



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Técnicas de Comunicação Dispositivo a Dispositivo (D2D)  
em compartilhamento eficiente de espectro  
com redes de comunicação sem fio.**

**Rafhael Medeiros de Amorim**

Brasília, Dezembro de 2011

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

# FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# **Técnicas de Comunicação Dispositivo a Dispositivo (D2D) em compartilhamento eficiente de espectro com redes de comunicação sem fio.**

**Rafhael Medeiros de Amorim**

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia  
Elétrica como requisito parcial para obtenção  
do grau de Mestre em Engenharia Elétrica*

### Banca Examinadora

Prof. Dr. Robson Domingos Vieira, INdT \_\_\_\_\_  
*Orientador*

Prof. Dr. Paulo Henrique Portela de Carvalho, \_\_\_\_\_  
ENE/UnB  
*Co-orientador*

Prof. Dr. Leonardo Aguayo, FGA/UNB \_\_\_\_\_  
*Examinador externo*

Prof. Dr. André Noll Barreto, ENE/UnB \_\_\_\_\_  
*Examinador interno*

## **Dedicatória**

*Aos meus pais, Aduino Lima de Amorim Júnior e Ivanise Leite de Medeiros Amorim, com o mesmo carinho que sempre me foi dado; a minha irmã, Priscilla Medeiros de Amorim, aos demais familiares e amigos, dedico esta obra e esta conquista.*

*Rafhael Medeiros de Amorim*

## Agradecimentos

*Em primeiro lugar, a Deus, por todos os aprendizados da jornada.*

*Ao meu orientador, o professor Dr. Róbson Domingos Vieira e ao professor Dr. Paulo Henrique Portela de Carvalho, pela paciência com minhas angústias e erros inerentes ao processo de aprendizagem e pela partilha de conhecimento, durante os últimos 5 anos, com observações sempre precisas e encaminhamentos pertinentes, que culminam no presente trabalho.*

*Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (ENE) pela presteza e boa vontade no atendimento e na solução de dúvidas e imprevistos demonstradas durante toda a caminhada.*

*Aos meus pais, Aduino Lima de Amorim Junior e Ivanise Leite de Medeiros Amorim, por tudo que me foi concedido, ensinado e dado nessa vida. E pelas privações que contribuíram para a formação do caráter. E a minha irmã, Priscilla Medeiros de Amorim, pelo convívio harmonioso e exemplo de dedicação.*

*Aos meus amigos, pelos momentos de descontração e o apoio fornecido nos momentos de hesitação e dificuldade. Esses momentos que me permitiram prosseguir de cabeça leve e focado quando o trabalho me exigiu.*

*Aos colegas de trabalho do Grupo MWSL, pelo estímulo à pesquisa e ao estudo, pelo convívio e ambiente de trabalho proporcionado.*

*À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo suporte financeiro que viabilizaram o desenvolvimento desse trabalho.*

*Àqueles que se comprazem de me ver atingir esse objetivo e aos que participaram dessa jornada e de alguma forma se sentem parte dessa conquista.*

*Ao A todos vocês, o meu mais sincero reconhecimento e gratidão.*

*Rafhael Medeiros de Amorim*

---

## RESUMO

Este trabalho apresenta estudos sobre uma rede OFDM (primeira camada) em sobreposição com uma rede D2D (segunda camada). Um modelo de compartilhamento que limita a interferência na rede celular é apresentado onde a estação-base, BS na sigla para o termo em inglês *base station*, é responsável por realizar a coordenação de potência dos secundários e o controle de acesso aos recursos. Os parâmetros do modelo são analisados detalhadamente buscando apontar a influência de cada um deles na probabilidade de existência do enlace D2D. É apresentado também um sistema em que os usuários da segunda camada usam o CDMA como técnica de múltiplo acesso, buscando combater a interferência do sistema pelo espalhamento espectral. Por fim, São feitos estudos também sobre estratégias de alocação de recursos buscando aumentar a eficiência espectral e a justiça na distribuição dos recursos. Tendo em vista a maximização do uso dos recursos da rede é proposta uma formulação que permite o múltiplo reaproveitamento de um único recurso por muitos enlaces D2D. O resultado de cada análise dos modelos apresentados são obtidos por meio de um simulador sistêmico desenvolvido durante a realização deste estudo.

---

## ABSTRACT

This dissertation presents studies about an OFDM Network (first layer) with an overlaid D2D Network (second layer). A resource sharing model that limits the interference on the cellular network is shown where the base station, BS is responsible for performing the secondary users power coordination and the resources access control. The model parameters are analyzed in details aiming at identifying the influence of each one on the D2D link existence probability. This paper also shows studies about resource allocation strategies that increase the network throughput and the fairness of the resource sharing. To maximize the use of the network resources a method is proposed which allow several D2D links to share the same resource with a primary user. Finally, a system where second layer subscribers use CDMA as multiple access technique aiming at mitigating the system interference through the spread spectrum. The results of each presented model analysis are obtained by means of a systemic simulator developed on the scope of this study.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	ESTADO DA ARTE	2
1.3	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	3
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
<b>2</b>	<b>COMUNICAÇÃO D2D</b>	<b>6</b>
2.1	INTRODUÇÃO	6
2.2	A COMUNICAÇÃO D2D	7
2.3	APRESENTAÇÃO DO MODELO	8
2.3.1	MODELO DE CANAL	8
2.3.2	PARÂMETROS DE QUALIDADE	9
2.3.3	COORDENAÇÃO DOS RECURSOS	9
2.4	COMPORTAMENTO DA PROBABILIDADE DE SUCESSO DO ENLACE D2D	12
2.4.1	INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DO CENÁRIO	13
2.4.2	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROJETO	16
2.5	ABORDAGEM MULTICANAL	23
2.6	CONCLUSÃO	25
<b>3</b>	<b>CDMA NA CAMADA SECUNDÁRIA</b>	<b>28</b>
3.1	INTRODUÇÃO	28
3.2	MODELAGEM DO SISTEMA OFDM	29
3.2.1	RECEPÇÃO OFDM	31
3.3	MODELAGEM DO SISTEMA CDMA	32
3.3.1	ESPALHAMENTO ESPECTRAL	34
3.3.2	RECEPÇÃO CDMA	36
3.4	INTERFERÊNCIA	37
3.4.1	INTERFERÊNCIA NA RECEPÇÃO DO SINAL OFDM	38
3.4.2	INTERFERÊNCIA NA RECEPÇÃO DO SINAL CDMA	40
3.5	ADAPTAÇÃO DO MODELO D2D	42
3.5.1	CAMADA SECUNDÁRIA UTILIZANDO OFDM	43
3.5.2	CAMADA SECUNDÁRIA UTILIZANDO CDMA	44
3.6	SIMULAÇÕES	44
3.7	CONCLUSÕES	54
<b>4</b>	<b>ALOCAÇÃO NA CAMADA SECUNDÁRIA</b>	<b>57</b>

4.1	INTRODUÇÃO .....	57
4.2	MÚLTIPLOS ENLACES D2D .....	58
4.3	TAXA DE TRANSMISSÃO .....	63
4.3.1	AUMENTO NA TAXA GLOBAL DA REDE .....	67
4.4	JUSTIÇA NA DISTRIBUIÇÃO DOS RECURSOS .....	70
4.5	CRITÉRIO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO .....	76
4.6	MÚLTIPLO REÚSO .....	78
4.6.1	ADAPTAÇÃO DA CAPACIDADE .....	83
4.7	AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS COM MÚLTIPLO REÚSO.....	85
4.8	MULTIPLO REÚSO COM CDMA NA SEGUNDA CAMADA .....	89
4.8.1	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	91
4.9	CONCLUSÕES .....	96
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>98</b>
5.1	SUMÁRIO DOS RESULTADOS.....	98
5.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	100
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>102</b>

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Exemplo de cenário para o modelo de sistema D2D proposto .....	10
2.2	$Pr[LE]$ em função da distância do enlace D2D pretendido .....	13
2.3	Curvas de probabilidade de existência do enlace em função de $D_{dd,dd}$ para diferentes valores de $D_{dd,bs}$ fixado.....	15
2.4	Curvas de probabilidade de existência do enlace em função da distância para D fixado.....	17
2.5	Curvas de probabilidade de existência do enlace em função da distância para diferentes valores de $\kappa$ . .....	19
2.6	Curvas de probabilidade de existência do enlace em função da distância para diferentes valores de $\beta_{dd}$ . .....	21
2.7	Curvas de probabilidade de existência do enlace em função da distância para diferentes valores de $\beta_{dd}$ .....	23
2.8	Resultados de simulação para o cenário 1, para vários valores de $N_{sc}$ .....	25
3.1	Fluxo de símbolos modulados em cada ramo de entrada e saída do conversor Série-Paralelo. ....	29
3.2	Diagrama de Blocos simplificado para o transmissor OFDM .....	30
3.3	Diagrama de blocos simplificado para o receptor OFDM .....	31
3.4	Resultados de simulação para o cenário 1, para vários valores de G.....	48
3.5	Densidade Espectral de Potência para diferentes formatos de pulso.....	50
3.6	Desempenho do sistema para diferentes formatos de pulso. ....	51
3.7	Comparação do desempenho do enlace D2D na camada secundária, com e sem realocação de usuários primários. ....	52
3.8	$Pr[LE]$ para as diferentes formas de acesso.....	53
3.9	$Pr[LE]$ para D fixo em 400 metros.....	55
4.1	Exemplo de alocação mostrando os dois primeiros passos do algoritmo PDB .....	61
4.2	Número médio de usuários D2D atendidos pelos algoritmos SR e PBD .....	62
4.3	Taxa média de usuários D2D bloqueados pelos algoritmos SR e PBD.....	63
4.4	Comparação entre a capacidade da rede provida pelos sistemas SR e PBD .....	66
4.5	Comparação entre as taxas oferecidas pelo algoritmos SR e PAQ em função de $D_{dd,dd}$ .....	69
4.6	Comparação entre o número de usuários alocados pelos algoritmos PBD e PAQ ....	69
4.7	Índice de Jain x Distância do enlace D2D, para os algoritmos PAQ, PBD e SR. ....	72
4.8	Exemplo de alocação do algoritmo PPQMax, dois primeiros passos. ....	74
4.9	Capacidade da camada secundária para os diversos algoritmos propostos. ....	75
4.10	Capacidade total da rede para os diversos algoritmos propostos.....	75

