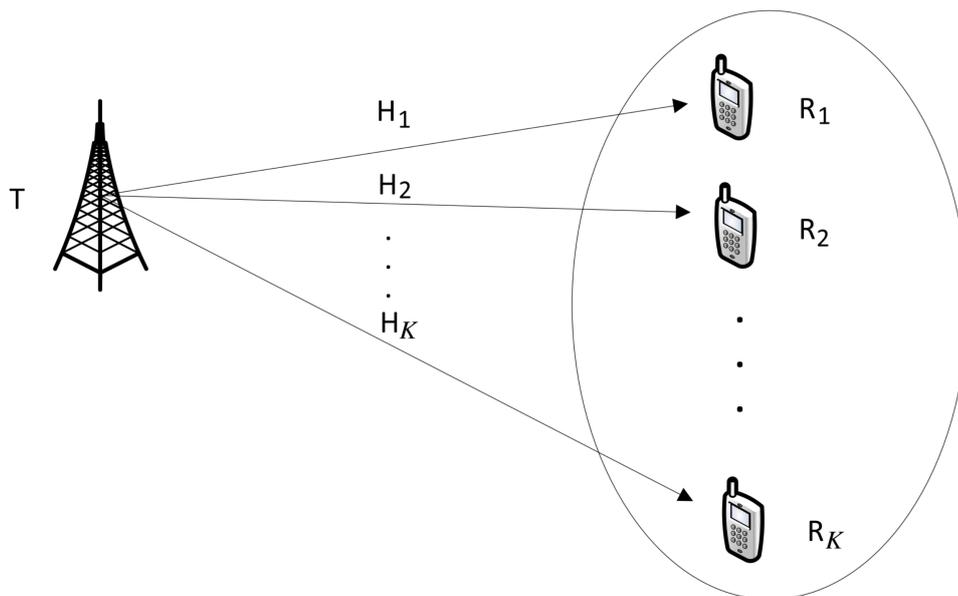


Figura 4 – Célula formada por um transmissor e K receptores.

O tipo de transmissão em que o transmissor deseja enviar o mesmo sinal para K receptores recebe o nome de *broadcast*, pois a mesma informação é veiculada para todos os receptores disponíveis sem distinção de grupos.

2.2.2 Célula MIMO com Múltiplos Grupos

Quando temos mais de um receptor em uma célula, podemos organizá-los em grupos, onde cada grupo contém os receptores que desejam receber os mesmos dados em comum do transmissor. Desta forma, o transmissor envia mais de um fluxo de dados, cada um destinado a um determinado grupo de usuários dentro de sua célula. Neste cenário os receptores experimentam a interferência causada pela propagação do sinal destinado a outros grupos, enviado pelo mesmo transmissor, chamada de interferência inter-grupo. O cenário pode ser visto na Figura 5 e o modelo para este sistema pode ser descrito pela Equação (2.2).

¹ Corresponde a um *stream* (fluxo) de dados codificados que está sendo disponibilizado por uma fonte.

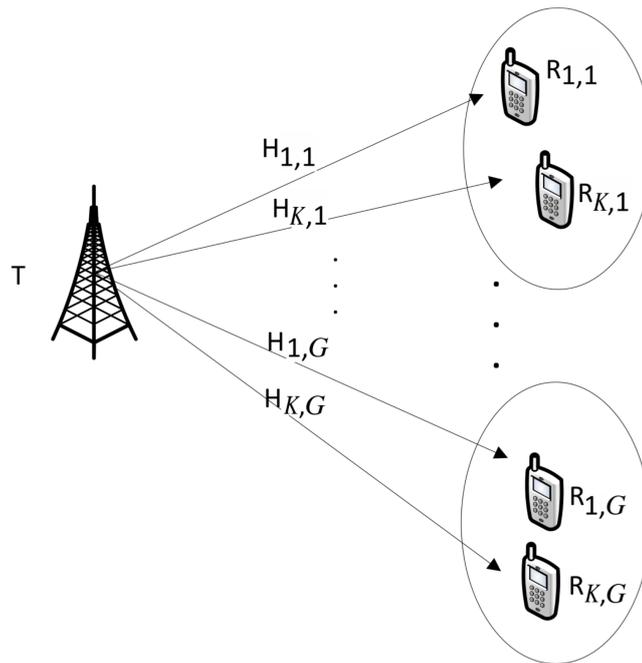


Figura 5 – Célula formada por múltiplos grupos com K receptores em cada grupo.

Seja $g \in \{1, 2, \dots, G\}$ o conjunto de todos os grupos da célula, onde temos no total G grupos. O sinal recebido pelo k -ésimo receptor do g -ésimo grupo é dado por $\mathbf{y}_{k,g}$.

$$\mathbf{y}_{k,g} = \mathbf{H}_{k,g} \mathbf{V}_g \mathbf{s}_g + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq g}}^G \mathbf{H}_{k,g} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_{k,g} \quad (2.2)$$

$\mathbf{H}_{k,g}$ é a matriz do canal entre o transmissor e o receptor k do grupo g . \mathbf{V}_g é o pré-codificador utilizado pelo transmissor para codificar o sinal destinado ao grupo g e \mathbf{s}_g é o vetor que contém os símbolos de dados que o transmissor envia ao grupo g . As três parcelas desta equação correspondem ao sinal desejado, interferência e ao ruído percebido pelo receptor, respectivamente. Ao transmitir diferentes fluxos de dados com destino a grupos diferentes, o transmissor e os receptores se tornam um sistema de transmissão multicast multi-grupo, visto que o transmissor deseja enviar um determinado sinal a um receptor ou grupo de receptores em especial, não querendo que outros grupos presentes em sua célula recebam este sinal.

2.3 Canal MIMO com Múltiplas Células

Este cenário inclui múltiplos transmissores e receptores MIMO organizados em células, onde cada célula tem um transmissor e um ou mais receptores. Este modelo de canal

também é chamado de canal MIMO interferente (MIMO-IC, do inglês *MIMO Interference Channel*). Na Figura 6 é mostrado o cenário em que há um receptor para cada transmissor, onde um transmissor T_k deseja enviar um sinal para um receptor R_k em um sistema com K^2 canais no total, sendo $K(K - 1)$ canais interferentes.

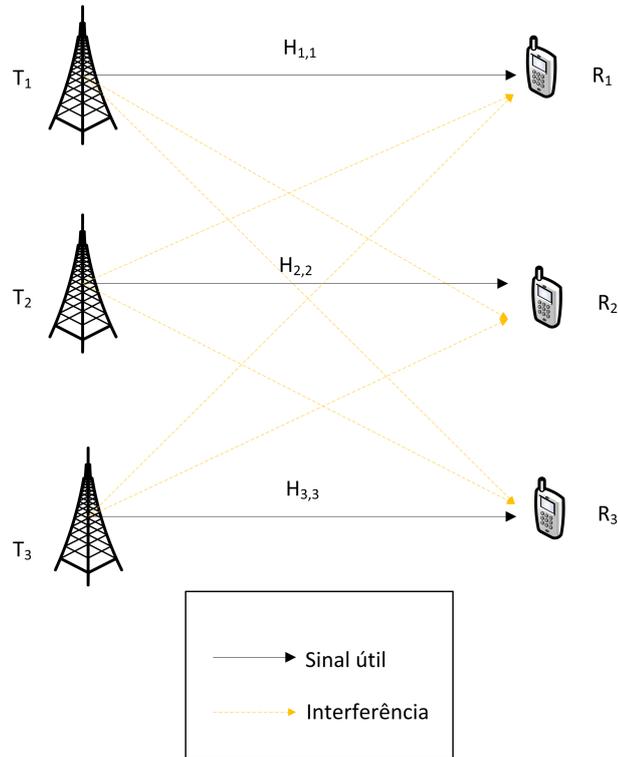


Figura 6 – Esquema MIMO com $K = 3$ pares de transmissores e receptores.

O sinal recebido é definido por

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_{kk} \mathbf{V}_k \mathbf{s}_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K \mathbf{H}_{kj} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_k \quad (2.3)$$

em que \mathbf{H}_{kj} é a matriz do canal entre o transmissor T_j e o receptor R_k e tem dimensões $N_k \times M_j$, sendo M_j o número de antenas no transmissor j e N_k o número de antenas no receptor k . A matriz \mathbf{V}_j é o pré-codificador utilizado pelo transmissor T_j e tem dimensões $M_j \times d_j$, em que d_j é o número de símbolos de dados alocados para o receptor R_j . \mathbf{s}_k é o sinal que o transmissor T_k deseja enviar ao receptor R_k e tem dimensões $d_k \times 1$, e \mathbf{n}_k é o ruído Gaussiano aditivo com distribuição $\mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_k^2 \mathbf{I})$ e dimensões $N_k \times 1$ no receptor R_k .

2.3.1 Canal MIMO Multicast com Múltiplas Células

Em um esquema de rede MIMO com múltiplas células, temos um total de K transmissores (um por célula) se comunicando com os Q receptores presentes em suas respectivas células, considerando que cada célula tem apenas um grupo de receptores esperando o mesmo sinal do seu transmissor. Temos que a comunicação ocorre de forma que cada um dos K transmissores envia um mesmo sinal para o grupo de Q receptores presente em sua célula, e a transmissão se configura como multicast, já que os canais presentes em uma célula interferem nos demais utilizados pelos usuários das células vizinhas, ou seja, um transmissor destina seu sinal a apenas alguns receptores presentes em sua célula, e para todos os que o recebem nas células vizinhas, este sinal é percebido como interferência.

O canal MIMO interferente para transmissão multicast foi descrito em (RAO; LAU, 2015), onde os autores introduziram o cenário e as condições de realizabilidade, com uma análise que residiu em como minimizar o envio de informações de estado de canal em tal cenário.

A Figura 7 mostra um exemplo de como a rede multicast multicelular é organizada, onde têm-se $K = 3$ transmissores e um grupo com $Q = 2$ receptores por célula, e exhibe também os sinais desejados e interferentes que cada receptor percebe.

Considerando que cada célula contém apenas um grupo de Q receptores, e que temos um total de K células, o sinal recebido em cada receptor é então

$$\mathbf{y}_{lk} = \mathbf{H}_{lk,k} \mathbf{V}_k \mathbf{s}_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K \mathbf{H}_{lk,j} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_{lk} \quad (2.4)$$

em que, para o caso multicast, $\mathbf{H}_{lk,j}$ corresponde à matriz do canal entre o transmissor T_j e o receptor R_{lk} , com $l \in \{1, 2, \dots, Q\}$ e $k \in \{1, 2, \dots, K\}$. \mathbf{V}_k é o pré-codificador aplicado no k -ésimo transmissor, \mathbf{s}_k é o sinal destinado aos receptores do grupo k e \mathbf{n}_{lk} é o vetor de ruído Gaussiano branco com distribuição $\mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_k^2 \mathbf{I})$ percebido no receptor R_{lk} . Para (2.3) e (2.4), a primeira parcela equivale ao sinal que o transmissor deseja que seja recebida pelo receptor considerado, o termo somatório na segunda parcela corresponde aos sinais interferentes e a terceira parcela corresponde à adição de ruído.

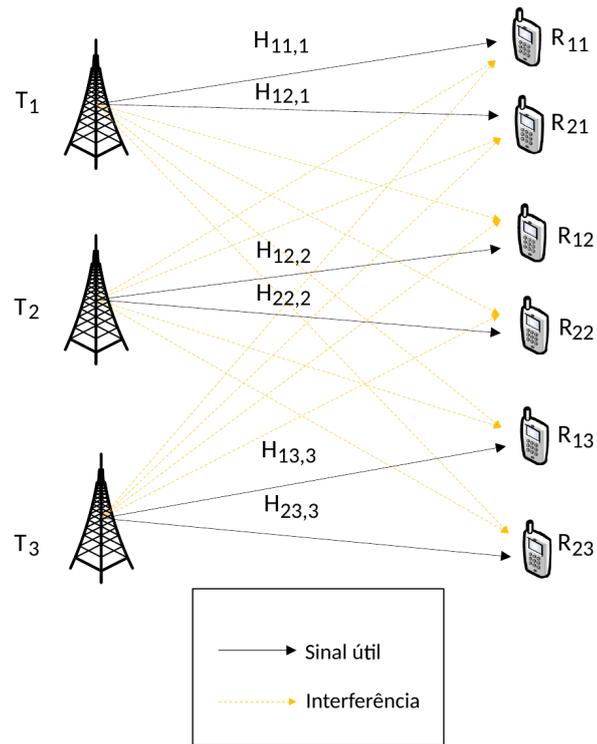


Figura 7 – Esquema MIMO multicast com $K = 3$ transmissores e $Q = 2$ receptores por célula.

Dado que os transmissores e receptores têm M_j e N_{lk} antenas, respectivamente, a matriz do canal $\mathbf{H}_{lk,j}$ tem dimensões $N_{lk} \times M_j$ e o pré-codificador em cada transmissor tem dimensões $M_j \times d_j$, em que d_j representa a quantidade de símbolos esperada pelos usuários da j -ésima célula.

3 ALINHAMENTO DE INTERFERÊNCIA EM CANAIS MIMO MULTICAST

Neste capítulo são discutidas as características do alinhamento de interferência para canais MIMO multicast, onde o cenário abordado é formado por múltiplas células interferentes entre si. São analisadas as condições para aplicar o alinhamento de interferência, bem como apresentados os algoritmos utilizados na solução do problema.

3.1 Alinhamento de Interferência - Conceito

Nas redes de comunicações móveis a interferência causada pelo sinal de um transmissor em receptores de células vizinhas devido ao reuso de canais no espectro das frequências provoca a perda de desempenho do sistema no regime de alta razão sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*). Com o avanço das tecnologias de comunicação sem fio estamos caminhando para a quinta geração das redes móveis onde o número de dispositivos e redes interconectados tende a aumentar bruscamente juntamente com a demanda para lidar com o tráfego que está em constante crescimento. Para satisfazer o aumento do tráfego gerado pela inserção de tantos dispositivos interconectados entre si, diversas abordagens estão sendo estudadas, como a variação no tamanho das células e a introdução das redes heterogêneas. (DEMESTICHAS *et al.*, 2013).

Com isso, redes sem fio das próximas gerações tem que contornar este empecilho que afeta tanto o desempenho de enlace quanto a eficiência espectral. Quando o nível desta interferência é muito menor que o nível do sinal, a técnica utilizada para tratar esta interferência é considerar este sinal como sendo um ruído. Por outro lado, quando esta interferência apresenta nível de potência da mesma ordem do sinal utilizável, técnicas de ortogonalização de acesso aos recursos de rádio são utilizadas (CADAMBE; JAFAR, 2008), consistindo basicamente do múltiplo acesso por divisão no tempo (TDMA, do inglês *Time Division Multiple Access*) ou na frequência (FDMA, do inglês *Frequency Division Multiple Access*).

Quando se aborda a dimensão espacial do receptor dada pelas múltiplas antenas MIMO de forma a explorar eficientemente os recursos de rádio, que é conhecido como o múltiplo acesso por divisão espacial (SDMA, do inglês *Spatial Division Multiple Access*), podemos utilizar a ortogonalização de pré-codificadores e também a aplicação de filtros nos receptores

para aplicar técnicas como o alinhamento de interferência (PETERS; HEATH, 2009).

O alinhamento de interferência é uma técnica aplicada a redes MIMO que visa mitigar a interferência captada nos receptores, interferência esta causada pelos transmissores que estão na vizinhança de cada receptor e que não faz parte da sua célula (MADDAH-ALI *et al.*, 2008). A técnica consiste basicamente em dividir o espaço de sinais de cada receptor e projetar as interferências sobre um mesmo subespaço reduzido (chamado aqui de subespaço interferente) com dimensão menor que o tamanho do espaço de sinal total neste receptor, de forma que o sinal útil possa ser separado da interferência, permitindo ao sistema alcançar o máximo grau de liberdade possível (PANAHI *et al.*, 2017). Podemos considerar para uma análise inicial sobre o conceito de alinhamento de interferência um exemplo de canal MIMO interferente (MIMO-IC) com K células, como mostrado na Figura 8, onde para cada receptor temos um transmissor associado. Como cada transmissor está pareado com apenas um receptor, temos então que cada transmissor se torna uma fonte de interferência para os outros receptores que não estão pareados com ele mas que se encontram em sua vizinhança, ao alcance do seu sinal, tornando-se então receptores indesejados susceptíveis à sua interferência.

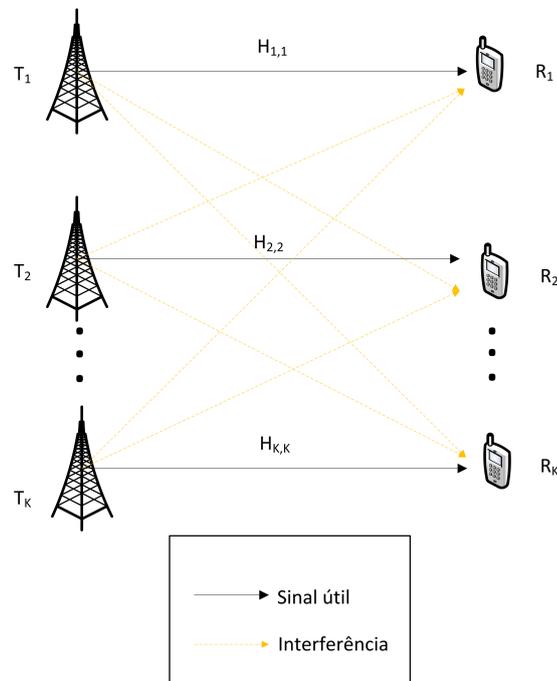


Figura 8 – Canal MIMO com K pares de transmissores e receptores (K células) onde o k -ésimo transmissor com M_k antenas envia sua mensagem para o k -ésimo receptor com N_k antenas.

Neste exemplo temos que cada receptor está equipado com N_k antenas e cada transmissor está equipado com M_k antenas. De acordo com o sistema exibido na Figura 8, onde temos células que contêm apenas um par de transmissor e receptor cada, o sinal que cada receptor recebe é dado por

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_{kk} \mathbf{V}_k \mathbf{s}_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K \mathbf{H}_{kj} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_k \quad (3.1)$$

em que \mathbf{H}_{kj} é a matriz do canal entre o j -ésimo transmissor e o k -ésimo receptor, \mathbf{V}_j é a matriz de pré-codificação utilizada pelo j -ésimo transmissor, \mathbf{s}_j é o vetor de símbolos que o k -ésimo transmissor deseja enviar ao k -ésimo receptor e \mathbf{n}_k é o ruído branco Gaussiano com distribuição $\mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_k^2 \mathbf{I})$. Neste sinal recebido a primeira parcela corresponde ao sinal útil vindo do transmissor pareado, a segunda parcela é um somatório das interferências dos outros transmissores da circunvizinhança e a terceira parcela é o ruído do sistema

O que a técnica do alinhamento de interferência busca alcançar é encontrar uma matriz de pré-codificação para os transmissores de forma que cada receptor consiga decodificar o sinal útil que o seu transmissor lhe enviou (o transmissor que forma seu par na célula) sem sofrer com a interferência dos outros transmissores de células vizinhas. Isso se torna possível devido ao fato de os pré-codificadores serem projetados com o propósito de “forçar” os transmissores a utilizarem uma parte reduzida do subespaço de sinal dos receptores que estão fora de sua célula (indesejados), fazendo assim com que estes receptores indesejados percebam o sinal destes transmissores interferentes apenas em uma pequena parte do seu espaço total de sinal. Para o exemplo em particular, se existem d_k fluxos de dados sendo transmitidos pelo transmissor k , pelo conceito do IA temos que a interferência deste transmissor deverá ser inserida em um subespaço \mathcal{C} com uma dimensão de no máximo $p = N_k - d_k$, dentro do espaço total de sinal \mathbb{C}^{N_k} do receptor k , de forma que seja possível a recuperação do sinal útil livre de interferência nos receptores (PETERS; HEATH, 2009). O que isso significa é que se a interferência no receptor k permanecer alocada em um subespaço de tamanho p , onde o mesmo está localizado dentro do espaço total de sinal do receptor cujo a dimensão é N_k , este receptor k poderá então remover toda a interferência fazendo uma projeção do sinal total recebido dado por (3.1) em um subespaço que seja ortogonal ao subespaço dado por \mathcal{C} . O sinal projetado estará então em um subespaço

ortogonal a \mathcal{C} e ao fazer essa projeção o sinal que sobra está livre de sinais interferentes e vem exatamente do vetor de símbolos \mathbf{s}_K do transmissor que está em sua célula, tendo dimensão d_k .

3.2 Cancelamento de Interferência em Sistemas Multicast

3.2.1 Canal Broadcast

Quando as células incluem múltiplos usuários com uma ou múltiplas antenas, além do transmissor com suas múltiplas antenas, temos um sistema denominado MIMO multi-usuário (MIMO-MU, do inglês *Multiple Input Multiple Output-MultiUser*). Neste esquema o canal formado pelo transmissor que se comunica com todos os receptores presentes em sua célula ao mesmo tempo e envia o mesmo sinal para todos sem distinção recebe o nome de canal broadcast, e conforme foi discutido na Seção 2.2.1, estes receptores por estarem recebendo o mesmo sinal configuram uma célula MIMO com um grupo. O cenário ilustrado pela Figura 8 mostra um canal MIMO formado entre um transmissor e um único receptor, em um enlace direto. Diferentemente deste caso, o canal MIMO-MU é formado por um enlace para cada usuário com diferentes perdas de percurso, que formam a matriz de coeficientes do canal, como pode ser visto na Figura 9.

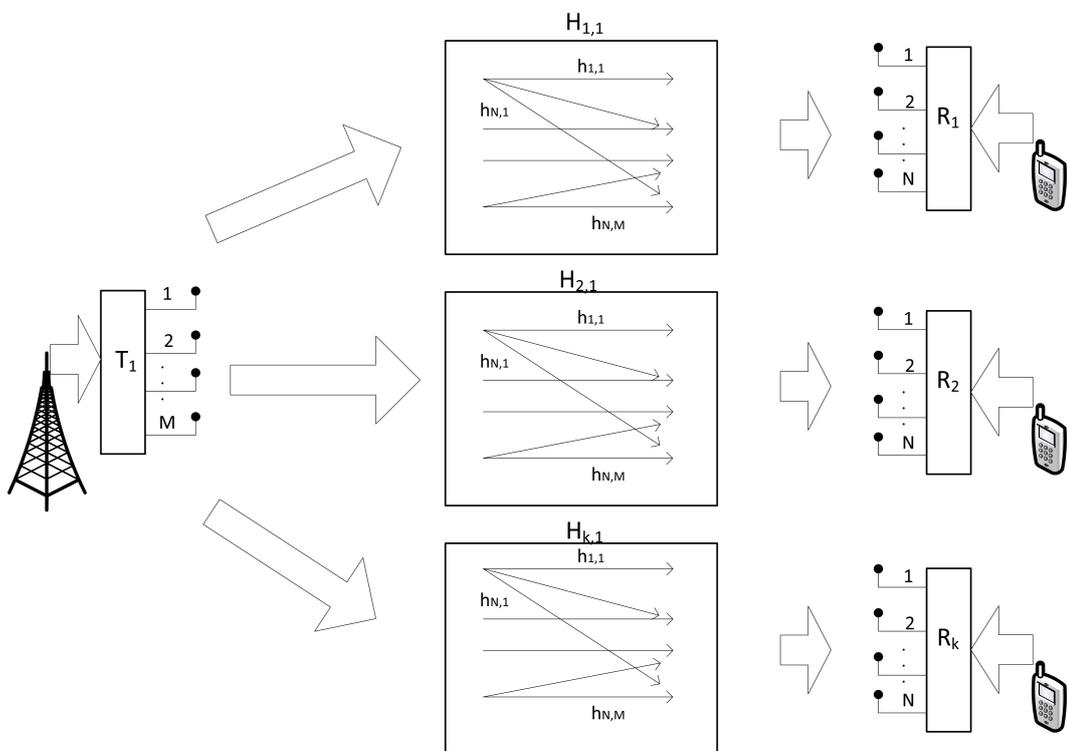


Figura 9 – Célula com canal MIMO Broadcast com 1 transmissor e R_k receptores

Aqui podemos visualizar que a matriz do canal entre o transmissor e os receptores é formada por k sub-matrizes de dimensão $N \times M$, considerando que o transmissor tem M antenas e todos os receptores têm o mesmo número N de antenas. O sinal recebido por cada usuário é dado por

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_{k,1} \mathbf{V} \mathbf{s} + \mathbf{n}_k \quad (3.2)$$

em que \mathbf{y}_k é o vetor recebido pelo receptor R_k e tem dimensão $N \times 1$, $\mathbf{H}_{k,1}$ é a matriz do canal entre o transmissor T_1 e o receptor R_k e tem dimensão $N \times M$, \mathbf{V} é a matriz de pré-codificação com dimensão $M \times d$, d é o número de símbolos de dados destinados aos receptores e \mathbf{s} é o vetor que contém os símbolos de dados a serem transmitidos pelas antenas com dimensão $d \times 1$.

Para o caso particular em que $d = 1$ e $N = 1$, ou seja, o transmissor tem somente um símbolo para transmitir e os receptores possuem somente uma antena, o sinal recebido por usuário pode ser reescrito como

$$y_k = \mathbf{h}_k^T \mathbf{v} s + n_k \quad (3.3)$$

em que $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ corresponde ao canal entre o transmissor e o receptor R_k e $\mathbf{v} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ é o vetor de precodificação. A equação equivalente do sistema em forma matricial, considerando que $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$, $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times M}$ e $\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_K]^T$, fica

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \mathbf{v} s + \mathbf{n} \quad (3.4)$$

Para este caso, embora não haja interferência a ser cancelada, podem ser projetados esquemas de precodificação análogos ao caso MIMO convencional, os quais são descritos a seguir.

Uma forma de pré-codificação é a utilização de filtro casado (MF, do inglês *Matched Filter*), que visa maximizar a SNR média percebida pelos receptores (SILVA, 2008). O vetor de pesos fornecido por este filtro é dado por

$$\mathbf{v}_{\text{MF}} = \beta \mathbf{H}^H \mathbf{1} \quad (3.5)$$

em que o operador $(\cdot)^H$ representa o conjugado transposto de um vetor ou matriz, $\mathbf{1}$ corresponde a um vetor de elementos unitários e β é um escalar que deve ser ajustado de forma a garantir que o limite de potência de transmissão seja respeitado.

Também foi demonstrado em (SILVA, 2008) que é possível projetar um filtro de forçagem a zero para o caso multicast. Neste caso, a restrição de forçagem a zero é equivalente a

exigir que $\mathbf{y}|_{\mathbf{n}=\mathbf{0}} = s\mathbf{1}$, ou seja, que o sinal recebido por cada usuário seja igual a s na ausência de ruído.

$$\mathbf{v}_{ZF} = \beta \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \mathbf{1} \quad (3.6)$$

Outra técnica de precodificação é o MMSE, que é um método que minimiza o erro quadrático médio, o qual é dado por

$$\mathbf{v}_{MMSE} = \beta \left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{K\sigma_k^2}{P} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{1} \quad (3.7)$$

em que P representa a potência disponível para transmissão.

Além destas técnicas, também existem abordagens que procuram maximizar a mínima SNR percebida pelos usuários. Tal problema de otimização é mais complexo e exige a utilização de relaxação semidefinida para se encontrar numericamente a solução do vetor de precodificação. Para o caso mais geral, com múltiplos fluxos de dados e múltiplas antenas nos receptores, é necessário considerar também o projeto de filtros de recepção e o cancelamento da interferência entre os fluxos de dados.