4.11	Índice de Jain na camada secundária para os diversos algoritmos propostos. ....	76
4.12	Exemplos gráficos da Eficiência de Pareto. ....	77
4.13	Eficiência de Pareto para as diferentes técnicas de alocação. ....	78
4.14	Média de Usuários Alocados com múltiplo Reúso, $M = 10$ , $N_{prb} = 1$ . ....	83
4.15	Eficiência de Pareto para diferentes técnicas, com múltiplo reaproveitamento, $M = 10$ , $N_{prb} = 1$ . ....	88
4.16	Resultado de alocação para o CDMA na segunda camada considerando-se diver- sos ganhos de processamento. ....	92
4.17	Resultado de alocação para o CDMA na segunda camada com realocação do primário considerando-se diversos ganhos de processamento. ....	94
4.18	Resultado de alocação para o CDMA na segunda camada com realocação do primário considerando-se diversos ganhos de processamento. ....	95
4.19	Resultado de alocação para o CDMA na segunda camada com realocação do primário considerando-se diversos ganhos de processamento, para $D_{dd_i,bs}$ fixo em $0, 3R$ . ....	95

# LISTA DE TABELAS

2.1	Parâmetros de simulação - Cenário 1 .....	12
2.2	$\beta_{dd}$ em função da modulação .....	20
2.3	$\beta_{uc}$ em função da modulação .....	22
3.1	Parâmetros de simulação - Cenário 1 .....	46
4.1	Matriz de Disponibilidade - Exemplo 1 .....	59

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$C$	Distância medida a partir do transmissor celular	[m]
$D$	Distância medida a partir do transmissor D2D	[m]
$N_{sc}$	Número de canais disponíveis	
$Pr[LE]$	Probabilidade de Existência do Enlace	
$R$	Raio de Célula	[km]
$Rx$	Equipamento Receptor	
$Tx$	Equipamento Transmissor	

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Coefficiente de Propagação	
$\beta_{uc}$	SINR no enlace da rede celular	dB
$\beta_{dd}$	SINR no enlace D2D	dB
$\kappa$	Margem de Ruído	

## Subscritos

$bs$	eNodeB
$dd$	Usuário D2D
$rx$	Receptor
$tx$	Transmissor
$uc$	Usuário Celular

## Siglas e Abreviaturas em Português

3G	Terceira Geração de Sistema Celular
4G	Quarta Geração de Sistema Celular
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
SMP	Serviço Móvel Pessoal
UC	Usuário Celular

## **Siglas e Abreviaturas em Inglês**

16QAM	16 Quadrature Amplitude Modulation
64QAM	64 Quadrature Amplitude Modulation
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
D2D	Device-to-Device
DS-CDMA	Direct Sequence CDMA
eNodeB	Estação Rádio Base na tecnologia LTE
FDD	Frequency Division Duplex
ISI	Inter Symbolic Interference
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution – Advanced
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
P2P	Peer-to-Peer
PRB	Physical Resource Block
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SINR	Signal-to-Interference plus Noise Ratio
SNR	Signal-to-noise Ratio

# 1 INTRODUÇÃO

*Este capítulo apresenta uma breve contextualização sobre a situação das comunicações móveis no país e uma introdução ao tema do presente estudo, apresentando a principal motivação e objetivos por trás dessa escolha. Por fim, será apresentada a divisão deste trabalho*

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A demanda por altas taxas de transmissão de dados nas redes sem fio cresce à medida que se deseja tornar novos serviços de multímidia disponíveis para públicos cada vez maiores. No final de 2011, por exemplo, um estudo da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) divulgou um balanço estimando em cerca de 242 milhões o total de usuários do Serviço Móvel Pessoal (SMP) no Brasil, o que corresponde a um total de 80% da população, com previsão de crescimento expressivo nos anos seguintes [1].

Além desse número elevado, a evolução dos sistemas e meios de comunicação moderno representa uma demanda crescente por serviços diferenciados, como acesso à *internet* e compartilhamento de recursos P2P (*Peer-to-Peer*, par a par na tradução literal para o português). Estimativas da Cisco apontam que o tráfego de internet gerado por *tablets*, *smartphones* e aparelhos de TV crescerá a uma taxa anual de 216 %, 144% e 258%, respectivamente, entre 2010 e 2015; e que o tráfego de redes móveis tende a crescer 26 vezes no mesmo período [2].

A indústria de serviços de comunicação sem fio tornou-se altamente lucrativa nesse cenário, e por consequência, muito concorrida. Estes serviços são providos pela exploração do espectro eletromagnético, um recurso escasso e custoso de se obter. O elevado custo de licenciamento do espectro pode ser averiguado em reportagem recente do jornal americano *New York Times* que noticia ofertas superiores a 19 bilhões de dólares feitas pelo direito de exploração de faixas na banda de 700 MHz no ano de 2009 [3].

Para os provedores de serviços de comunicação sem fio este investimento inicial deve ser compensado por um retorno adequado na cobrança das tarifas pelos serviços prestados. Sendo a tributação proporcional aos serviços prestados, ela será maior a medida que uma maior utilização do espectro for observada. Portanto, ineficiências no aproveitamento do espectro são indesejáveis por parte dos prestadores de serviços, pois representam recursos ociosos e menor retorno financeiro.

Algumas técnicas modernas têm sido estudadas no sentido de melhorar o aproveitamento do espectro, aumentando a eficiência na exploração dos recursos. Duas destas técnicas têm recebido

atenção recentemente, por se mostrarem soluções interessantes para diminuição da ineficiência da rede: rádios cognitivos e comunicação D2D (sigla em inglês para *device-to-device*, ou dispositivo-a-dispositivo em português).

Os rádios cognitivos buscam diminuir a ineficiência temporal e espectral no acesso aos recursos da rede. Os rádios nessa tecnologia realizam um sensoamento do espectro buscando "espaços brancos", faixas do espectro licenciadas mas que não estão sendo utilizadas em determinada região. O espaço branco pode ser, por exemplo, uma faixa destinada ao sistema de TV Digital, em uma área em que o operador desta TV não ofereça cobertura.

Explorando parte do espectro que se encontra subutilizado, o sistema de rádios cognitivos oferece uma solução para o atendimento a um maior número de usuários sem a necessidade de novas bandas licenciadas [4].

A comunicação D2D [5], foco do presente estudo, por sua vez, busca reutilizar os recursos destinados aos usuários celulares de uma rede, fornecendo comunicação de baixa potência direta entre transmissor e receptor. A idéia é utilizar uma comunicação entre dois usuários próximos gerando um baixo nível de interferência na rede principal, sem prejudicar o enlace desta última.

Se o nível de potência necessário para estabelecer um enlace D2D for muito baixo é possível que se destine um dos recursos licenciados à rede principal para este par de usuários, liberando o tráfego na estação base para um novo usuário.

De outra forma, mesmo que não haja o reaproveitamento do recurso para um diferente usuário, se o nível de qualidade obtido em uma transmissão direta entre dois dispositivos próximos for superior àquele obtido através da estação base, o sistema pode decidir por esse acesso, fornecendo uma melhor qualidade de transmissão aos usuários (maior taxa líquida).

## 1.2 ESTADO DA ARTE

Para que as operadoras dos sistemas de comunicação sem fio modernos possam suprir o crescente número de usuários oferecendo, cada vez mais, novos serviços e atendendo a certas requisições de qualidade é necessário que a utilização do espectro eletromagnético se dê da forma mais eficiente possível, uma vez que este é um recurso escasso. Muitas pesquisas tem sido feitas na direção de melhorar o aproveitamento do espectro, com recentes avanços significativos.

Nesse contexto de inovação insere-se o OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequências, no português). Proposto para ser um esquema de alocação de recursos altamente flexível, o OFDM aloca fluxo de informações em canais de banda estreita e se apresenta como uma técnica importante para as novas gerações de comunicação sem fio, como o WiMaX e o LTE, devido às vantagens apresentadas como:

- robustez à interferência intersimbólica devido à adoção do intervalos de guarda;
- flexibilidade na alocação no espectro e no múltiplo acesso;
- baixa complexidade na recepção, realizada com a implementação da FFT e operações de multiplicação e dispensando equalizadores complexos;
- robustez ao desvanecimento seletivo em frequência e dispersão temporal.

Por sua vez, a comunicação D2D tem se configurado como uma importante técnica no escopo de trabalho do LTE-A (*LTE-Advanced*), [6]. O LTE (*Long Term Evolution* - Evolução de Longo Termo) foi proposto pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project* - Projeto de Parceria de terceira geração) como uma evolução de longo prazo para os sistemas de terceira geração (3G) que busca manter a competitividade da linha evolutiva advinda do GSM com uma interface de rádio altamente flexível [7].

Para continuar atendendo a demanda crescente de assinantes interessados na alta taxa de transmissão, no ano de 2004, o 3GPP decidiu iniciar os estudos para uma evolução de longo prazo, dando o primeiro passo na elaboração das normas que constituiriam o LTE. Desde as primeiras discussões sobre a nova tecnologia, foram traçadas metas ambiciosas de qualidade e eficiência da rede.