3.2.2 Canal Multicast

O canal MIMO Multicast é formado por um transmissor e Q receptores organizados em grupos, onde cada grupo deseja receber uma informação diferente do transmissor, como foi definido na Seção 2.2.2. Desta forma o transmissor envia mais de um sinal com destino aos diferentes grupos em sua célula, onde o sinal que para um grupo é útil, para o outro é tido como sinal interferente, caracterizando a interferência intergrupo. Aqui a utilização das múltiplas antenas MIMO juntamente com a divisão espacial para o múltiplo acesso (SDMA) serão a chave para a eficiente ocupação dos recursos de rádio disponíveis. O sistema pode ser visto na Figura 5 e a Equação (2.2) descreve o sinal recebido pelo k -ésimo receptor do g -ésimo grupo, com um total de G grupos, lembrando que um receptor individualmente pode ser considerado como um grupo com apenas um elemento. A Figura 10 mostra que apesar de todos os receptores de um grupo receberem o mesmo sinal, para cada receptor uma matriz de canal diferente deve ser considerada a fim de obter os filtros de pré-codificação.

Novamente considerando o caso particular em que $d = 1$ e $N = 1$, a equação do

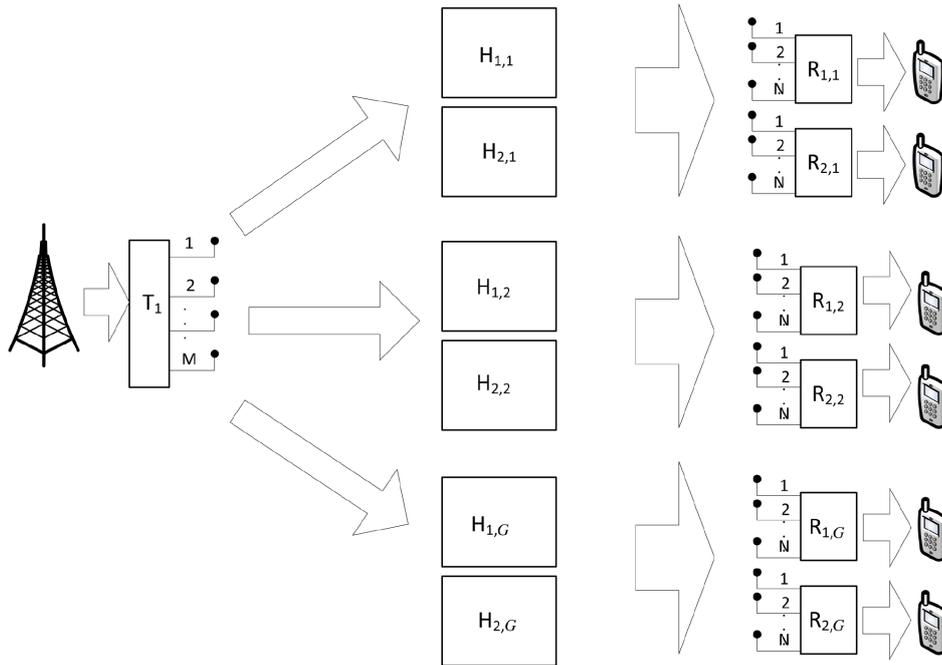


Figura 10 – Canal MIMO Multicast. O transmissor T_1 envia diferentes sinais para os G grupos presentes em sua célula.

sistema neste cenário multicast com múltiplos grupos pode ser escrita como

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{V}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (3.8)$$

em que a diferença com relação a (3.4) é que $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{KG \times 1}$, $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{KG \times M}$, a matriz $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_G] \in \mathbb{C}^{M \times G}$ contém os vetores de precodificação para cada grupo e $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{G \times 1}$ contém os símbolos destinados a cada grupo.

Para auxiliar no projeto dos precodificadores, considera-se que \mathbf{T}^+ é uma matriz de transformação que identifica o número de receptores por grupo (SILVA; KLEIN, 2009), com dimensões $KG \times G$. Para o exemplo dado na Figura 10 ela é definida como

$$\mathbf{T}^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

considerando que temos 3 grupos com 2 receptores cada.

O projeto dos filtros é similar ao da seção anterior, resultando em

$$\mathbf{V}_{MF} = \beta \mathbf{H}^H \mathbf{T}^+ \quad (3.9)$$

$$\mathbf{V}_{ZF} = \beta \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \mathbf{T}^+ \quad (3.10)$$

$$\mathbf{V}_{MMSE} = \beta \left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{KG\sigma_k^2}{P} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{T}^+ \quad (3.11)$$

Em (SILVA; KLEIN, 2009) também são apresentados algoritmos mais eficientes para realizar o cancelamento da interferência entre grupos, classificados como *multicast aware*, os quais são baseados em projeções no espaço nulo.

3.3 Alinhamento de Interferência em Sistemas MIMO Multicast

Um cenário que é habitualmente utilizado na literatura é o canal MIMO interferente (MIMO-IC) com K pares de transmissores e receptores. Quando o alinhamento de interferência é aplicado neste cenário, cada usuário pode transmitir símbolos de dados utilizando metade da capacidade do canal (NORMANDO, 2013; MOREIRA *et al.*, 2014). Para um sistema MIMO multicast com múltiplas células com um grupo de receptores por célula, o alinhamento de interferência pode ser aplicado com a utilização de técnicas de pré-codificação de forma que o sinal indesejado esteja contido no subespaço interferente que é ortogonal ao subespaço que contém o sinal útil, em cada receptor. O IA pode reduzir a interferência, melhorando o desempenho do sistema e aumentando a sua capacidade. No cenário MIMO-IC é conhecido que o IA pode prover uma capacidade para cada usuário dada por

$$\frac{1}{2} \log SNR + o(\log SNR) \quad (3.12)$$

em que $o()$ descreve o comportamento limitante de uma função quando o argumento tende para um valor específico ou para o infinito, e essa capacidade é quase $\frac{K}{2}$ vezes maior que a capacidade somada de esquemas de multiplexação como múltiplo acesso por divisão no tempo (TDMA, do inglês *Time Division Multiple Access*) ou múltiplo acesso por divisão na frequência (FDMA, do inglês *Frequency Division Multiple Access*) (SHEN *et al.*, 2009),

$$\frac{1}{K} \log SNR + o(\log SNR) \quad (3.13)$$

sendo o segundo termo de (3.12) e (3.13) desprezível para altos valores de SNR. O modelo MIMO-IC pode ser visto na Figura 6.

Diferentemente do convencional par 1 transmissor para 1 receptor, no sistema MIMO *multicast single-group* temos células com 1 transmissor para Q receptores, onde o pré-codificador em cada transmissor alinha a interferência em um número maior de receptores indesejados e cada receptor aplica um filtro \mathbf{U}_{lk} com dimensões $N_{lk} \times d_k$ no sinal recebido de forma que sejam cancelados todos os sinais alinhados no subespaço interferente (LIU; YANG, 2013).

Cada receptor tem N_{lk} antenas, que corresponde ao espaço de sinal percebido pelo receptor. Este espaço é dividido em dois subespaços ortogonais, onde o subespaço que tem o sinal desejado tem dimensão d_{lk} , e o subespaço da interferência tem tamanho $p_k = N_{lk} - d_{lk}$. Num cenário com múltiplas células e um grupo por célula (RAO; LAU, 2015), temos que

$$\mathbf{U}_{lk}^H \mathbf{y}_{lk} = \mathbf{U}_{lk}^H \mathbf{H}_{lk,k} \mathbf{V}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{U}_{lk}^H \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K \mathbf{H}_{lk,j} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{U}_{lk}^H \mathbf{n}_{lk}. \quad (3.14)$$

O termo no somatório será nulo no espaço de \mathbf{U}_{lk} e terá um posto¹ (do inglês *rank*) igual ao número d_{lk} de símbolos transmitidos para todos os receptores que não são alvos da transmissão. Este é o número de antenas a mais que o receptor de índice lk deverá ter para cancelar a interferência em adição ao número de antenas que ele necessita para separar seus d_{lk} símbolos se um filtro de forçagem a zero (ZF) for aplicado (MOREIRA *et al.*, 2014). Para diminuir o subespaço que compreende as interferências, o pré-codificador \mathbf{V}_j é calculado, com $j \neq k$, de forma que o termo das interferências abranja um menor subespaço. As condições do alinhamento de interferência são definidas por

$$\mathbf{U}_{lk}^H \mathbf{H}_{lk,j} \mathbf{V}_j = \mathbf{0}, \forall k \neq j, \quad (3.15)$$

$$\text{rank}(\mathbf{U}_{lk}^H \mathbf{H}_{lk,k} \mathbf{V}_k) = d_k, \forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall l \in \{1, 2, \dots, Q\}. \quad (3.16)$$

Para um cenário de exemplo com 3 células contendo um grupo de 2 receptores em

¹ O posto de uma matriz \mathbf{A} é o número de linhas não-nulas quando a mesma está na forma escalonada reduzida por linhas ou, da mesma forma, o número de linhas ou colunas linearmente independentes de \mathbf{A} .

cada uma, deseja-se obter pré-codificadores que sejam soluções do sistema de equações em

$$\begin{aligned}
span(\mathbf{H}_{11,2}\mathbf{V}_2) &= span(\mathbf{H}_{11,3}\mathbf{V}_3) \\
span(\mathbf{H}_{21,2}\mathbf{V}_2) &= span(\mathbf{H}_{21,3}\mathbf{V}_3) \\
span(\mathbf{H}_{12,1}\mathbf{V}_1) &= span(\mathbf{H}_{12,3}\mathbf{V}_3) \\
span(\mathbf{H}_{22,1}\mathbf{V}_1) &= span(\mathbf{H}_{22,3}\mathbf{V}_3) \\
span(\mathbf{H}_{13,1}\mathbf{V}_1) &= span(\mathbf{H}_{13,2}\mathbf{V}_2) \\
span(\mathbf{H}_{23,1}\mathbf{V}_1) &= span(\mathbf{H}_{23,2}\mathbf{V}_2)
\end{aligned} \tag{3.17}$$

em que $span(\mathbf{X})$ indica o subespaço formado pelas colunas de \mathbf{X} . Desta maneira o alinhamento de interferência modela o pré-codificador \mathbf{V}_j de forma que o efeito de aplicá-lo no canal $\mathbf{H}_{lk,j}$ ($k \neq j$) mapeia o sinal transmitido no subespaço interferente dos receptores indesejados. É importante ressaltar que as condições de alinhamento presentes em (3.17) não levam em conta o sinal desejado que o receptor de índice lk espera, ou seja, o sinal desejado não é alinhado apenas dentro do subespaço de sinal válido do receptor lk , mas em todo o espaço de sinal do receptor lk . Assim quando o filtro \mathbf{U}_{lk} do receptor lk cancela a interferência presente no seu subespaço interferente, qualquer energia do sinal útil que estiver presente neste subespaço também será cancelada (MOREIRA *et al.*, 2014). É importante, portanto, reduzir o tamanho do subespaço interferente ao máximo, de forma que a probabilidade de perda de potência do sinal válido seja reduzida. Encontrar a solução do IA está diretamente relacionado com resolver o sistema dado por (3.17).

3.3.1 Graus de liberdade

Em regime de alta SNR, temos que a taxa de crescimento da capacidade de um canal MIMO entre um receptor e um transmissor, com M antenas no transmissor e N antenas no receptor, é dada como sendo o $\min(M, N)\log(SNR)$ (JAFAR; FAKHEREDDIN, 2005). Com isto podemos definir o grau de liberdade (DoF, do inglês *Degree of Freedom*) espacial como sendo o ganho máximo de multiplexação de um sistema MIMO, dado por:

$$\eta \triangleq \lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{C_\sigma(\rho)}{\log(\rho)} \tag{3.18}$$

em que $C_\sigma(\rho)$ é a soma das capacidades em um canal ponto a ponto entre um transmissor e um receptor MIMO com SNR igual a ρ . Trata-se do número de dimensões do espaço de sinal da rede que estão livres de interferência (YETIS *et al.*, 2009). Em um canal MIMO interferente com K usuários (K pares de transmissor e receptor), a quantidade de graus de liberdade em um sistema

com mais de dois pares de receptor e transmissor permanece um problema em aberto, sendo desenvolvidas soluções para esquemas específicos de alinhamento de interferência em diferentes cenários de canais multiusuário, como o canal MIMO broadcast (JAFAR; FAKHEREDDIN, 2005), o canal MIMO X com dois receptores e dois transmissores enviando quatro mensagens diferentes (CADAMBE; JAFAR, 2008) e o canal MIMO multicast (VENKATAKRISHNAN *et al.*, 2014).

3.3.2 Realizabilidade do Sistema

Dado que em cenários com K pares de transmissores e receptores o grau de liberdade não é conhecido para canais com mais de dois pares, normalmente não é viável encontrar uma solução de forma fechada para pré-codificadores nestes esquemas MIMO mais complexos (PETERS; HEATH, 2009). A análise de realizabilidade pode ser feita para o cenário MIMO multiusuário com múltiplos grupos ressaltando algumas propriedades importantes do canal multicast. Considera-se um cenário com K transmissores (T) e QK receptores (R), sendo Q receptores por grupo.

Para determinar se um esquema de alinhamento de interferência em um determinado canal MIMO é realizável, o número de equações e o número de variáveis do sistema correspondente ao esquema IA precisam ser calculados e comparados. Tomando como base o método de identificação de um esquema como sendo realizável ou não proposto em (YETIS *et al.*, 2009), podemos reescrever (3.15) da seguinte forma:

$$(\mathbf{u}_{lk}^{[m]})^H \mathbf{H}_{lk,j} \mathbf{v}_j^{[n]} = 0, \forall k \neq j, \quad (3.19)$$

para

$$(j, k) \in \{1, 2, \dots, K\}, l \in \{1, 2, \dots, Q\} \quad \text{e} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, d_j\}, \forall m \in \{1, 2, \dots, d_{lk}\}$$

em que $\mathbf{u}_{lk}^{[m]}$ e $\mathbf{v}_j^{[n]}$ são as colunas dos filtros dos receptores e dos pré-codificadores, respectivamente. A partir de então, calculamos o número de equações do sistema como sendo

$$N_e = \sum_{l \in Q} \sum_{\substack{k, j \in K \\ j \neq k}} d_{lk} d_j. \quad (3.20)$$

Ainda segundo (YETIS *et al.*, 2009), o cálculo do número de variáveis N_v não é tão direto, sendo necessário retirar da conta as variáveis supérfluas que não ajudam no alinhamento

de interferência. O espaço do sinal dos pré-codificadores em cada transmissor com M_j antenas, depois de removidas as variáveis desnecessárias, soma um total de $d_j(M_j - d_j)$ variáveis. Da mesma forma, no lk -ésimo receptor, o espaço do sinal dos filtros têm um total de $d_{lk}(N_{lk} - d_{lk})$ variáveis. Como resultado, o número total de variáveis na rede é dado por

$$N_v = \sum_{l=1}^Q \sum_{k=1}^K d_{lk}(N_{lk} - d_{lk}) + \sum_{j=1}^K d_j(M_j - d_j) \quad (3.21)$$

Considerando o caso em que todos os transmissores possuem a mesma quantidade de antenas $M_j = M$, todos os receptores possuem a mesma quantidade de antenas $N_{lk} = N$ e cada usuário espera a mesma quantidade de símbolos $d_j = d_{lk} = d$, podemos obter o seguinte número de equações

$$N_e = QK^2d^2 - QKd^2 = QKd^2(K - 1) \quad (3.22)$$

e o número de variáveis se torna

$$N_v = QKd(N - d) + Kd(M - d) \quad (3.23)$$

A condição de realizabilidade é $N_e \leq N_v$, o que resulta em

$$\begin{aligned} Q(K^2d^2 - KdN) &\leq KdM - Kd^2 \\ Q(Kd - N) &\leq M - d \end{aligned} \quad (3.24)$$

Assim, uma vez que $N = Kd$, temos que a condição de realizabilidade se torna independente de Q em (3.24), de forma que podemos aumentar indefinidamente o número Q de usuários por transmissor e o sistema ainda será realizável, bastando que $M \geq d$ (LIU; YANG, 2013).

Quando $N \neq Kd$, temos que o número de usuários por transmissor (tamanho do grupo multicast), Q , já não pode ser arbitrariamente definido, e para alcançar a realizabilidade podemos incrementar o número de antenas no transmissor que será definido em função de Q e d , obedecendo à relação $M \geq Q(Kd - N) + d$. Para um esquema não-realizável com $N = 5$, $K = 3$, $Q = 2$ e $d = 3$ se tornar realizável seria necessário então que cada transmissor tivesse no mínimo 11 antenas. Por outro lado, passando a responsabilidade de modificar a quantidade de antenas para o receptor, e deixando o transmissor com um número suficiente de antenas necessárias para

Tabela 2 – Condições de Realizabilidade para $d = 2$ símbolos e $K = 3$.

Q	N	M
10	6	2
10	5	12
100	6	2
100	5	102
200	6	2
200	5	202
200	4	402

transmitir os seus $d = 3$ *streams*, por exemplo $M = 4$, cada receptor deveria portar no mínimo $Kd = 9$ antenas. A análise do impacto da variação do número de antenas nos elementos e do número de grupos e receptores é apresentada no Capítulo 4. A Tabela 2 mostra a quantidade de antenas necessárias para tornar o esquema realizável dado um número Q de usuários por transmissor, $d = 2$ símbolos e $K = 3$.

Percebemos que se a condição dada em (3.24) for respeitada para $Kd = N$, dado qualquer Q , o número de antenas no transmissor permanece o mesmo para um dado d . Caso contrário, para que a rede seja realizável, o número de antenas no transmissor deverá ser incrementado de acordo com $M \geq Q(Kd - N) + d$, alcançando portanto números da mesma ordem de Q . Uma discussão sobre estes resultados pode ser vista nas Seções 4.3 e 4.4.

3.3.3 Minimização Alternada

O algoritmo de minimização alternada é um método iterativo que pode ser utilizado para se obter o alinhamento da interferência, podendo ser aplicado em diversos esquemas de configuração, dando bastante flexibilidade à técnica do IA. Este algoritmo utiliza o conceito dos subespaços que dividem a dimensão do espaço total visto pelos receptores em dois subespaços: o subespaço que guarda o sinal útil que será recuperado, e o subespaço em que estão contidas as interferências que serão canceladas. O algoritmo, então, alternadamente modifica os subespaços interferentes e os pré-codificadores de forma a executar o alinhamento de interferência.

Considere a definição de distância entre uma matriz \mathbf{A} e um subespaço linear \mathcal{U} , dada por

$$d(\mathbf{A}, \mathcal{U}) = \|\mathbf{A} - \mathbf{U}\mathbf{U}^*\mathbf{A}\|_F^2 \quad (3.25)$$

em que \mathbf{U} é uma base ortonormal de \mathcal{U} e $\|\mathbf{X}\|_F$ é a norma de Frobenius da matriz \mathbf{X} . Esta medida pode ser usada na formulação e solução do problema de otimização do alinhamento de interferência (PETERS; HEATH, 2009), o qual pode ser resolvido através de algoritmos iterativos. Utilizando esta medida, a função objetivo que será aplicada ao algoritmo de minimização alternada e que representa o problema de IA é definida como

$$J = \min_{\substack{\mathbf{V}_j \forall j \\ \mathbf{C}_{lk} \forall lk}} \sum_{l=1}^Q \sum_{k=1}^K \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K \|\mathbf{H}_{lk,j} \mathbf{V}_j - \mathbf{C}_{lk} \mathbf{C}_{lk}^* \mathbf{H}_{lk,j} \mathbf{V}_j\|_F^2 \quad (3.26)$$

em que a matrix \mathbf{C}_{lk} é a base ortonormal para o subespaço interferente recebido. O receptor linear é então formado por $\mathbf{W}_{lk} = \mathbf{I}_{N_{lk}} - \mathbf{C}_{lk} \mathbf{C}_{lk}^H$. A função objetivo J deverá ser minimizada fixando a base ortonormal enquanto se otimiza o pré-codificador e vice-versa, alternadamente, para atingir o valor mínimo. O algoritmo segue o seguinte fluxo:

1. Inicializar \mathbf{V}_j com valores arbitrários $\forall j$
2. Determinar o subespaço interferente como sendo o subespaço contendo a menor quantidade de interferência para o pré-codificador fixado. Para isto, atribui-se o valor das colunas de \mathbf{C}_{lk} como sendo os $N_{lk} - d_{lk}$ autovetores dominantes de $\sum_{j \neq k} \mathbf{H}_{lk,j} \mathbf{V}_j \mathbf{V}_j^* \mathbf{H}_{lk,j}^H \forall lk$
3. Determinar os pré-codificadores alinhando o sinal no novo subespaço interferente dos receptores indesejados fazendo as colunas de \mathbf{V}_j como sendo os autovetores referentes aos d_j menores autovalores de $\sum_l \sum_{k \neq j} \mathbf{H}_{lk,j}^H (\mathbf{I}_{N_{lk}} - \mathbf{C}_{lk} \mathbf{C}_{lk}^H) \mathbf{H}_{lk,j} \forall j$

De forma a minimizar a função objetivo J , os passos 2 e 3 são repetidos até a convergência. Como J é uma função não-negativa e está sendo minimizada nos passos 2 e 3, as iterações sobre esses passos nunca irão incrementar seu valor (PETERS; HEATH, 2009), ou seja, a função converge monotonicamente.

Uma simulação do algoritmo para obter uma relação da soma das capacidades foi realizada. A Figura 11 mostra a evolução da soma das capacidades (bps/Hz) com diferentes valores de SNR para um sistema MIMO multicast onde o alinhamento de interferências é realizável e um sistema onde não é realizável, de acordo com (3.24). A simulação de ambos os esquemas utilizou uma SNR de 20 dB e $K = 3$ transmissores. Para o esquema realizável foram transmitidos 2 símbolos e atribuídas 2 antenas no transmissor e 6 antenas nos receptores. Já no esquema não realizável foram utilizadas 3 antenas nos transmissores e 5 antenas nos receptores, e cada transmissor enviou 3 símbolos. A Figura 11 mostra uma diferença crescente entre a soma das capacidades para os dois esquemas com relação ao crescimento do número de receptores.

Vemos que com o aumento do número de receptores por transmissor existe um crescimento na soma da capacidade do esquema realizável na mesma ordem, enquanto que na topologia não-realizável não há um ganho significativo de capacidade com o acréscimo de receptores.

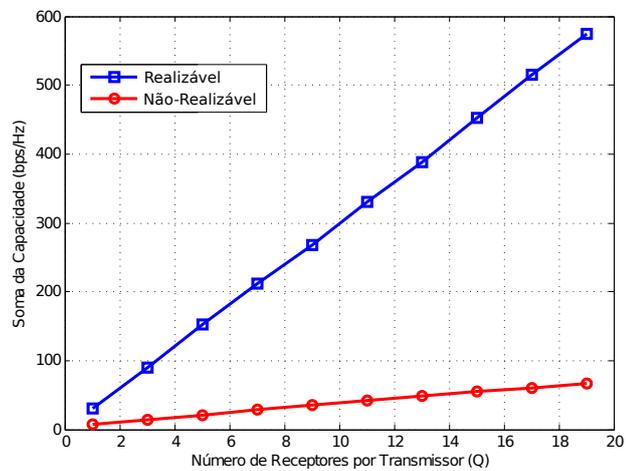


Figura 11 – Evolução da soma das capacidades com o número de receptores por transmissor (tamanho do grupo multicast).

4 SIMULAÇÕES

Neste capítulo, o desempenho dos algoritmos desenvolvidos para realizar as técnicas de cancelamento de interferência apresentados nas Seções 3.2.1 e 3.2.2 são avaliados por meio de simulações computacionais. O algoritmo de minimização alternada foi utilizado para simular a técnica do alinhamento de interferência. Os algoritmos utilizados para simular as técnicas de forçagem a zero, minimização do erro quadrático médio e filtro casado foram implementados em um cenário de coordenação multi-ponto (CoMP, do inglês *Coordinated Multi Point*), ou MIMO cooperativo para fazer uma comparação de desempenho.

4.1 CoMP

Para analisar o desempenho do algoritmos implementados, foram estabelecidos alguns cenários de canais MIMO, onde é possível comparar como as diferentes técnicas de cancelamento de interferência se adaptam ao problema de cada cenário. O desempenho da técnica de alinhamento de interferência foi comparado com outras técnicas estudadas na literatura que foram implementadas sobre uma arquitetura de coordenação multi-ponto. O CoMP foi realizado utilizando, para cada cenário, um conjunto de células compostas de um transmissor e n receptores, a depender do cenário simulado.

O modelo CoMP considerado é formado por um conjunto de células separadas geograficamente, com apenas um transmissor por célula localizado em seu centro. Dentro de cada célula estão os receptores em diferentes localizações. A este conjunto de células damos o nome de *cluster*, onde os transmissores destas células possuem um canal de interconexão de alta velocidade, chamado de *backhaul*, que permite o processamento conjunto dos sinais que cada transmissor irá enviar para seus respectivos destinatários, ou seja, existe a troca de informações entre as células de forma a conseguir grandes ganhos na eficiência espectral, e portanto, aumento na capacidade do canal (MARSCH; FETTWEIS, 2011). O aumento da capacidade conseguido com o CoMP está então diretamente relacionado ao aumento da taxa de dados no *backhaul* e, para efeito de simulação, não foram considerados o tráfego de dados no *backhaul* e foi assumida perfeita sincronização entre os transmissores. Com esta relação de cooperação entre os transmissores, estes conseguem assim montar suas matrizes de pré-codificação de forma a realizar o cancelamento da interferência em todos os receptores indesejados. Para efeito de

referência este modelo será denominado de arquitetura CoMP no decorrer deste capítulo.

4.2 Cenários Simulados Para Comparação de Algoritmos

De forma a obter resultados para comparar os algoritmos apresentadas nas Seções 3.2.1 e 3.2.2, foram estabelecidos três configurações iniciais de distribuição de receptores em grupos dentro das células para simular o algoritmo de alinhamento e os algoritmos de cancelamento de interferência, respectivamente. A partir das três configurações de distribuição de receptores foram criados dois cenários para cada uma delas onde foram variados os parâmetros das antenas nos receptores e nos transmissores, totalizando seis cenários para serem simulados. Para ficar mais fácil de identificar a configuração da distribuição dos receptores a Tabela 3 traz na sua coluna G a representação dos cenários de forma mais simplificada. Por exemplo, $\{1, 1, 2\}$ significa que temos três células com um receptor na primeira e na segunda célula e dois receptores na terceira. Para todos os cenários o número de antenas foi variado de forma que as regras de realizabilidade apresentadas na Seção 3.3.2 fossem cumpridas. Foram considerados nas simulações a modulação QPSK (do inglês *Quadrature Phase-Shift Keying*), a transmissão de um símbolo por usuário utilizando um canal com linha de visada direta (LOS, do inglês *Line of Sight Channel*) e os receptores foram considerados a uma mesma distância do transmissor.

Tabela 3 – Configuração dos cenários simulados para aplicar o Alinhamento de Interferência.

Cenário	G	Núm. Tx	Antenas T_x	Antenas R_x	Núm. Total de R_x
1	$\{1, 1, 2\}$	3	9	3	4
2	$\{1, 1, 2\}$	3	6	2	4
3	$\{2, 2, 2\}$	3	9	3	6
4	$\{2, 2, 2\}$	3	6	2	6
5	$\{3, 3\}$	2	6	3	6
6	$\{3, 3\}$	2	4	2	6

Para o caso do alinhamento de interferência no canal multicast, as configurações definidas na Tabela 3 são implementadas sobre um número de células igual ao número de transmissores dado na coluna *Núm. Tx* e cada célula contendo grupos definidos na coluna G , sendo a quantidade de grupos e o número de antenas do transmissor e dos receptores definidos na Tabela 3 para cada cenário. Como exemplo, tomamos o cenário número dois da Tabela 3 para aplicar o algoritmo de alinhamento de interferência. Neste cenário a Tabela 3 nos mostra que temos três células, com cada transmissor portando $M = 6$ antenas e temos quatro receptores

no sistema que estão equipados com $N = 2$ antenas. Ainda de acordo com a coluna G , que é definida como $\{1, 1, 2\}$, estes receptores estão divididos entre as três células, onde a primeira e a segunda célula possuem um receptor e a terceira possui dois receptores, sendo que os dois receptores desejam receber o mesmo sinal, caracterizando o canal multicast. A Figura 12 ilustra este exemplo, onde temos um sistema com múltiplos grupos como definido na seção 2.2.2, formando um canal multicast entre transmissor e seus receptores.