Em 2008, com a criação dos requisitos de quarta geração *IMT-Advanced*, pela ITU-R, o 3GPP iniciou os estudos para a criação do LTE, que busca atingir as características e especificações propostas para o 4G (quarta geração de redes de comunicação sem fio). Em junho do mesmo ano, o primeiro relatório técnico foi elaborado [8].

Espera-se que enlaces D2D sobrepostos à comunicação celular sejam capazes de oferecer ganhos de taxa e eficiência no uso do espectro consideráveis. Em [9] é apresentada uma proposta de integração para a comunicação D2D ao LTE, considerando aspectos da rede e protocolos de sinalização.

Um dos principais fatores que envolvem o uso de comunicação D2D no LTE é a coordenação da interferência e o balanceamento do desempenho do sistema.

Desde então muitos estudos tem sido feitos no sentido de investigar a melhor forma de realizar a coordenação entre os enlaces D2D e a rede celular [10], [11] e sobre ganho de capacidade para diferentes esquemas de alocação de recursos dos enlaces D2D, como [12] e [13].

### 1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O mundo tem observado um proceso de evolução tecnológica intenso que tem elevado a importância da comunicação e da celeridade em seu fluxo. Este cenário tem exercido forte pressão

na demanda por serviços de telecomunicações, em especial àqueles mais dinâmicos, destinados aos dispositivos móveis.

Devido à natureza destes dispositivos, conectá-los fisicamente a nós centrais da rede é uma tarefa inviável, e a prestação destes serviços só pode ser feita por acesso a canais de comunicação no espectro eletromagnético. Dado que se trata de um recurso caro e finito, é preciso avançar no estudo de técnicas que melhorem o uso deste recurso, aumentando a eficiência espectral.

A comunicação D2D em sobreposição de camadas da rede principal tem sido apresentada como uma solução interessante para ajudar no processo de reaproveitamento do espectro, e, por consequência, para prover maior quantidade e qualidade no atendimento.

Embora esteja no escopo de trabalho de uma das principais tecnologias de futura geração das redes sem fio (LTE-A) e que estudos recentes tenham sido propostos para avaliar os ganhos providos pela comunicação D2D, ainda existem lacunas a serem preenchidas no potencial desta técnica em oferecer ganhos a rede.

A forma como o sistema determinará a potência que o enlace sobreposto poderá acessar a rede, a limitação de interferência e coordenação ainda são temas que estão sendo estudados, na busca de uma topologia simples e que permita a coordenação entre o enlace D2D e a rede principal dentro do tempo de escalonamento do sistema.

Além disso, o ganho de taxa que pode ser provido está relacionado a forma como é feita a alocação de recursos na rede. O potencial exato da rede que permite comunicações sobrepostas no mesmo recurso ainda não foi dimensionado e diversos estudos tem sido publicados na busca de algoritmos de alocação que permitam ganhos elevados de taxa [6],[10],[12].

Entre os objetivos do presente trabalho está o estudo da estratégia de coordenação proposta por [14], avaliando o efeito dos parâmetros do cenário e do projeto na probabilidade de se obter reaproveitamento dos recursos do sistema. A influência de cada uma desses parâmetros será estudada e serão apontadas possíveis decisões de projeto que podem ser tomadas para aumentar a probabilidade de reaproveitamento dos recursos do sistema e quais os impactos de qualidade que terão sobre a rede.

Serão propostos também algoritmos de alocação, que permitem a adaptação de taxa na estratégia de coordenação proposta, investigados sobre o ganho de capacidade que podem de oferecer e pela justiça que promovem na distribuição dos recursos. Buscar-se-ão algoritmos que tendam a uma distribuição mais justa enquanto aumentam a capacidade do sistema.

Uma alteração na estratégia de coordenação é realizada também, propondo um esquema que permita o múltiplo reaproveitamento dos recursos. O equacionamento por trás desta nova estratégia é apresentado bem como suas limitações. Espera-se com esta técnica permitir um maior atendimento aos usuários da rede e uma maior capacidade global do sistema.

Por fim, investiga-se uma situação em que a rede celular e os enlaces D2D utilizam técnicas

de acesso diferentes (OFDMA e CDMA, respectivamente). O objetivo é explorar os ganhos na mitigação de interferência providos pelo espalhamento espectral da técnica CDMA objetivando estabelecer enlaces D2D mais longos, com menor nível de interferência possível.

## **1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

No Cap. 2 é apresentada a estratégia de coordenação a ser estudada. Além disso os parâmetros envolvidos nessa técnica são avaliados um a um a luz da influência que exercem na probabilidade de reaproveitamento em camada subjacente dos recursos da rede.

Já o Cap. 3 apresenta uma nova técnica de coordenação permitindo que usuários D2D acessem recurso por técnicas diferentes de acesso (CDMA e OFDMA) e as vantagens e desvantagens de cada uma das situações são apresentados e estudados com base em resultados de simulação.

Por fim, o Cap. 4 apresenta modificações na técnica do capítulo anterior, permitindo a adaptação de taxa dos usuários D2D que conseguiram o reaproveitamento do recurso com a rede celular. Algoritmos de alocação são estudados do ponto de vista da eficiência multiobjetivo de Pareto, buscando um compromisso entre ganho de capacidade e justiça na distribuição dos recursos da rede. Em seguida, o capítulo propõe uma nova forma de coordenação do espectro permitindo o múltiplo reaproveitamento de um mesmo recurso por diferentes enlaces D2D, buscando ganhos no índice de atendimento aos usuários da rede. Ao final do capítulo novos algoritmos de alocação são propostos, com utilização do múltiplo reaproveitamento, e avaliados quanto ao ganho de capacidade e justiça oferecidos. Esta análise é seguida das conclusões, sumário dos resultados e propostas para trabalhos futuros no Cap. 5.

## 2 COMUNICAÇÃO D2D

*O presente capítulo visa apresentar um modelo de comunicação D2D subjacente à rede principal. Esta estratégia é fundamentada no controle de interferência na rede celular, com coordenação do nó central. A influência dos parâmetros de projeto e dos parâmetros de cenário na probabilidade de reuso dos recursos da rede também será analisada detalhadamente ao longo deste capítulo.*

### 2.1 INTRODUÇÃO

A comunicação D2D baseia-se em comunicações de curta distância em que transmissor e receptor estão suficientemente próximos para que um enlace entre ambos ofereça uma SINR (sigla para razão sinal por ruído mais interferência, do inglês *Signal to interference plus noise ratio* e indica a razão entre a potência do sinal recebido pela soma das potências do ruído e interferidores) elevada e permita que haja comunicação direta. Em alguns casos, a SINR será superior àquela oferecida pelo enlace com a BS (a estação base, ou *base station*, no inglês), e a comunicação D2D se torna uma alternativa que apresenta desempenho melhor que o oferecido pela rede celular, e com menor latência, pois a comunicação tradicional precisa de 2 saltos para concluir o enlace. Outra vantagem da comunicação D2D é a possibilidade de diminuir o tráfego na BS e liberar os recursos para serem reusados pela rede celular [6].

Para que o reuso do recurso seja possível, é necessário que o enlace celular e a comunicação D2D estejam limitados a certos níveis de potência, de forma a garantir que a interferência entre ambos seja controlada. Nesse sentido, embora seja realizada diretamente entre dois móveis, a comunicação D2D deve ser feita sob coordenação da BS. A coordenação deve garantir que a potência da conexão D2D exerça interferência limitada na rede celular, além de permitir um reuso otimizado e uma alocação eficiente dos recursos da rede.

Se bem coordenada, a comunicação D2D oferece solução interessante para aumento da capacidade global dos sistemas celulares, em especial no caso em que há muitos usuários que desejam estabelecer enlaces curtos dentro de uma mesma célula, como ocorre, por exemplo, em feiras, exposições, *shows*, congressos e outros eventos. Outra utilização reside em aplicações de serviços como *streaming* de vídeo, jogos *online*, compartilhamento de arquivos P2P, entre outros.

Este capítulo em questão visa apresentar técnica coordenada de alocação inicialmente proposta em [14] e [11] para o controle da interferência em enlaces D2D subjacentes à comunicação

celular.

Além disso, este capítulo propõe-se a realizar uma avaliação dos parâmetros de projeto envolvidos nesta estratégia que influenciam diretamente na probabilidade de reuso dos recursos do sistema. Serão discutidas e apresentadas as condições necessárias para, utilizando os métodos propostos, obter reuso de recursos em um enlace D2D e quais decisões podem ser tomadas pelo projetista para aumentar a probabilidade de se conseguir esse reuso.

## 2.2 A COMUNICAÇÃO D2D

Ao se estabelecer um enlace entre dois dispositivos, é preciso satisfazer requisitos de qualidade do enlace de forma a obter uma comunicação satisfatória. Mais do que transmitir a informação entre esses dispositivos, é importante que se faça isso com uma quantidade de erros suficientemente baixa para que seja possível recuperar, na recepção, a informação previamente transmitida.

Assim, quando se fala em estabelecer comunicação D2D (camada secundária) para obtenção de reuso de recursos de uma rede celular (camada primária), é importante considerar aspectos de qualidade do sinal recebido tanto para o enlace celular como para o enlace D2D, estabelecendo um protocolo de prioridades entre ambos e uma estratégia de coordenação, para se evitar que, ao concorrer pelos mesmos recursos, usuários das duas camadas interfiram entre si de forma destrutiva, inviabilizando a comunicação para ambos.

Portanto, uma forma de se considerar o sistema D2D é limitar a um certo valor a interferência que esse sistema impõe na camada primária, realizando um controle de potência de transmissão coordenado pela BS.