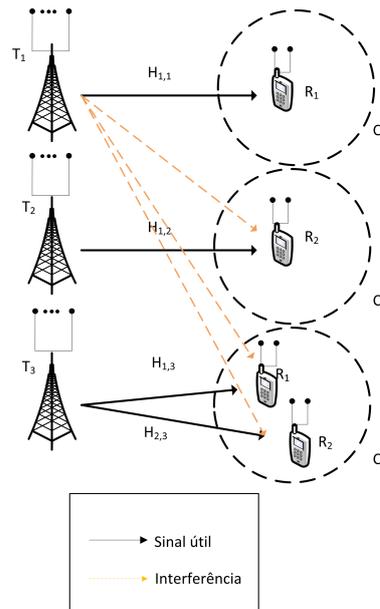


Figura 12 – Representação do cenário 2: Três células, onde a terceira possui 2 usuários.

Com o intuito de efetuar a simulação das técnicas de cancelamento de interferência utilizando a arquitetura CoMP devemos fazer algumas considerações para que os desempenhos dos algoritmos possam ser comparados de forma justa. Tomando novamente o cenário número dois como exemplo, o número de antenas nos receptores é definido conforme a configuração dada pela Tabela 3. De forma que a arquitetura CoMP seja caracterizada, cada célula contará com um transmissor e estarão interconectadas por um *backhaul* de alta velocidade. Os transmissores por sua vez estarão equipados com a quantidade de antenas definida na coluna *Antenas Tx*. Assim, de acordo com a coluna G temos três células, onde a primeira e a segunda células ambas tem um receptor, e a terceira célula contém dois receptores com duas antenas cada.

4.2.1 Configuração $\{1,1,2\}$

Os dois primeiros cenários foram simulados considerando a distribuição $\{1,1,2\}$, variando o número de antenas presentes nos transmissores e receptores. Criando as células com

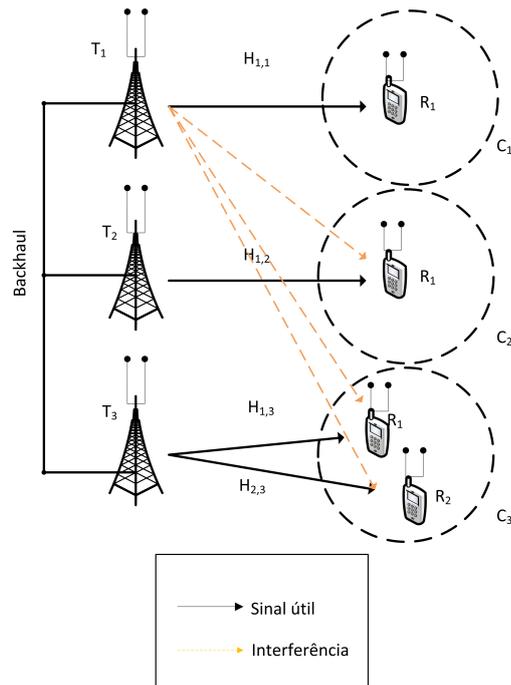


Figura 13 – O cenário 2 sendo agora representado na arquitetura CoMP.

grupos de receptores definidos como na Tabela 3 e apresentado na Figura 12, foram realizadas diferentes simulações onde os transmissores contaram com M igual a nove ou seis antenas e os receptores com N igual a três ou duas antenas, respectivamente. A interferência neste cenário é composta pelos sinais que um transmissor envia para os receptores presentes nos grupos de sua célula por meio de um canal de comunicação multicast como definido na Seção 2.3.1. Para uma célula com grupo como mostrado neste cenário, o sinal recebido por um receptor em um determinado grupo é dado por (2.4).

Todos os receptores das células vizinhas estão experimentando estes sinais que não foram destinados a eles em sobreposição aos sinais que eles desejam efetivamente receber. O sinal que não for destinado a um receptor qualquer, neste caso, é tratado como interferência inter-célula e está definida no segundo termo da Equação (2.4), e um equalizador de forçagem a zero pode ser aplicado em cada receptor de forma a eliminar os efeitos do canal sobre o sinal do transmissor desejado. O efeito do alinhamento de interferência para este cenário está representado na Figura 14, onde o sinal interferente é ilustrado como a interferência inter-célula (ICI, do inglês *Inter Cell Interference*).

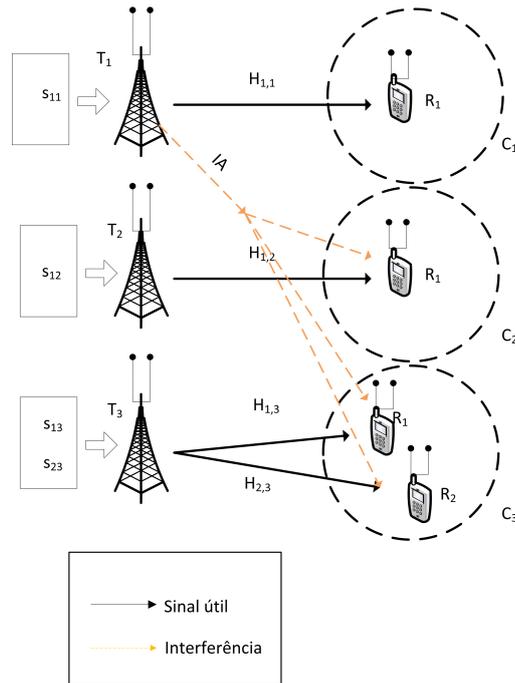
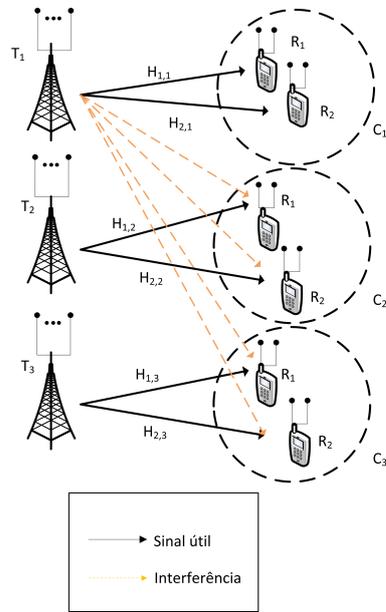


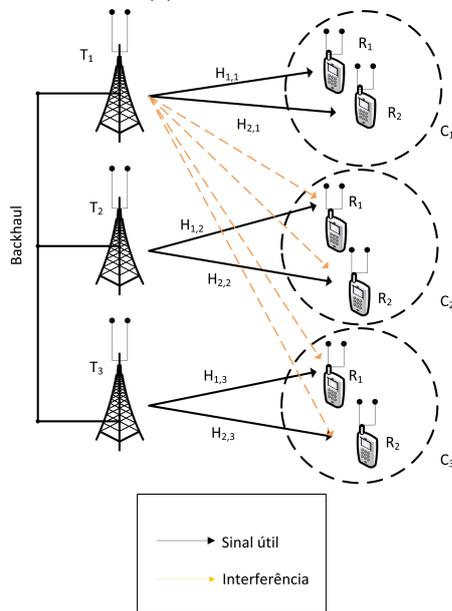
Figura 14 – Transmissor e receptores para a configuração {1,1,2}.

4.2.2 Configuração {2,2,2}

A Figura 15-a mostra a representação do canal multicast com três células contendo dois receptores com duas antenas cada e os transmissores portando seis antenas. Na arquitetura CoMP são definidos três células com dois receptores (Figura 15-b) e cada transmissor possui seis antenas conforme a Tabela 3.



(a) Cenário 4.

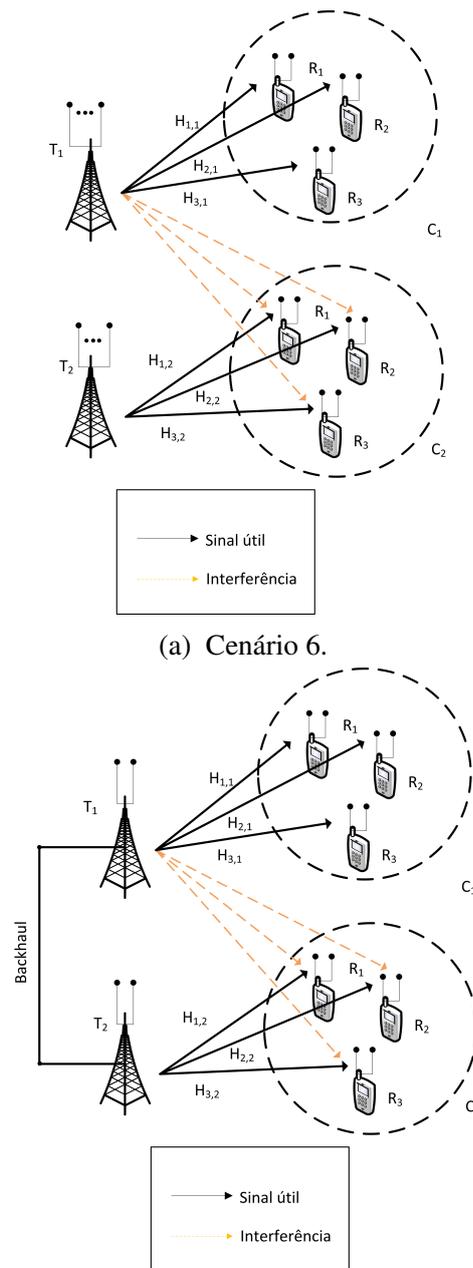


(b) O Cenário 4 na arquitetura CoMP.

Figura 15 – Representação do cenário número quatro: $\{2,2,2\}$, $M = 6$, $N = 2$.

4.2.3 Configuração {3,3}

Da mesma forma que nas configurações anteriores, como exemplo da configuração {3,3} utilizamos o cenário número seis, exemplificado na Figura 16-a que mostra a representação do canal multicast com duas células contendo três receptores, cada um esperando o mesmo sinal de seu transmissor. Na arquitetura CoMP com seus dois transmissores coordenados temos sua representação no item *b*.



(a) Cenário 6.

(b) O Cenário 6 na arquitetura CoMP.

Figura 16 – Representação do cenário número seis: {3,3}, $M = 4$, $N = 2$.

4.2.4 Eficiência espectral e taxa de erro de bit

As taxas de erro de bit foram calculadas sobre a média de todos os receptores e sobre um grande número de realizações de canal, sendo feitas tanto para a simulação dos algoritmos da arquitetura CoMP quanto para o algoritmo de minimização alternada aplicado ao alinhamento de interferência multicast. O cenário número um foi simulado com as configurações $M = 9$ e $N = 3$ e o gráfico da taxa de erro de bit incluindo todos os algoritmos do cenário número um foi plotado na Figura 17, onde a legenda para os algoritmos é definida por: minimização alternada (IAAM), forçagem a zero (ZF), filtro casado (MFIL) e mínimo erro quadrático médio (MMSE).

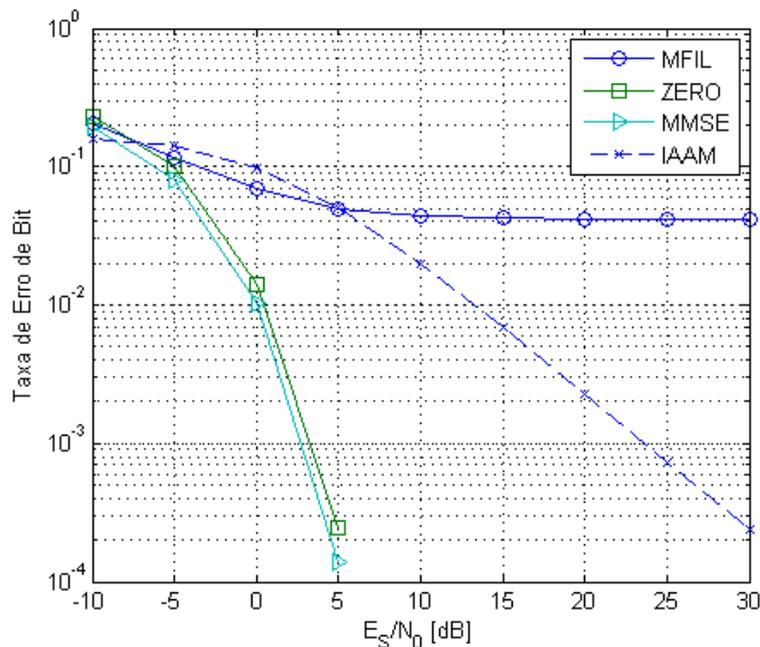


Figura 17 – Transmissor e receptores com $M = 9$ e $N = 3$.

Na Figura 18 se encontra a evolução da BER com relação a diferentes níveis de SNR para o cenário número dois, onde na arquitetura multicast o transmissor contou com $M = 6$ antenas. Os receptores contaram com $N = 2$ antenas.

Aqui podemos ver um aumento na taxa de erro de bit relacionado à redução de antenas nos transmissores e receptores ao passar do cenário um para o cenário dois. O transmissor da Figura 17 tinha nove antenas e na Figura 18 tem apenas seis. Desta forma vemos que a taxa de erro de bit tende a diminuir conforme se aumenta o número de antenas nos transmissores e receptores. Uma análise diferenciada da variação de antenas em transmissores e receptores

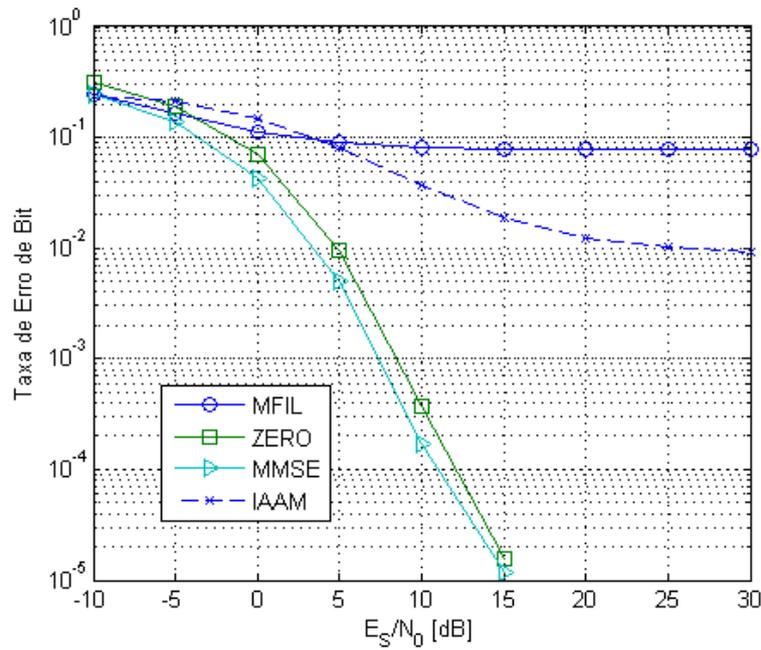
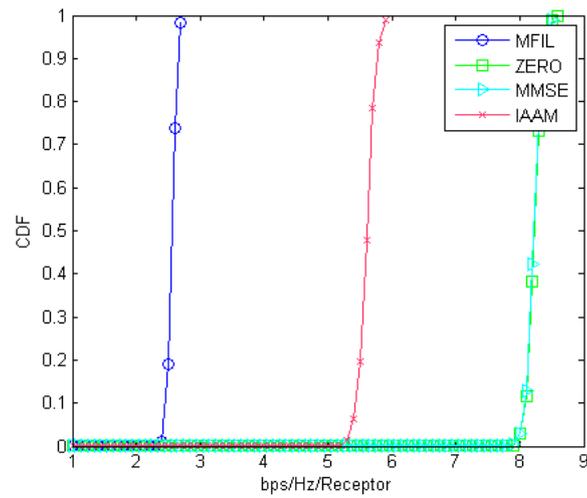
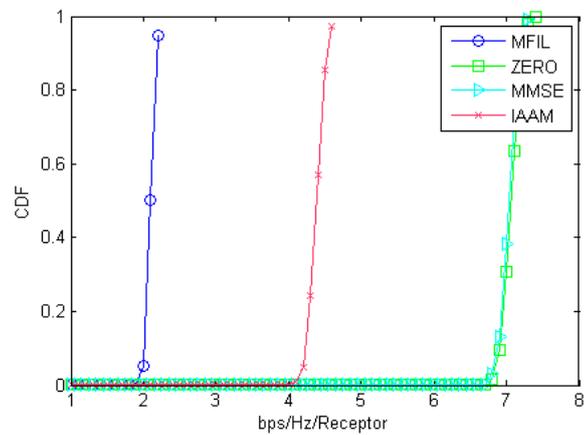


Figura 18 – Taxa de erro de bit para o cenário número dois, com $M = 6$ e $N = 2$.

é apresentada na Seção 4.3. A eficiência espectral média, que é a média da vazão máxima do canal dividida pela largura de banda para cada receptor foi calculada e plotada em sua função de distribuição acumulada (CDF, do inglês *Cumulative Distribution Function*) para cada cenário de forma a obter uma visualização de quão eficientes os algoritmos são para determinado cenário. A Figura 19 mostra que a eficiência espectral alcançada no primeiro e no segundo cenário, considerando uma SNR fixa em 15 dB, cresce com o aumento do número de antenas.

(a) Cenário número um: $M = 9, N = 3$.(b) Cenário número dois: $M = 6, N = 2$.Figura 19 – Eficiência espectral média, com $E_S/N_0 = 15$ [dB]

Nos demais cenários de simulação, o alinhamento de interferência foi executado em células com o número de grupos, receptores e antenas definidos pela Tabela 3. As simulações foram feitas considerando a arquitetura CoMP para os cenários abordados e o desempenho das técnicas foi avaliado com a vazão máxima dada pela eficiência espectral média e pela taxa de erro de bit. A Figura 20 mostra como a BER se comporta em cada cenário para os cenários analisados e a Figura 21 mostra a função de distribuição acumulada da eficiência espectral em todos os cenários para uma SNR fixa em 15 dB.

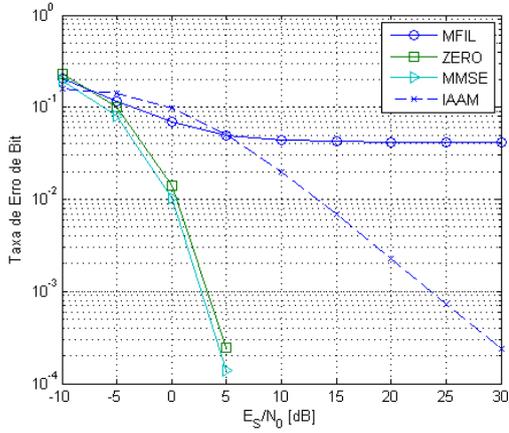
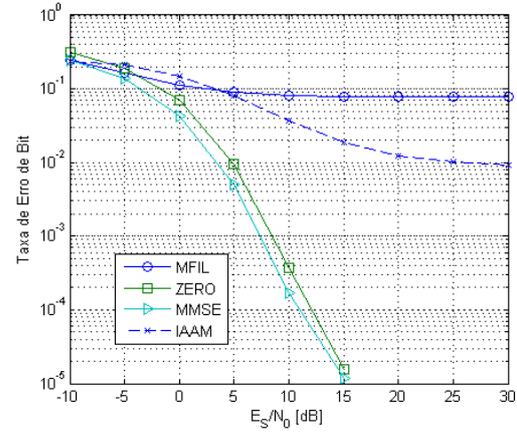
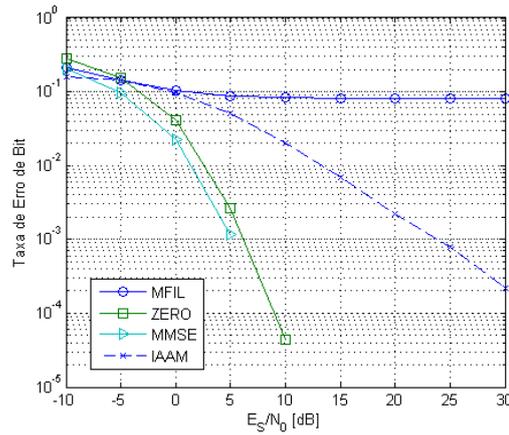
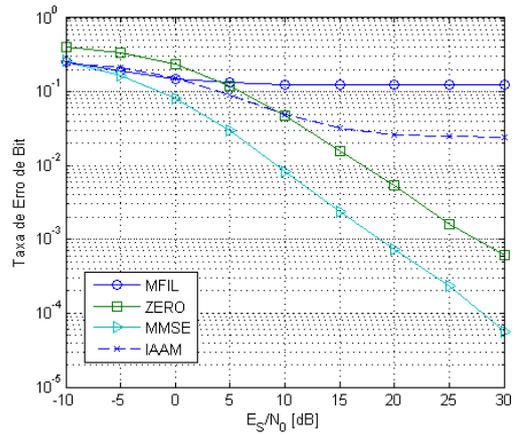
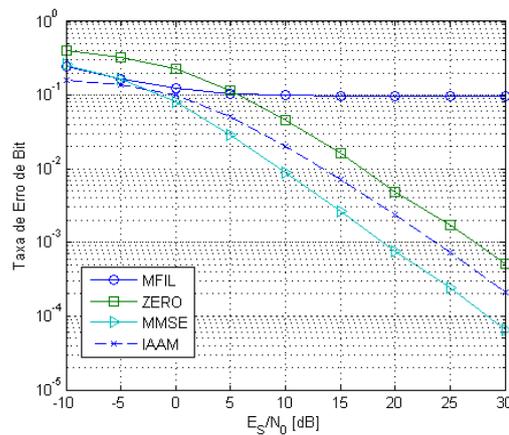
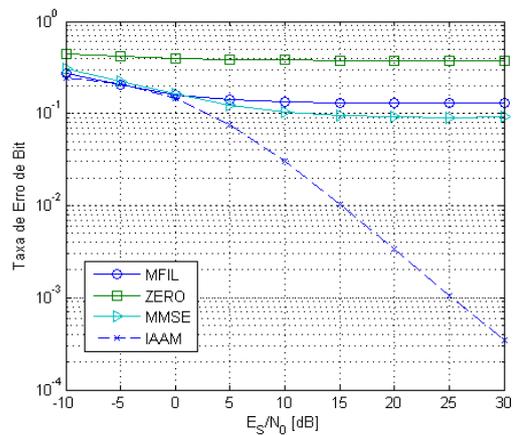
(a) Cenário 1: $\{1,1,2\}$, $M = 9$, $N = 3$.(b) Cenário 2: $\{1,1,2\}$, $M = 6$, $N = 2$.(c) Cenário 3: $\{2,2,2\}$, $M = 9$, $N = 3$.(d) Cenário 4: $\{2,2,2\}$, $M = 6$, $N = 2$.(e) Cenário 5: $\{3,3\}$, $M = 6$, $N = 3$.(f) Cenário 6: $\{3,3\}$, $M = 4$, $N = 2$.

Figura 20 – Evolução da taxa de erro de bit para vários valores de SNR.

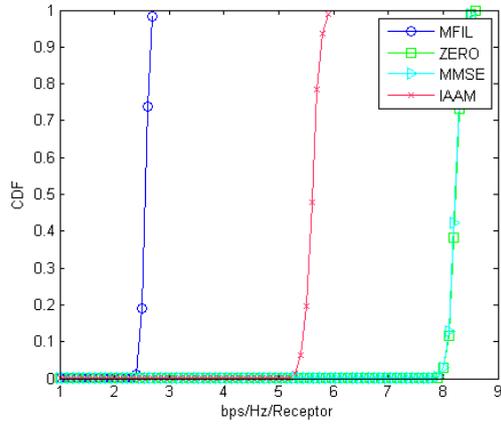
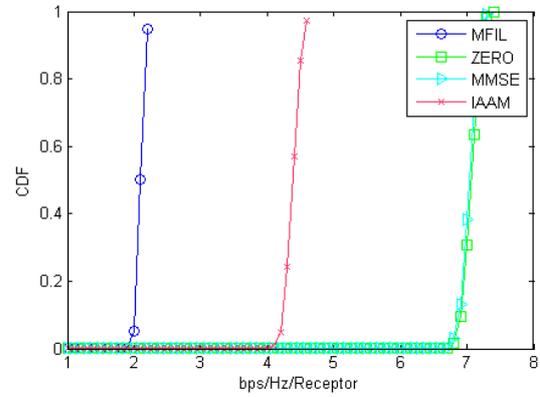
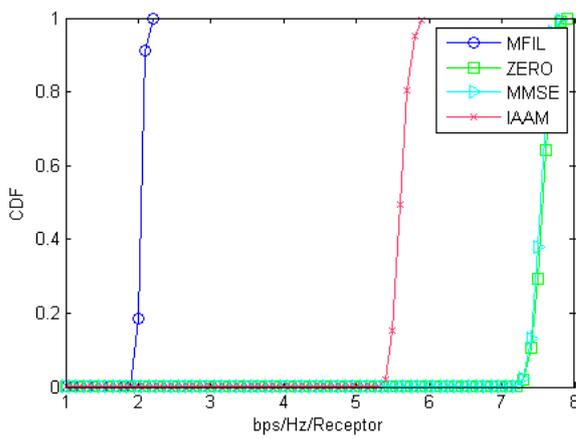
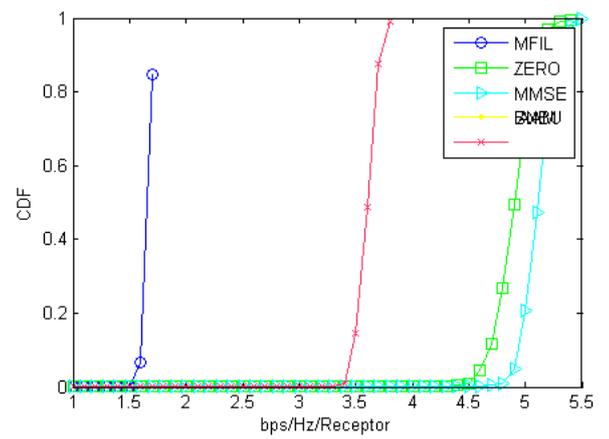
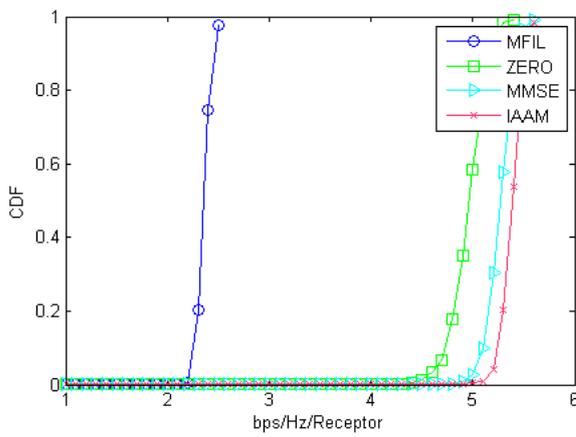
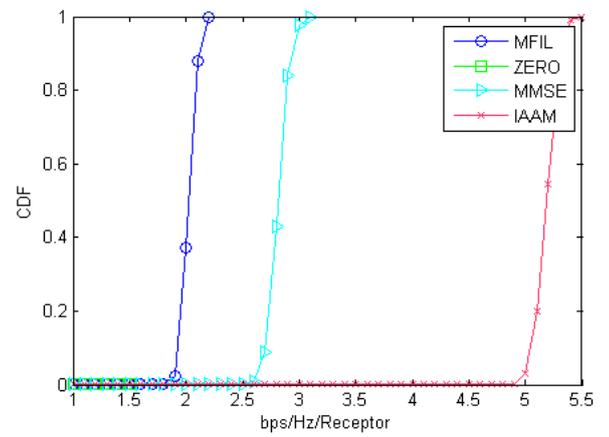
(a) Cenário 1: $\{1,1,2\}$, $M = 9$, $N = 3$.(b) Cenário 2: $\{1,1,2\}$, $M = 6$, $N = 2$.(c) Cenário 3: $\{2,2,2\}$, $M = 9$, $N = 3$.(d) Cenário 4: $\{2,2,2\}$, $M = 6$, $N = 2$.(e) Cenário 5: $\{3,3\}$, $M = 6$, $N = 3$.(f) Cenário 6: $\{3,3\}$, $M = 4$, $N = 2$.