No modelo estudado, um usuário celular está ocupando o recurso disponível quando dois usuários desejam estabelecer um enlace D2D. Devido à escassez de recursos, o sistema tentará alocar esta comunicação no recurso destinado à comunicação celular por meio do reuso. Para efetuar essa operação, a coordenação da BS determina o limite máximo de potência para o transmissor D2D. Além disso, aspectos de projeto definem as SINRs mínimas requeridas para o enlace celular e para o enlace secundário que devem ser atendidas. E, a partir desses parâmetros, calcula-se a probabilidade de que, considerados os limites de potência e interferência, primário e secundário sejam capazes de compartilhar recursos.

O modelo proposto em [14], que será brevemente revisto na próxima seção, é utilizado como ponto de partida para o presente estudo sobre utilização de enlaces D2D em camada secundária. Seguindo essa modelagem, a influência de cada um dos aspectos de projeto será examinada e serão propostos novos métodos de alocação de recursos baseados nesse modelo.

## 2.3 APRESENTAÇÃO DO MODELO

O cenário analisado apresenta uma célula de raio  $R$ , em que usuários do sistema celular, chamados doravante de UC, e usuários D2D buscam acessar os recursos da rede de forma coordenada por uma BS. O compartilhamento de recursos se dará, exclusivamente, aos recursos disponibilizados pela BS para o enlace reverso. Essa escolha deve-se ao fato de que, além da facilidade de sinalização e de coordenação pela BS nesta direção, o tráfego no enlace reverso é subutilizado no modo FDD (duplexação por divisão na frequência), uma vez que há assimetria no fluxo entre enlace direto e reverso [6], o que deverá garantir maior probabilidade para que a comunicação D2D exista.

O controle de potência é feito pela BS, e deve-se ao limite de interferência aceitável visto pelo primário em função da transmissão D2D. No enlace reverso, o sinal da comunicação celular será recebido pela BS que deve avaliar se o nível de interferência está acima do limite máximo ou não, sendo possível encontrar duas situações. Na primeira, a interferência medida pela BS está dentro do limiar e, portanto, é possível a transmissão do enlace D2D. A outra situação ocorre quando o nível de interferência ultrapassa determinado limiar estipulado pela BS e deve ser diminuído. Portanto, uma ordem é enviada ao usuário D2D para que reduza sua potência de transmissão. Nesse caso, a comunicação D2D poderá deixar de existir.

No enlace direto, na camada primária, o sinal é recebido pelo usuário UC, que retornará à rede informação acerca da qualidade do sinal recebido. Se a estação base for tomar decisões de coordenação com base nessa informação, haverá atrasos no envio dessas decisões, devido à propagação dos sinais, correspondentes a pelo menos dois intervalos de transmissão (UC informando para BS e BS informando para D2D), o que pode dificultar uma coordenação adequada, pela maior defasagem da informação.

### 2.3.1 Modelo de Canal

O canal utilizado nessa análise é um modelo simplificado, em que se consideram apenas as perdas por propagação e a presença de um ruído aditivo gaussiano branco, em um ambiente em que se considera que as antenas de transmissão com padrão de radiação omnidirecional. Para o sinal  $s$  enviado através desse canal, considera-se, portanto, que o sinal recebido  $r$  será

$$r = sd^{-\alpha/2} + n. \quad (2.1)$$

Na Equação 2.1,  $d$  é a distância entre transmissor e receptor,  $\alpha$  o coeficiente de propagação do canal e  $n$ , o ruído aditivo gaussiano branco. Ainda,

$$P_{tx} = E[ss^*]. \quad (2.2)$$

em que  $P_{tx}$  é a potência do sinal  $s$  transmitido no domínio do tempo e, também,

$$P = E[(sd^{-\alpha/2})(sd^{-\alpha/2})^*] \quad (2.3)$$

em que  $P$  é a potência do sinal  $r$  recebido.

### 2.3.2 Parâmetros de Qualidade

O parâmetro utilizado para medir a qualidade da comunicação será a SINR. Como deseja-se que a qualidade de cada enlace estabelecido esteja acima de determinado nível mínimo aceitável, haverá em cada caso um limiar de SINR a ser atendido, que dependerá, entre outros fatores, do tipo de modulação escolhido. Na formulação apresentada, este limiar será representado por  $\beta_{UC}$  para a comunicação na camada primária e  $\beta_{DD}$  para a comunicação D2D.

Assumir-se-á ainda que existe uma margem  $\kappa$  de potência adicional no enlace UC-BS para compensar eventuais interferências do sistema, como a injetada pelo enlace D2D. Esse tipo de parâmetro de projeto é comum em redes de comunicação sem fio [15].

### 2.3.3 Coordenação dos Recursos

O sistema apresentado pressupõe a existência de  $N_{sc}$  recursos ortogonais disponíveis para uso no enlace reverso de determinada célula. Cada um deles ocupado por um usuário UC posicionado aleatoriamente dentro da célula. Além disso, usuários D2D competem por esses recursos ocupados, tentando estabelecer comunicação entre si.

Para designar as distâncias envolvidas no equacionamento, o critério adotado atribui a letra C para distâncias medidas a partir do transmissor UC e a letra D para distâncias medidas a partir do transmissor D2D. Além disso, serão adotados dois índices subscritos separados por vírgula, o primeiro indicando o transmissor e o segundo o receptor.

Os índices poderão ser:  $uc$  indicando o usuário celular;  $dd$  indicando o transmissor D2D quando antes da vírgula e o receptor quando depois;  $bs$  indicando a BS. A notação  $bs$  é utilizada para indicar a estação base. A Figura 2.1 apresenta as distâncias de forma gráfica, que podem ser resumidas na seguinte lista:

- $C_{uc,bs}$  representa a distância entre o UC e a BS;
- $C_{uc,dd}$  representa a distância entre o UC e o receptor D2D;
- $D_{dd,bs}$  representa a distância entre o transmissor D2D e a BS;
- $D_{dd,dd}$  representa a distância entre transmissor e receptor D2D.

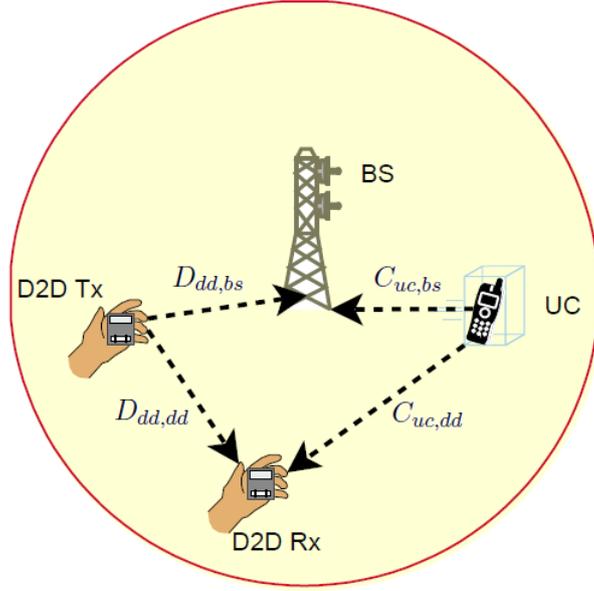


Figura 2.1: Exemplo de cenário para o modelo de sistema D2D proposto

Utilizando a nomenclatura descrita acima, as equações 2.1 e 2.3 e a margem de projeto  $\kappa$ , a potência de transmissão dos usuários UC que ocupam cada um dos  $N_{sc}$  canais disponíveis na ausência de interferência, deve ser tal que satisfaça:

$$SNR_{UC} = \frac{P_{UC} C_{uc,bs}^{-\alpha}}{N} \geq (1 + \kappa) \beta_{UC} \quad (2.4)$$

em que o termo  $SNR_{UC}$  corresponde a razão sinal ruído na ausência de um interferidor D2D medido na BS para o enlace celular. Ainda na Equação 2.4,  $P_{UC}$  representa a potência de transmissão do usuário UC, e  $N$ , a potência do ruído térmico inerente ao sistema de recepção. Ao se isolar a potência de transmissão nessa mesma equação, chega-se a um limite mínimo de potência de transmissão a ser utilizado para garantir os critérios de qualidade do enlace:

$$P_{UC} \geq (1 + \kappa) \beta_{UC} N C_{uc,bs}^{\alpha} \quad (2.5)$$

Assume-se, sem perda de generalidade, que a margem de interferência será a mínima estipulada pelo sistema, em outras palavras, a transmissão será feita com a potência mínima requerida, isto é,  $P_{UC}$  será o mínimo requerido pela expressão (2.5).

Contudo, se, na ausência de interferência, a potência do usuário UC deve obedecer à Equação 2.5 para garantir que a razão sinal-ruído vista do lado da BS seja  $(1 + \kappa)$  vezes maior que a necessária, quando há interferência do usuário D2D, a razão sinal-ruído deve ser pelo menos igual a  $\beta_{UC}$ . Ou seja, a interferência adicionada à rede pode diminuir a SINR em  $\kappa$  vezes que é a margem de tolerância à interferência decidida por projeto. Dessa forma,

$$SINR_{UC} = \frac{P_{UC}C_{uc,bs}^{-\alpha}}{N + P_{dd}D_{dd,bs}^{-\alpha}} \geq \beta_{UC} \quad (2.6)$$

em que  $SINR_{UC}$  representa a SINR medida para o enlace celular na BS e  $P_{dd}$  representa a potência de transmissão do enlace D2D. Portanto a partir da inequação 2.6 e assumindo a igualdade na Equação 2.5, tem-se

$$(1 + \kappa)\beta_{UC}NC_{uc,bs}^{\alpha}C_{uc,bs}^{-\alpha} \geq \beta_{UC}(N + P_{dd}D_{dd,bs}^{-\alpha}) \quad (2.7)$$

$$\therefore P_{dd} \leq D_{dd,bs}^{\alpha}\kappa N \quad (2.8)$$

Assim, a potência máxima de transmissão para o usuário D2D deve satisfazer à inequação presente na Equação 2.8. Se ultrapassar esse limiar, a interferência devido a essa transmissão medida na BS será maior do que a margem de projeto permite e os efeitos sobre o sinal passam a ser inaceitáveis do ponto de vista da qualidade do enlace.