Figura 21 – Eficiência espectral para todos os cenários da Tabela 3. $E_S/N_0 = 15$ [dB].

4.3 Análise do Algoritmo de IA com a variação do número de antenas

Nesta seção foram realizadas novas simulações com cenários diferentes para o algoritmo da minimização alternada aplicado ao alinhamento de interferência. A motivação é identificar de que forma a variação no número de antenas nos receptores afeta a performance do sistema, mantendo o número de antenas nos transmissores e as configurações dos grupos inalteradas. A análise contrária, considerando a variação no número de antenas nos transmissores também foi realizada. Os cenários utilizados estão definidos nas Tabelas 4 e 5, onde para todos os cenários foi considerada igual configuração de células. Neste caso a coluna G das tabelas citadas representa o número de grupos e receptores dentro dos grupos, isto é, são consideradas três células (cada uma correspondendo a um grupo), e em cada célula dois receptores com o número de antenas correspondentes. Cada célula contou com um transmissor com o número de antenas descrito nas tabelas.

Tabela 4 – Variação do número de antenas nos receptores.

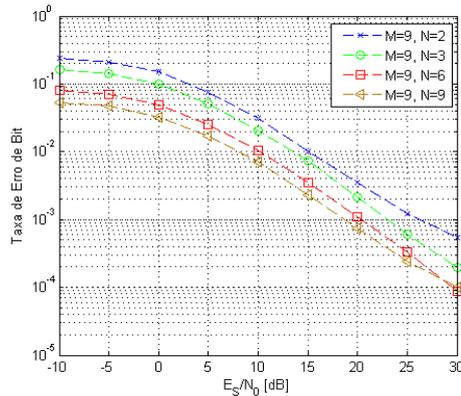
Cenário	G	Núm. Tx	Antenas T_x	Antenas R_x
1	{2,2,2}	3	9	2
2	{2,2,2}	3	9	3
3	{2,2,2}	3	9	6
4	{2,2,2}	3	9	9
5	{2,2,2}	3	3	3
6	{2,2,2}	3	3	6
7	{2,2,2}	3	3	9
8	{2,2,2}	3	3	12

Tabela 5 – Variação do número de antenas nos transmissores.

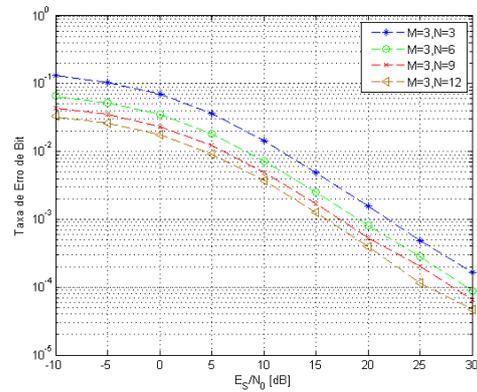
Cenário	G	Núm. Tx	Antenas T_x	Antenas R_x
1	{2,2,2}	3	3	3
2	{2,2,2}	3	6	3
3	{2,2,2}	3	9	3
4	{2,2,2}	3	12	3
5	{2,2,2}	3	2	9
6	{2,2,2}	3	3	9
7	{2,2,2}	3	6	9
8	{2,2,2}	3	9	9

Em ambos os casos, foi respeitada a condição de realizabilidade dada pela Equação

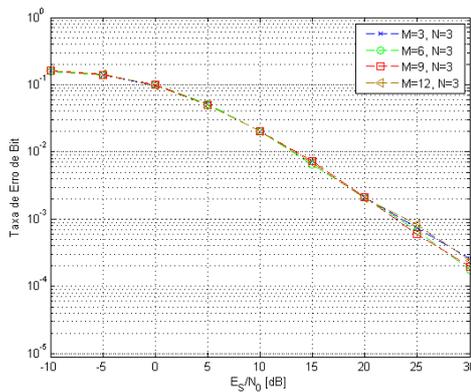
(3.24), haja visto que um símbolo por grupo foi transmitido. Os resultados de taxa de erro de bit estão apresentados na Figura 22.



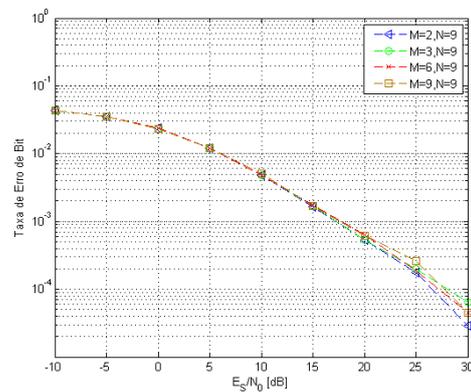
(a) Variação no número de antenas dos receptores. Cenários 1 a 4 da Tabela 4.



(b) Variação no número de antenas dos receptores. Cenários 5 a 8 da Tabela 4.



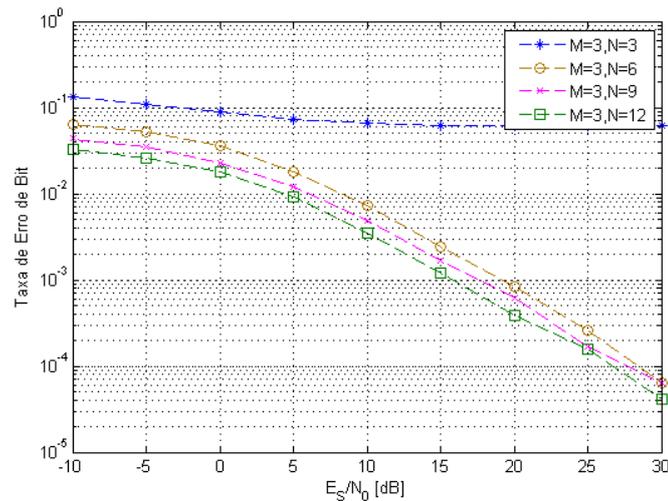
(c) Variação no número de antenas do transmissor.



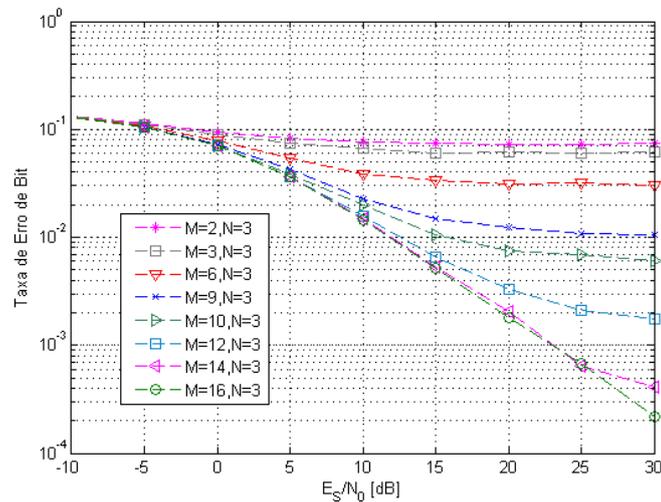
(d) Variação no número de antenas do transmissor.

Figura 22 – Impacto da variação do número de antenas nos receptores e transmissores.

Para analisar o caso em que a condição de realizabilidade não é satisfeita, repetimos as simulações nos cenários número 5 a 8 dados pela tabela 4, modificando apenas o número de transmissores de três para cinco mantendo os demais parâmetros inalterados. A Figura 23 apresenta o resultado para tais cenários. Pode-se ver a evolução da taxa de erro de bit em um sistema que inicialmente é não realizável, dada a quantidade de transmissores e o insuficiente número de antenas nos receptores. Conforme se aumenta o número de antenas nos receptores o alinhamento de interferência consegue alinhar o sinal interferente destes transmissores em cada receptor em seu subespaço de interferência, de forma que os receptores estão aptos a identificar o sinal útil. Quando o número de antenas dos receptores aumenta, a condição de realizabilidade vai se aproximando do ideal e a taxa de erro de bit cai, como pode ser visto na Figura 23a.



(a) Impacto da variação do número de antenas nos receptores.



(b) Impacto da variação do número de antenas nos transmissores.

Figura 23 – Impacto da variação do número de antenas nos receptores e transmissores considerando cinco células (grupos).

Vale salientar que, como definido em (YETIS *et al.*, 2009), a condição de realizabilidade é um indicador de que o sistema é *quase certamente* realizável ou *quase certamente* não realizável, assim a Figura 23a mostra que o sistema vai melhorando a performance em concordância com a condição de realizabilidade da Equação (3.24). A Figura 23b mostra o comportamento do sistema quando o número de antenas do transmissor é variado. Da mesma forma que a variação de antenas nos receptores, a taxa de erro de bit melhora com o aumento do número de antenas, sendo que neste caso é preciso um número maior de antenas nos transmissores

4.4 Análise do Algoritmo de IA com a variação do número de grupos e receptores

Nesta seção é considerado o caso em que é possível haver múltiplos grupos *multicast* dentro de cada célula. Aqui é feita uma análise da variação do número de receptores por grupo, deixando fixas as demais variáveis do sistema, como o número de transmissores e o número de antenas dos elementos. Também é feita a variação do número de grupos por célula, deixando fixa a quantidade de receptores por grupo e as demais variáveis. A Figura 24 mostra o resultado da variação do número de receptores dentro dos grupos, respeitando as condições de realizabilidade. As Tabelas 6 e 7 define as configurações da rede utilizadas nestas simulações.

Tabela 6 – Variação do número de grupos por célula.

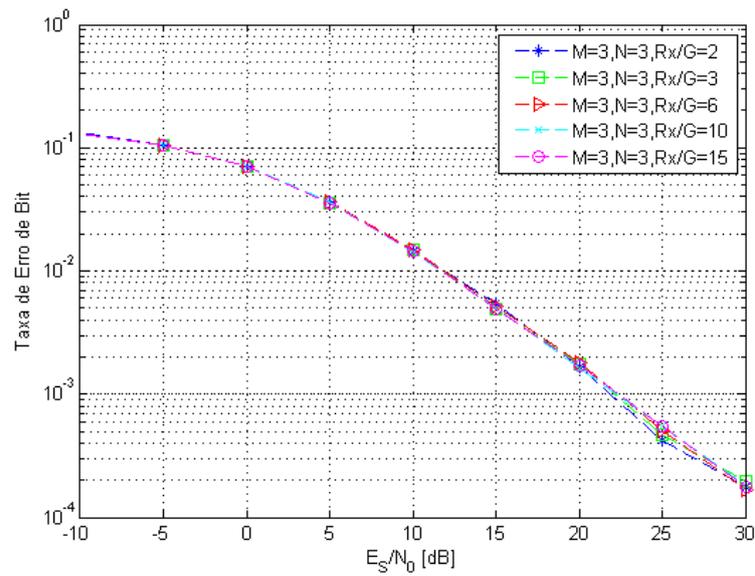
Cenário	Qtd. Grupos	Núm. T_x	Antenas T_x	Antenas R_x
1	2	3	3	3
2	3	3	3	3
3	6	3	3	3
4	10	3	3	3
5	15	3	3	3

Tabela 7 – Variação do número de receptores por grupo.

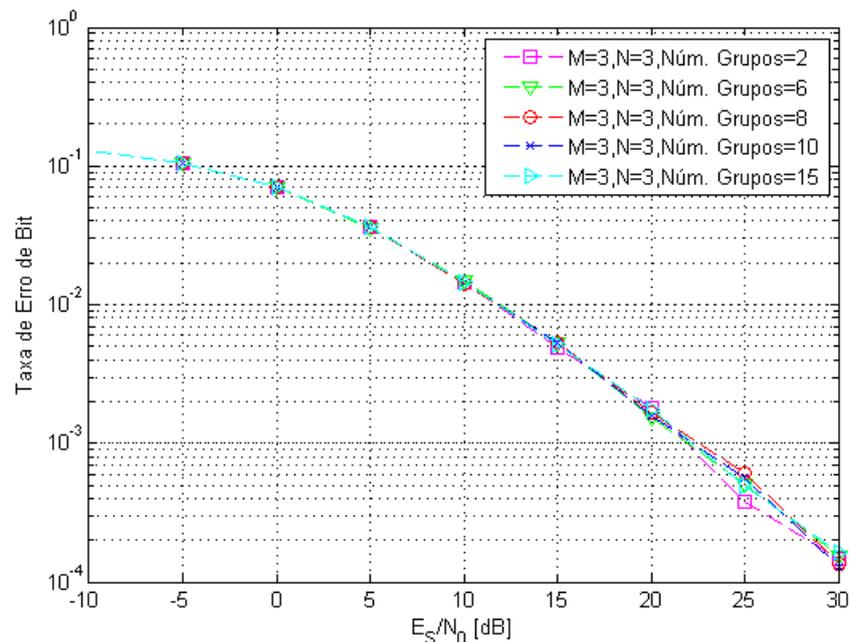
Cenário	Qtd. Grupos	Núm. T_x	Antenas T_x	Núm. R_x /Grupo	Antenas R_x
1	2	3	3	2	3
2	2	3	3	3	3
3	2	3	3	6	3
4	2	3	3	10	3
5	2	3	3	15	3

Considerando agora que a rede não respeita a condição de realizabilidade, analisamos qual o impacto da variação dos receptores e grupos para o sistema. Tornar o sistema não realizável requer quebrar a condição da Equação (3.24), o que foi feito alterando o número de transmissores de três para cinco no sistema. Podemos com essa alteração avaliar o impacto da variação do número de receptores e grupos quando o alinhamento de interferência não é garantido. A Figura 25 mostra este resultado.