Por outro lado, transmitir com a potência máxima não garante que o enlace D2D atenderá seus requisitos de qualidade. É preciso garantir ainda que

$$SINR_{DD} = \frac{P_{dd}D_{dd,dd}^{-\alpha}}{N + P_{UC}C_{uc,dd}^{-\alpha}} \geq \beta_{dd} \quad (2.9)$$

em que  $SINR_{DD}$  representa a SINR do enlace D2D.

Assim, considerando-se os resultados anteriores em que  $P_{dd}$  é o máximo possível, então

$$D_{dd,dd} \leq D_{dd,bs} \left\{ \frac{\kappa}{\beta_{dd}(1 + \beta_{UC} \left(\frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd}}\right)^{\alpha} (1 + \kappa))} \right\}^{1/\alpha} \quad (2.10)$$

A inequação 2.10 mostra que, dada uma determinada topologia de rede, existe uma distância máxima  $D_{dd,dd}$  para a qual o enlace D2D é realizável com a qualidade desejada. Essa distância máxima é chamada de distância crítica,  $d_{crit}$ , e corresponde ao  $D_{dd,dd}$  que leva a igualdade na inequação 2.10. Assim,

$$d_{crit} = D_{dd,bs} \left\{ \frac{\kappa}{\beta_{dd}(1 + \beta_{UC} \left(\frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd}}\right)^{\alpha} (1 + \kappa))} \right\}^{1/\alpha} \quad (2.11)$$

Segue que, quanto maior for  $d_{crit}$ , maior será a área de cobertura que aquele transmissor D2D tem à sua disposição e, portanto, maior a probabilidade de que o receptor esteja dentro deste raio de cobertura, aumentando a probabilidade de existência do enlace D2D. Por outro lado, quanto maior a distância  $D_{dd,dd}$  do enlace D2D pretendido, maior a área de cobertura que o transmissor

D2D deve cobrir para conseguir se comunicar com o receptor. Ou seja, maior precisará ser o valor de  $d_{crit}$  na expressão 2.11, o que acarreta menor probabilidade de existência do enlace ( $\Pr[LE]$ ). Para avaliar esse comportamento, realizou-se uma simulação, com os parâmetros da tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros de simulação - Cenário 1

Parâmetro	Valor
$R$	2 km
$\kappa$	1
$\beta_{UC}$	10 dB
$\beta_{dd}$	7 dB
$\alpha$ (coeficiente de propagação)	3,5
Número de simulações	$1,5 \times 10^6$

A simulação distribui em uma célula de raio  $R$ , que possui uma BS centralizada, os usuários  $UC$  e  $D2D_{tx}$  segundo uma distribuição aleatoriamente uniforme. Após essa fase, posiciona-se o usuário  $D2D_{rx}$  de forma uniformemente aleatória sobre uma circunferência de raio  $d_0$  em torno de  $D2D_{tx}$ . A partir dos parâmetros de entrada do simulador, o cálculo de  $d_{crit}$  é efetuado e, se  $d_{crit} \geq d_0$ , o enlace é computado como bem sucedido. O método de Monte Carlo é utilizado para computar a probabilidade do enlace, computando como valor aproximado para essa probabilidade, ao final da simulação, como a porcentagem de enlaces bem sucedidos para a distância  $d_0$ , em relação ao total de simulações realizadas.

A Figura 2.2 mostra os resultados obtidos para o cenário descrito pela Tabela 2.1. Neste gráfico é possível observar que a  $\Pr[LE]$  depende como esperado, da distância de enlace D2D que se deseja estabelecer. Para enlaces inferiores a aproximadamente 300 metros ( $0,15R$  considerando que a célula tem raio de 2 km), a probabilidade de existência do enlace é superior a 50%, enquanto que, para enlaces de 600m ( $0,3R$ ) a probabilidade de existência do enlace é próxima de 25%.

## 2.4 COMPORTAMENTO DA PROBABILIDADE DE SUCESSO DO ENLACE D2D

A probabilidade de existência do enlace  $\Pr[LE]$ , está fortemente relacionada a  $d_{crit}$  e, por consequência, aos parâmetros que definem seu valor ( $\kappa, \beta_{UC}, \beta_{dd}$ ), às distâncias de enlace ( $C_{uc,bs}, C_{uc,dd}, D_{dd,bs}$ ) e o coeficiente de propagação( $\alpha$ ). Enquanto as distâncias são variáveis aleatórias que correspondem à posição dos usuários no momento em que se deseja estabelecer o enlace e, por conseguinte, carregam certa imprevisibilidade, os parâmetros de projeto estão associados às decisões do projetista e/ou coordenação da BS e podem ser ajustados para maximizar  $d_{crit}$ .

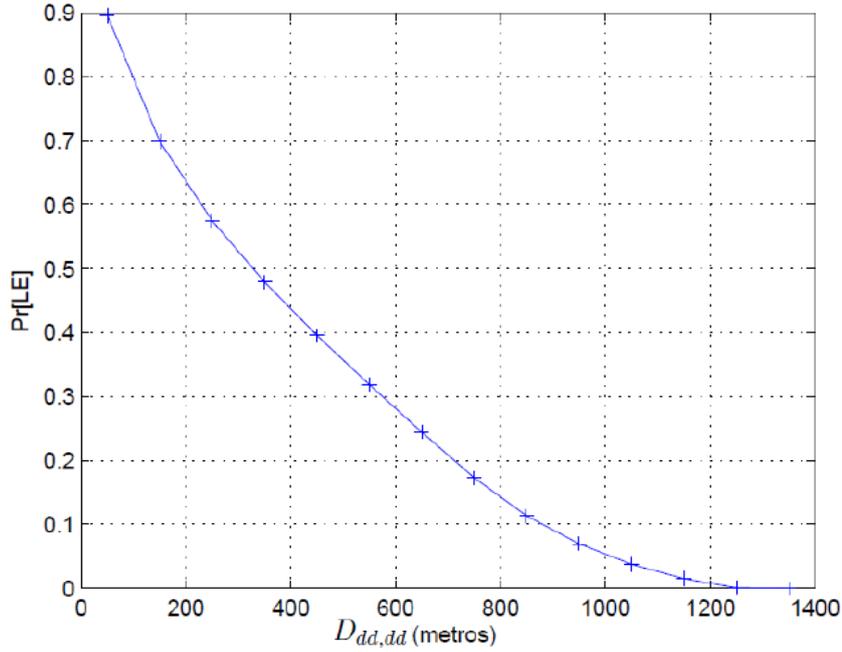


Figura 2.2:  $Pr[LE]$  em função da distância do enlace D2D pretendido

Com base nisso, o presente estudo realizou uma análise da influência de cada um destes parâmetros na  $Pr[LE]$  que se encontra exposta nas próximas seções. Os parâmetros foram divididos entre dois grupos: elementos de cenário, considerando as grandezas que não são controláveis pelo projetista; e os parâmetros de projeto, que são estipulados pelo projetista para atender certos critérios de qualidade.

### 2.4.1 Influência dos Elementos do Cenário

Todas as distâncias envolvidas ( $D_{dd,bs}, C_{uc,bs}, C_{uc,dd}$  e  $D_{dd,dd}$ ) influenciam a probabilidade de existência de um determinado enlace. Outros elementos do cenário como o coeficiente de propagação,  $\alpha$ , e o raio da célula podem oferecer influência no cômputo de  $Pr[LE]$ . Apesar destas grandezas serem, quase sempre, incontroláveis do ponto de vista do projeto, entender a influência dessas sobre o sistema de comunicação a ser desenvolvido ajuda a desenvolver o protocolo de tomada de decisões do sistema para cada caso, sempre visando um aumento na  $Pr[LE]$ .

#### 2.4.1.1 Influência de $C_{uc,bs}$ e $C_{uc,dd}$

O sinal transmitido pelo usuário UC deve percorrer uma distância  $C$  e chegar com qualidade na BS, para atingir o objetivo de SINR desejado. Quanto maior for essa distância, mais perdas devido à propagação o sinal enviado sofrerá, e maior deverá ser  $P_{UC}$  para se atingir a SINR

desejada.

A modelagem do canal feita pela Equação 2.3 estabelece que estas perdas não são lineares, mas aumentam exponencialmente com a distância, em função de  $\alpha$ . Ao se diminuir, por exemplo, a distância de interesse pela metade as perdas serão diminuídas em, aproximadamente, 11 vezes, para  $\alpha = 3, 5$ . Dito de outra forma, nota-se que aumentar (ou diminuir)  $C_{uc,bs}$  tem grande efeito sobre a potência mínima requerida para o usuário UC.

Mas, ao se aumentar  $C_{uc,bs}$  e, por consequência, exigir maior  $P_{UC}$ , a potência de transmissão do sinal de UC crescerá em todas as direções, uma vez que o dispositivo móvel é omni-direcional. Como esse sinal também percorrerá uma distância  $C_{uc,dd}$  até o usuário  $D2D_{rx}$ , onde será recebido como um sinal interferidor, acréscimos na potência  $P_{UC}$  significam aumento na potência de interferência medida pelo usuário D2D. Nesse segundo caso, é desejável se ter uma distância de interferência maior, pois, da mesma forma, o sinal será atenuado devido a propagação até encontrar  $D2D_{rx}$  em função de  $C_{uc,dd}$ .

Posto isso, vê-se que a relação entre  $C_{uc,dd}$  e  $C_{uc,bs}$  é importante para a determinação de  $d_{crit}$ . Enquanto  $C_{uc,bs}^\alpha$  determina o valor de  $P_{UC}$ ,  $C_{uc,dd}^\alpha$  determina quanto desta potência chegará como interferência para o enlace D2D. Portanto, mais do que qualquer uma das distâncias analisadas independentemente, a razão  $(\frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd}})^\alpha$  é que determinará fortemente a interferência vista pelo enlace D2D e, portanto, influenciará fortemente no valor de  $d_{crit}$  como mostra a expressão (2.11).

#### 2.4.1.2 Influência de $D_{dd,bs}$ e $D_{dd,dd}$

O estudo do efeito de  $D_{dd,bs}$  e  $D_{dd,dd}$  pode ser feito de forma análoga àquele para  $C_{uc,dd}$  e  $C_{uc,bs}$ . Neste caso  $D_{dd,dd}$  será a distância de interesse e  $D_{dd,bs}$ , a distância de interferência. Há uma sutil diferença, contudo, na análise de  $D_{dd,dd}$  e  $D_{dd,bs}$ . A interferência que o enlace secundário gera na camada primária é limitada pelo fator  $\kappa$ , o que significa que, se  $D_{dd,bs}$  for pequeno e houver poucas perdas por propagação na distância de interferência, então  $P_{dd}$  estará limitado a um valor pequeno. Se este valor for suficiente para oferecer um enlace de qualidade à distância  $D_{dd,dd}$ , então se diz que o enlace é possível nesse caso.

Para a camada primária,  $C_{uc,bs}$  determina  $P_{UC}$  para atender ao requisito de qualidade e, por consequência,  $C_{uc,dd}$  determina a interferência que o enlace primário causa na camada secundária. Para o enlace D2D,  $D_{dd,bs}$  determina  $P_{dd}$  com base na interferência causada por esse enlace na BS (e por consequência  $D_{dd,dd}$  determina a potência com que este enlace é visto pelo receptor  $D2D_{rx}$ ).

De fato, ao analisar a Equação 2.11, que define  $d_{crit}$ , observa-se que  $D_{dd,bs}$  tem forte influência sobre a distância máxima sobre qual o enlace pode existir. Quando  $(\frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd}})^\alpha \rightarrow 0$ , o denominador do lado direito dessa equação será o menor possível e  $d_{crit}$  será máximo para dado  $D_{dd,bs}$  fixo:

$$\lim_{\left(\frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd}}\right)^\alpha \rightarrow 0} D_{dd,bs} \left\{ \frac{\kappa}{\beta_{dd}(1 + \beta_{UC} \left(\frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd}}\right)^\alpha (1 + \kappa))} \right\}^{1/\alpha} = D_{dd,bs} \left( \frac{\kappa}{\beta_{dd}} \right)^{1/\alpha} \quad (2.12)$$

Em geral,  $\kappa < \beta_{dd}$ , uma vez que o primeiro representa apenas margem de projeto (acréscimo de potência) e o segundo a SINR desejada para um enlace. Assim, na Equação 2.12, tem-se que  $d_{crit} < D_{dd,bs}$ , ou seja, a distância entre o transmissor D2D e a BS exerce uma limitação sobre a distância máxima permitida para este enlace.

A figura 2.3 mostra o comportamento da probabilidade de existência do enlace D2D quando  $D_{dd,bs}$  é fixado, estabelecendo uma circunferência de raio fixo ao redor da BS. Em todos os casos simulados e apresentados no gráfico, a probabilidade de enlace para  $D_{dd,dd} = D_{dd,bs}$  é sempre 0. Além disso, quando  $D_{dd,dd} \ll D_{dd,bs}$  a probabilidade de existência do enlace é elevada (acima de 0.7), mas diminui rapidamente a medida que  $D_{dd,dd} \rightarrow D_{dd,bs}$ . Esse resultado mostra que se o  $D2D_{tx}$  estiver próximo da BS, a probabilidade de que consiga estabelecer um enlace é pequena, e, de forma oposta um usuário localizado na borda da célula tem grandes chances de ser autorizado a transmitir na camada secundária.

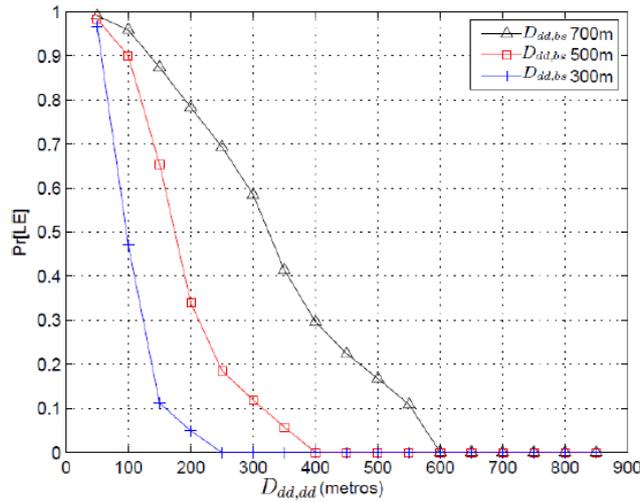


Figura 2.3: Curvas de probabilidade de existência do enlace em função de  $D_{dd,dd}$  para diferentes valores de  $D_{dd,bs}$  fixado.

#### 2.4.1.3 Influência de $\alpha$

O coeficiente de propagação,  $\alpha$ , determina a intensidade das perdas de potência na propagação do sinal. Um coeficiente maior leva a perdas maiores. Na grande maioria dos casos, um  $\alpha$  ele-

vado exige maior potência de transmissão para se atingir a SINR desejada nos enlaces celulares. Contudo, no caso em questão, o coeficiente de propagação também influi no sinal interferidor, diminuindo a potência de interferência consoante o aumento de  $\alpha$ .

Como visto na Seção 2.4.1.2, para o caso em questão, tem-se que o enlace D2D é realizável para distâncias curtas ( $D_{dd,dd} < D_{dd,bs}$ ). Com base nisso, nota-se que, ao aumentar-se o parâmetro  $\alpha$ , o sinal enviado pelo transmissor D2D sofre mais perdas na distância de interferência do que na distância de interesse. Em outras palavras, em um ambiente com maior coeficiente de propagação, é possível aumentar a potência de transmissão D2D sem exceder a margem de interferência na BS, pois as perdas desse enlace aumentam. Há, obviamente, maiores perdas no receptor D2D, também, mas, se  $D_{dd,dd} < D_{dd,bs}$  e as perdas por propagação aumentam de forma não linear com a distância, as perdas na distância de interesse são proporcionalmente menores.

Este efeito deixa de ser verdade se  $D_{dd,dd} > D_{dd,bs}$ , contudo, quando ocorre uma situação como esta, à luz da Seção 2.4.1.2, sabe-se que o enlace D2D nunca será contemplado e, portanto, não há perdas na probabilidade de existência do enlace, que já é nula para esse evento.

Por outro lado, se a potência recebida por  $D2D_{rx}$  aumenta para  $D_{dd,dd} < D_{dd,bs}$ , é preciso considerar o aumento ou a diminuição da interferência medida pelo enlace D2D, devido à transmissão de UC. De acordo com a Seção 2.4.1.1 a interferência medida pelo enlace D2D está relacionada a  $(\frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd}})^\alpha$ . Para  $\frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd}} < 1$ , o acréscimo no coeficiente de propagação diminui rapidamente os efeitos da interferência sentidos pelo enlace D2D. Com o acréscimo da potência recebida e a diminuição da interferência vista, a tendência é que a distância crítica aumente, oferecendo maior área de cobertura para o enlace D2D.

Quando  $\frac{C_{uc,bs}}{C_{dd,bs}} \gg 1$ , a interferência tende a aumentar rapidamente com o aumento de  $\alpha$ , porém, quando isso ocorre, a distância crítica tende a ser muito baixa (como mostra a Equação 2.11). Diminuir ainda mais essa distância já pequena não traz grandes prejuízos, pois, mesmo para  $\alpha$  pequeno a área de cobertura do enlace é tão pequena que  $\Pr[LE]$  tende a ser nula.

Para valores de  $\frac{C_{uc,bs}}{C_{dd,bs}}$  próximos a 1, a interferência tende a sofrer pouca alteração com a alteração no coeficiente de propagação, e, neste caso, domina sobre a SINR o efeito do ganho de potência recebida no enlace D2D.

Assim, um ambiente com coeficiente de propagação elevado tende a oferecer maior probabilidade de existência do enlace do que um ambiente mais suave. A Figura 2.4 mostra este efeito. À medida que o valor de  $\alpha$  do ambiente aumenta, a curva de probabilidade é deslocada para a direita, mostrando um aumento em  $\Pr[LE]$  em função da distância do enlace.