Na Figura 25-a vemos que para um sistema não realizável a inserção de novos receptores em um mesmo grupo não afeta consideravelmente o desempenho, da mesma forma que no caso do sistema realizável da Figura 24-a, porém percebemos que o aumento no número



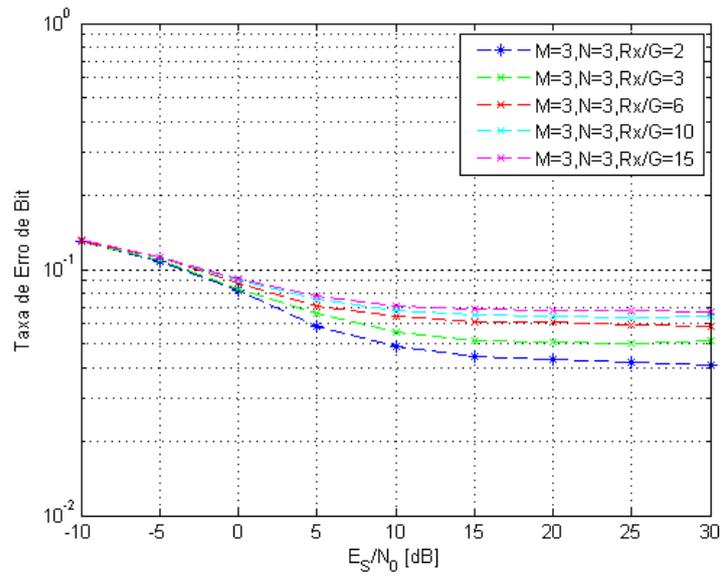
(a) Variação do número de receptores por grupo ($R_x/grupo$). Total de grupos = 3.



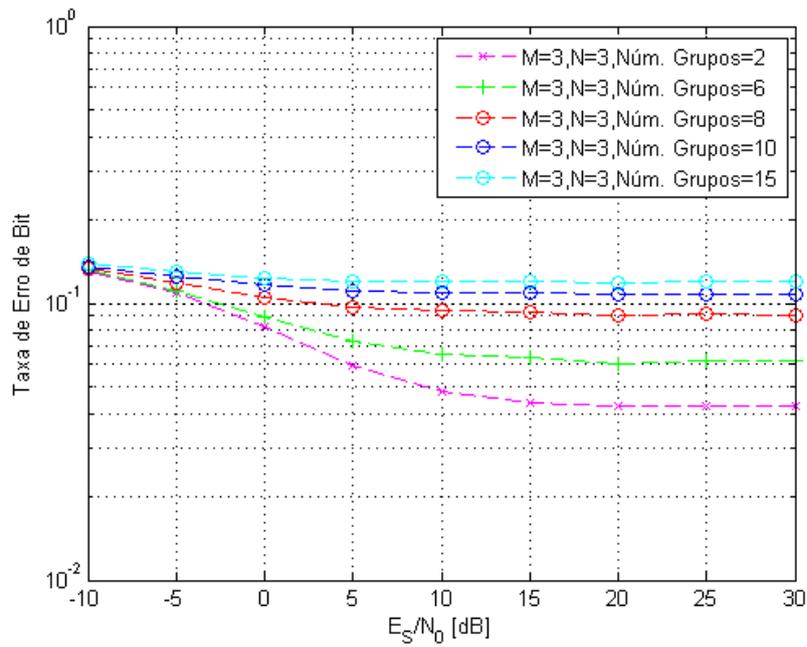
(b) Variação no número de grupos. $R_x/Grupo = 2, M = 9, N = 3$

Figura 24 – Impacto da variação do número de receptores e grupos.

de receptores tende a aumentar a taxa de erro de bit. A variação do número de grupos também mostrou um impacto relativamente baixo para um sistema não realizável. Vemos que conforme se aumenta o número de grupos por célula, mais alta fica a taxa de erro de bit. A solução para um sistema com muitos transmissores e muitos receptores considerando a quantidade de antenas seria então incrementar o número de antenas nos receptores ou aumentar consideravelmente o



(a) Variação do número de receptores por grupo ($R_x/grupo$). Total de grupos = 3.



(b) Variação no número de grupos. $R_x/Grupo = 2, M = 9, N = 3$

Figura 25 – Impacto da variação do número de receptores e grupos quando o sistema não é realizável.

número de antenas nas bases transmissoras.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são feitas as considerações finais e são apresentadas algumas possibilidades de trabalhos futuros na área do tema discutido.

5.1 Considerações Finais

O principal objetivo deste trabalho foi realizar uma análise sobre a aplicação da técnica de alinhamento de interferência por meio do algoritmo de minimização alternada ao canal MIMO multicast. Foram levantados os requisitos para que uma rede MIMO multicast possa utilizar o alinhamento de interferência com relação ao número de antenas e de elementos presentes no sistema.

Para referenciar o desempenho do IA foram realizadas simulações com algoritmos de cancelamento de interferência comumente utilizados na literatura, como o filtro casado e o mínimo erro quadrático médio, aplicados a um sistema de processamento conjunto, CoMP, de forma a obter resultados que demonstrem a eficiência ou não em determinados cenários do IA. Através de simulações computacionais foram feitas análises sobre o impacto que o número de grupos ou de receptores por grupo podem causar no desempenho do sistema, utilizando a métrica da taxa de erro de bit e da eficiência espectral para exibir este impacto. Uma análise da variação do número de antenas nos elementos também foi realizada e os resultados mostraram que em um sistema MIMO multicast realizável é possível aumentar o número de grupos e de usuários por grupo que ainda assim o alinhamento de interferência garante uma boa taxa de erro de bit. O aumento do número de antenas dos transmissores, mantendo a condição de realizabilidade, não mostrou trazer ganho significativo ao sistema. O aumento no número de antenas nos receptores, porém, mostrou melhorar a taxa de erro de bit de forma considerável. Partindo de um sistema não realizável, o acréscimo de antenas nos transmissores ou nos receptores mostrou melhorar a eficiência do sistema, porém os transmissores necessitam de um número maior de antenas para alcançar uma taxa de erro de bit ótima, da ordem de 10^{-4} . O IA mostrou um comportamento estável comparado com os outros algoritmos de cancelamento de interferência, mantendo uma taxa de erro de bit aceitável para diferentes cenários realizáveis com variações de grupos, receptores e antenas. Em um cenário mais realista o alinhamento de interferência se mostrou uma boa solução em sistemas com elevado número de receptores e grupos multicast, mas

em contrapartida, devido à utilização da dimensão espacial, o número de antenas dos receptores deve aumentar sempre que novos transmissores são inseridos no sistema para que seja possível extrair o sinal útil.

5.2 Trabalhos Futuros

Para os trabalhos futuros, podem ser considerados os seguintes tópicos:

- **CSI Imperfeito:** Considerando a importância de aplicar as técnicas de mitigação de interferência na prática, uma abordagem interessante para o tema de alinhamento de interferência é trazer os cenários de simulação para um caso mais realista. Um trabalho futuro poderia considerar o alinhamento de interferência assumindo um CSI imperfeito ou parcial, de forma a reduzir o impacto na rede de um aumento da sinalização relativa a CSI considerando redes com um crescente número de usuários, dado que atualmente a preferência dos usuários pelos dispositivos móveis, tende a aumentar cada vez mais este número.
- **Abordagens Coordenadas:** Visando aumentar a vazão de dados na rede, ou seja, incrementar a eficiência espectral, um trabalho futuro poderia considerar a coordenação entre elementos da rede de forma que possam trocar informações sobre o estado do canal ou mesmo informação útil. A coordenação na transmissão possibilita que o sinal destinado a cada receptor seja transmitido simultaneamente pelos diversos transmissores, fazendo uso de pré-processadores que efetivamente filtram e mitigam a interferência. A consideração das modificações na infraestrutura da rede para suportar a coordenação, como largura de banda dos enlaces de *backhaul* e o CSI perfeito, além do *trade off* entre o grau de liberdade alcançável no sistema e a sobrecarga dada pela cooperação, podem ser avaliados no futuro.
- **Combinação Espaço-Frequência:** O alinhamento de interferência foi abordado na dimensão espacial, porém em casos onde a rede possui um grande número de transmissores, dadas as condições de realizabilidade, teremos a necessidade de aumentar o número de antenas nos receptores. Uma futura abordagem seria a utilização da dimensão da frequência em combinação com a dimensão espacial. Estudos anteriores utilizaram a multiplexação por divisão de frequência ortogonal em redes MIMO (MIMO-OFDM) para aumentar a diversidade espacial, porém a combinação do MIMO-OFDM em conjunto com a dimensão

espacial pode aumentar o espaço de sinal dos pré-codificadores tornando possível a entrada de mais transmissores sem comprometer a realizabilidade do sistema.

- Possível solução híbrida: Combinando certos aspectos do esquema CoMP e de IA, utilizando, por exemplo, parte da rede para se aplicar o CoMP para uma redução inicial da interferência e posteriormente refinando-se com o uso de técnicas de IA.
- Análises adicionais considerando: ambiente com usuários apresentando diferentes níveis de relação sinal-interferência; aplicação de diferentes algoritmos de agrupamento.

REFERÊNCIAS

- CADAMBE, V. R.; JAFAR, S. A. Interference alignment and spatial degrees of freedom for the k user interference channel. **Proc. IEEE International Conference on Communications**, p. 971–975, Maio 2008.
- CHO, Y. S.; KIM, J.; YANG, W. Y.; KANG, C. G. **MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. Cap. 1 The Wireless Channel: Propagation and Fading. 1 - 24 p.
- DEMESTICHAS, P.; GEORGAKOPOULOS, A.; KARVOUNAS, D.; TSAGKARIS, K.; STAVROULAKI, V.; LU, J.; XIONG, C.; YAO, J. 5g on the horizon: key challenges for the radio-access network. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, IEEE, v. 8, n. 3, p. 47–53, 2013.
- FOSCHINI, G. J.; GANS, M. J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. **Wireless personal communications**, Springer, v. 6, n. 3, p. 311–335, 1998.
- HOLMA, H.; TOSKALA, A. **WCDMA for umts: hspa evolution and lte**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- JAFAR, S. A.; FAKHEREDDIN, M. J. Degrees of freedom in multiuser mimo. **arXiv preprint cs/0510055**, 2005.
- LIU, T.; YANG, C. On the feasibility of linear interference alignment for mimo interference broadcast channels with constant coefficients. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 61, Maio 2013.
- MADDAH-ALI, M. A.; MOTAHARI, A. S.; KHANDANI, A. K. Signaling over mimo multi-base systems: Combination of multi-access and broadcast schemes. In: **IEEE Information Theory, 2006 IEEE International Symposium on**. [S.l.], 2006. p. 2104–2108.
- MADDAH-ALI, M. A.; MOTAHARI, A. S.; KHANDANI, A. K. Communication over mimo x channels: Interference alignment, decomposition, and performance analysis. **IEEE Transactions on Information Theory**, IEEE, v. 54, n. 8, p. 3457–3470, 2008.
- MARSCH, P.; FETTWEIS, G. P. **Coordinated Multi-Point in Mobile Communications: from theory to practice**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.
- MOREIRA, D. C.; NORMANDO, P. G.; BANDEIRA, C. I. R.; JR., W. C. F.; SILVA, Y. C. B. **Resource Allocation and MIMO for 4G and Beyond**. [S.l.]: Springer, 2014. Cap. 10 Interference Alignment, Concepts, and Algorithms for Wireless Systems. 439-474 p.
- NACHTIGALL, J.; ZUBOW, A.; REDLICH, J.-P. The impact of adjacent channel interference in multi-radio systems using ieee 802.11. In: **IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2008. IWCMC'08. International**. [S.l.], 2008. p. 874–881.
- NORMANDO, P. G. Spatial interference alignment under realistic scenarios. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará - UFC, Agosto 2013.

PANAHI, F. H.; OHTSUKI, T.; JIANG, W.; TAKATORI, Y.; NAKAGAWA, T. Joint interference alignment and power allocation for multi-user mimo interference channels under perfect and imperfect csi. **IEEE Transactions on Green Communications and Networking**, PP, n. 99, p. 1–1, 2017. ISSN 2473-2400.

PAULRAJ, A.; NABAR, R.; GORE, D. **Introduction to space-time wireless communications**. [S.l.]: Cambridge university press, 2003.

PETERS, S. W.; HEATH, R. W. Interference alignment via alternating minimization. **IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing**, p. 2445–2448, Abril 2009.

PNAD. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. [S.l.]: IBGE, 2014.

RAO, X.; LAU, V. K. N. Minimization of csi feedback dimension for interference alignment in mimo interference multicast networks. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 61, Março 2015.

RAPPAPORT, T. S.; SUN, S.; MAYZUS, R.; ZHAO, H.; AZAR, Y.; WANG, K.; WONG, G. N.; SCHULZ, J. K.; SAMIMI, M.; GUTIERREZ, F. Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work! **IEEE access**, IEEE, v. 1, p. 335–349, 2013.

SHEN, H.; LI, B.; LUO, Y. Precoding design using interference alignment for the network mimo. **IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications**, p. 2519–2523, Setembro 2009.

SILVA, Y. C. B. **Adaptive beamforming and power allocation in multi-carrier multicast wireless networks**. Tese (Doutorado) — Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2008.

SILVA, Y. C. B.; KLEIN, A. Linear transmit beamforming techniques for the multigroup multicast scenario. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 58, n. 8, p. 4353–4367, 2009.

UTSCHICK, W. **Communications in Interference Limited Networks**. [S.l.]: Springer, 2016.

VENKATAKRISHNAN, S. B.; VISWANATH, P.; KANNAN, S. Degrees of freedom for multiple-multicast traffic. In: IEEE. **Information Theory (ISIT), 2014 IEEE International Symposium on**. [S.l.], 2014. p. 836–840.

VENKATRAMAN, G.; TOELLI, A.; JUNTTI, M.; TRAN, L.-N. Multi-group multicast beamformer design for mimo-ofdm transmission. In: VDE. **European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference; Proceedings of**. [S.l.], 2016. p. 1–6.

YETIS, C. M.; GOU, T.; JAFAR, S. A.; KAYRAN, A. H. Feasibility conditions for interference alignment. In: IEEE. **Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE**. [S.l.], 2009. p. 1–6.