## 2.4.2 Influência dos parâmetros de projeto

Existem alguns parâmetros de projeto ( $\kappa, \beta_{dd}, \beta_{mu}$ ) que são determinados a fim de se atingir certos critérios de qualidade na transmissão. No caso da comunicação D2D sobreposta à comuni-

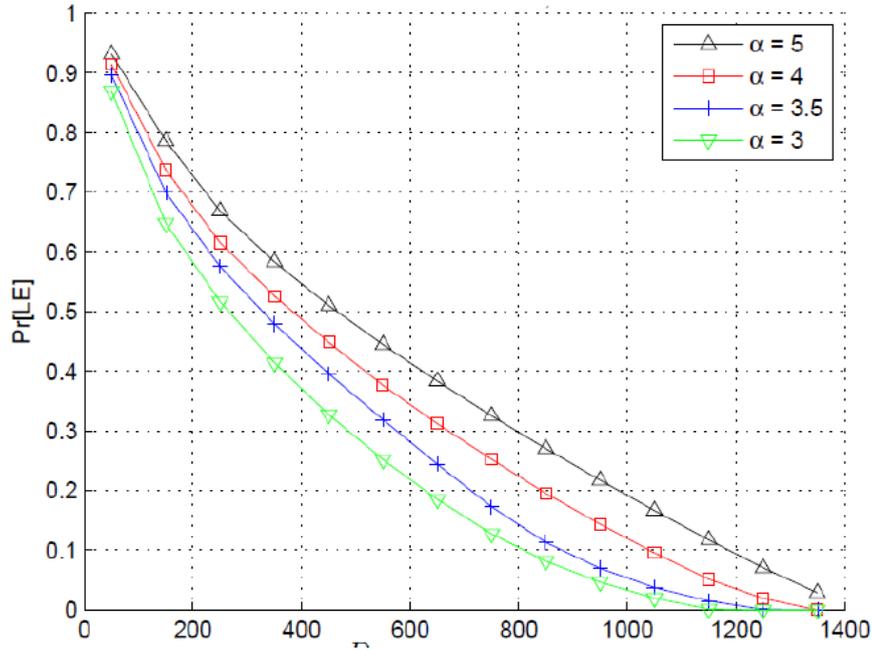


Figura 2.4: Curvas de probabilidade de existência do enlace em função da distância para D fixado

cação celular, a escolha destes parâmetros é um compromisso entre SINR do sinal, probabilidade de compartilhamento e potência gasta. As próximas seções apresentam a análise sobre estes parâmetros desenvolvidas nesse estudo.

#### 2.4.2.1 Influência de $\kappa$

O parâmetro  $\kappa$  ajusta a margem de potência na transmissão primária, ou seja, é a margem de tolerância à interferência que pode ser preenchida pela transmissão D2D. Ao se aumentar o valor dessa margem, a BS está sinalizando para o usuário  $D2D_{tx}$  que ele pode aumentar sua potência de transmissão como mostra a Equação (2.8). Este processo eleva a potência recebida por  $D2D_{rx}$ .

Entretanto, aumentar a margem  $\kappa$ , mantendo fixo o valor de  $\beta_{uc}$ , significa acréscimos na potência mínima a ser recebida na BS, o que acarreta acréscimos na potência transmitida pelo usuário UC (2.5)), para aumentar a robustez à interferência. Assim, se por um lado a potência do sinal recebido por  $D2D_{rx}$  é elevada por essa decisão, a interferência devido a transmissão primária também o será e o ganho em SINR no enlace secundário é atenuado.

Do ponto de vista exclusivo do usuário UC, não existe motivação em se aumentar  $\kappa$ , pois esta é uma margem adicional de potência, ou seja, de potência extra em relação ao mínimo necessário para se estabelecer um enlace primário com qualidade, o que resulta em consumo extra de bateria. Ao transmitir com essa margem, o UC está tomando uma decisão colaborativa com a rede de

forma a permitir a possibilidade de que um usuário secundário reúse este mesmo recurso, o que reitera a necessidade de coordenação de um nó central que busque soluções para atender aos interesses dos usuários da rede (mesmo quando estes são conflituosos entre si) e não apenas aos interesses de um único usuário.

Considerando-se que acréscimo em  $\kappa$  tem efeito limitado sobre o aumento de  $d_{crit}$  e que esta decisão acarreta maior dispêndio de energia pelo primário, a rede precisa conhecer como estas duas grandezas se relacionam, visando à escolha de um valor de  $\kappa$  que aumente  $\Pr[LE]$ , sem prejudicar demais o usuário UC.

Em [16] define-se *sensibilidade* a partir da Equação 2.13. Representada pelo símbolo  $\rho$ , essa sensibilidade é o valor da derivada parcial (taxa de variação) de uma grandeza  $Y$  em termos de um parâmetro  $x$  em um ponto  $x_0$  e mede a influência que variações neste parâmetro tem sobre  $Y$  neste ponto.

$$\rho_{x_i}(Y|x_i = x_{i0}) = \frac{\partial Y(x_0, x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\partial x_i} \Bigg|_{x_i=x_{i0}}, \quad (2.13)$$

Da Equação (2.14), pode-se obter a expressão da sensibilidade de  $d_{crit}$  a uma variação em  $\kappa$ . É possível observar que, há dois fatores que influenciam essa sensibilidade. O valor da distância crítica observada  $d_0$ , dados a disposição dos usuários na célula e certo conjunto de parâmetros e o valor de  $\kappa$ .

A sensibilidade é diretamente proporcional a distância  $d_0$ , quanto maior for o valor dessa distância em dado cenário, maior a sensibilidade de  $d_{crit}$  a variações de  $\kappa$ . Por outro lado, o denominador da expressão é uma função quadrática de  $\kappa$  e, quanto maior for o valor desse parâmetro, menor será a sensibilidade à sua variação e, à medida que  $\kappa \rightarrow \infty$ , tem-se que  $d_{crit} \rightarrow 0$ .

$$\rho_{\kappa}(d_{crit}|d_{crit} = d_0) = \frac{d_0}{(\alpha\kappa)[1 + \beta_{uc}(\frac{C_{uc,bs}}{C_{dd,bs}})^{\alpha}(1 + \kappa)]} \quad (2.14)$$

A Figura 2.5 mostra a influência de  $\rho_{\kappa}(d_{crit})$  sobre a probabilidade de existência do enlace. O valor de  $\kappa$  foi iniciado em 0.25 e dobrado sucessivamente até  $\kappa = 4$ . Para enlaces de curta distância, os ganhos em  $\Pr[LE]$  são pequenos, pois  $\kappa$  tem baixa sensibilidade para  $d_{crit}$  pequeno e é necessário aumentar este parâmetro consideravelmente para que o raio de cobertura do enlace D2D aumente. Considerando, nesta figura, as curvas em que  $\kappa = 0, 25$  e  $\kappa = 4$ , para  $D_{dd,dd} = 200$  m, a probabilidade de existência do enlace é de aproximadamente 0,55 no primeiro caso e 0,65 no segundo, o que dá um aumento de 18% em  $\Pr[LE]$ . Tomando  $D_{dd,dd} = 600$  m,  $\Pr[LE]$  salta de aproximadamente 0.1 para mais de 0,35, um ganho superior a 250% e um valor de probabilidade maior, em termos absolutos, que no caso de  $\kappa = 0, 25$  e  $D_{dd,dd} = 200$  m.

Além disso, as curvas passam a se aproximar à medida que se aumenta  $\kappa$ , pois, como visto na Equação (2.14), quanto maior o valor deste parâmetro, menor a sensibilidade de  $d_{crit}$ . Ou seja,

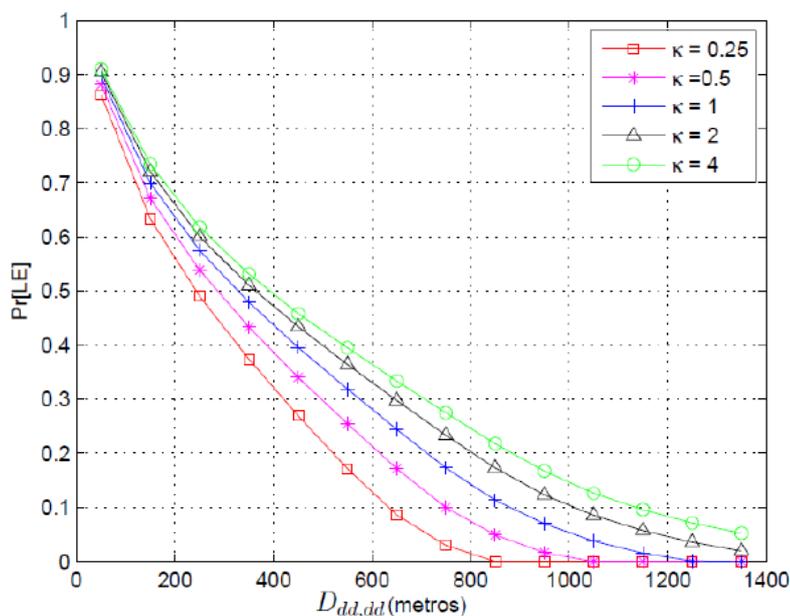


Figura 2.5: Curvas de probabilidade de existência do enlace em função da distância para diferentes valores de  $\kappa$ .

o ganho apresentado no gráfico de uma curva para outra passa a diminuir, ainda que se continue dobrando  $\kappa$ .

Vale ressaltar ainda, nesta mesma figura, que, para  $D_{dd,dd} \geq 300$  m, a escolha de  $\kappa$  pode ser decisiva para que se tenha alguma possibilidade de estabelecer o enlace D2D. Para  $D_{dd,dd} \geq 400$  m, por exemplo, a curva para  $\kappa = 4$  apresenta um ganho de quase 10 pontos percentuais em relação a curva de  $\kappa = 1$ .

O valor escolhido para  $\kappa$  será igual a 1 nos próximos cenários apresentados, salvo disposição em contrário. Esta decisão representa uma margem de 3dB em  $P_{dd}$  e apresenta uma solução de compromisso razoável, pois valores menores para a margem de projeto diminuem a probabilidade de existência do enlace de forma considerável para grandes distâncias, mas valores maiores trazem pouco ganho a um custo elevado de potência ( $\kappa = 2$ , leva, por exemplo, ao aumento de 4,7dB em  $P_{dd}$ ). No Cap. 4, a motivação desta escolha ficará mais clara.

#### 2.4.2.2 Influência de $\beta_{dd}$

O valor de  $\beta_{dd}$  representa a SINR mínima requerida no enlace secundário. Dado que a potência de transmissão desse enlace está limitada pelo parâmetro  $\kappa$  (Equação (2.8)), o aumento na SINR requerida pode não ser atendido por acréscimo na potência de transmissão de  $D2D_{tx}$ . Portanto,

aumentar  $\beta_{dd}$  significa reduzir o raio de cobertura do enlace D2D, se a margem  $\kappa$  não permitir aumentos na potência desse transmissor.

De forma analítica, a sensibilidade da distância crítica em função desse parâmetro pode ser expressa pela Equação 2.15. Nessa expressão,  $\rho_{\beta_{uc}}(d_{crit})$  tem sinal negativo, isto é, uma variação positiva no valor desse parâmetro leva a decréscimo na distância crítica final. Além disso, o módulo da sensibilidade será diretamente proporcional a distância crítica e inversamente proporcional ao valor da SINR requerida ( $\beta_{dd}$ ).

Diminuir a SINR mínima no secundário é uma decisão que deve ser compensada com redução na ordem da modulação do sistema ou aumento na taxa de codificação do canal. Assim, considerando-se 3 tipos de modulações (QPSK, 16QAM e 64QAM, por exemplo), existem 3 curvas de nível ao redor de  $D2D_{tx}$  para o qual ele pode prover serviços satisfatoriamente utilizando cada uma dessas modulações. Essas curvas dependem de  $\beta_{dd}$  para cada uma das modulações disponíveis.

$$\rho_{\beta_{dd}}(d_{crit}|d_{crit} = d_0) = \frac{-d_0}{\alpha\beta_{dd}} \quad (2.15)$$

Supondo codificação, ou seja, maior taxa de transmissão líquida, a SINR requerida para o enlace D2D será adotada de acordo com os valores da tabela 2.2 como referência.

Tabela 2.2:  $\beta_{dd}$  em função da modulação

<b>Modulação</b>	$\beta_{dd}$
QPSK	5 dB
16QAM	7 dB
64QAM	10 dB

A figura 2.6 mostra o resultado de simulação para os dados apresentados na Tabela 2.2. É possível observar que, conforme esperado, as curvas que representam um limiar mais alto para  $\beta_{dd}$  apresentam pior desempenho em termos de  $\Pr[LE]$ . Além disso, observa-se a linearidade da influência de  $\beta_{dd}$  ao observar que o ganho que separa as curvas de  $\beta_{dd} = 7$  dB e  $\beta_{dd} = 10$  dB é aproximadamente o dobro em pontos percentuais daquele oferecido pela curva de  $\beta_{dd} = 7$  dB em relação a curva de  $\beta_{dd} = 5$  dB. Isso ocorre pois um aumento de 2 dB representa aumento de 1,585 vezes na SINR do enlace secundário, enquanto que um acréscimo de 3 dB significa dobrar esse valor.

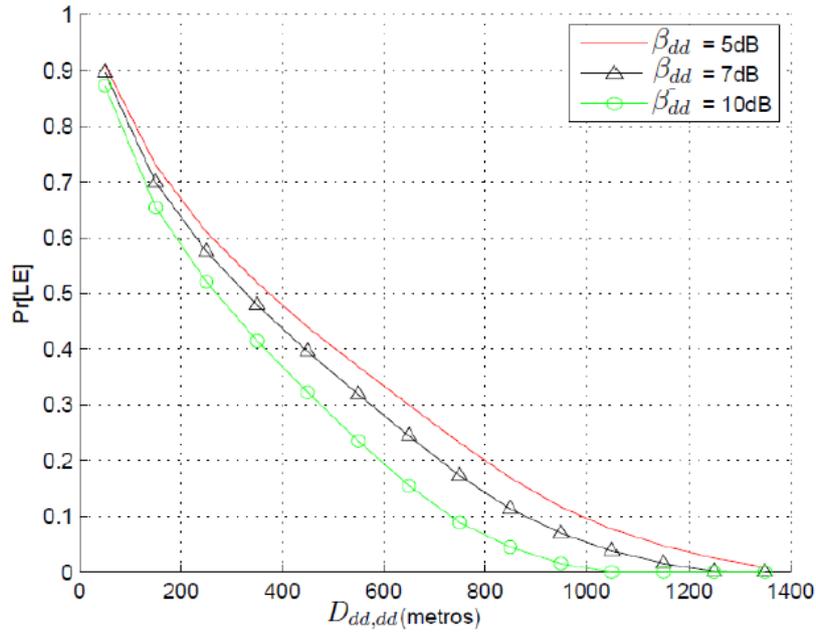


Figura 2.6: Curvas de probabilidade de existência do enlace em função da distância para diferentes valores de  $\beta_{dd}$ .

### 2.4.2.3 Influência de $\beta_{uc}$

O valor de  $\beta_{uc}$  é um parâmetro de qualidade a ser atendido no enlace primário. Um  $\beta_{uc}$  representa um limiar de SINR maior, isto é, leva à necessidade de maior  $P_{UC}$ . O que significa, para o secundário, um aumento da interferência devido a  $P_{UC}$ , mas sem a contrapartida de um aumento em  $P_{dd}$ , como ocorria no caso do aumento em  $\kappa$ .

Por um lado, acréscimos em  $\beta_{uc}$  tendem a prejudicar a SINR do enlace D2D o que reduz, consequentemente, a  $Pr[LE]$ . Por outro, diminuir  $\beta_{uc}$  significa aumentar a  $Pr[LE]$ , contudo esta decisão acarreta diminuição na qualidade do enlace do usuário celular, representando uma colobaração do primário com o secundário, mas também um prejuízo para aquele em razão da competição por recursos. Isso porque, para compensar a perda na SINR mínima do enlace, é necessária uma redução na taxa de modulação do sistema ou aumento na taxa de codificação do canal o que diminui a taxa de transmissão líquida do sistema.

A Equação (2.16) mostra a sensibilidade de  $d_{crit}$  em função do parâmetro  $\beta_{uc}$ . Como no caso anterior de  $\beta_{dd}$  essa sensibilidade tem sinal negativo, pois, como discutido, o aumento desse parâmetro diminui  $d_{crit}$ . Além disso, a sensibilidade depende da razão  $(\frac{C_{uc,bs}}{C_{dd,bs}})^\alpha$  e da margem de projeto adotada.

$$\rho_{\beta_{uc}}(d_{crit}|d_{crit} = d_0) = \frac{-d_0}{\alpha} \frac{\left(\frac{C_{uc,bs}}{C_{dd,bs}}\right)^\alpha (1 + \kappa)}{1 + \beta_{uc} \left(\frac{C_{uc,bs}}{C_{dd,bs}}\right)^\alpha (1 + \kappa)} \quad (2.16)$$

Como visto na Seção 2.4.1.1, ao se aumentar a potência do usuário UC, aumentar-se-á a potência recebida tanto pela BS como por  $D2D_{rx}$  (interferência). Portanto, como a interferência gerada no enlace D2D pelo usuário celular está ligada a razão  $\frac{C_{uc,bs}}{C_{dd,bs}}$  se essa razão é elevada, então o acréscimo de potência necessário para elevar  $\beta_{uc}$  até um nível maior desejado é sentido fortemente pelo usuário secundário (alta sensibilidade). Do contrário, se a distância de interesse é muito menor que a distância de interferência, então o acréscimo em  $P_{UC}$  será sentido fracamente por  $D2D_{rx}$ , (baixa sensibilidade). Como mostra o conjunto de equações (2.17).

$$\begin{cases} \lim_{(\frac{c}{c})^\alpha \rightarrow \infty} \rho_{\beta_{uc}}(d_{crit}|d_{crit} = d_0) = \frac{-d_0}{\alpha \beta_{uc}} \\ \lim_{(\frac{c}{c})^\alpha \rightarrow 0} \rho_{\beta_{uc}}(d_{crit}|d_{crit} = d_0) = 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

Considerando-se que secundário e primário transmitem na mesma tecnologia e tem, portanto, a mesma duração de símbolo, se um usuário primário opta por uma modulação QPSK (2 *bits* por símbolo) em vez de 16QAM (4 *bits* por símbolo), reduzindo sua SINR, apenas para permitir a entrada de um usuário na rede e que este secundário transmita em QPSK, a taxa de transmissão global da célula é mantida constante (4 *bits* por tempo de símbolo), mas dois usuários estão sendo atendidos.

Abaixar a SINR no primário para fazer reuso do recurso não leva necessariamente a uma maximização da taxa de transmissão por meio deste recurso. Os protocolos adotados devem decidir para que tipos de serviço é possível essa diminuição e, nas situações de conflito, entre a priorização do número de usuários contemplados ou a maximização da taxa, ou ainda, a transmissão no primário.

O valor de  $\beta_{uc}$  adotado para cada tipo de modulação, no cenário de simulação, encontra-se na tabela 2.3. O valor de  $\beta_{dd}$  simulado foi de 7 dB.

Tabela 2.3:  $\beta_{uc}$  em função da modulação

Modulação	$\beta_{uc}$
QPSK	10 dB
16QAM	12 dB
64QAM	15 dB

O gráfico mostrado na figura 2.7 aponta que aumentar  $\beta_{uc}$  tem efeitos degradantes sobre a probabilidade de existência do enlace. Nesse caso, a troca da ordem de modulação no primário ofereceu um ganho menor do que aquele visto para a troca de modulação no secundário (figura

2.6). Apesar de  $d_{crit}$  aparecer explicitamente no numerador da Equação (2.16), nota-se que, para distâncias muito grandes ( $D_{dd,dd} \geq 800m$ ), a sensibilidade de  $Pr[LE]$  ao valor de  $\beta_{uc}$  decresce (o ganho diminui no gráfico). Isso se dá porque, em geral,  $d_{crit}$  será elevado quando  $(\frac{C_{uc,bs}}{C_{dd,bs}})^\alpha$  for baixo (denominador pequeno na Equação (2.11)); e, neste caso, a Equação (2.17) demonstra que a sensibilidade tende a ser baixa.

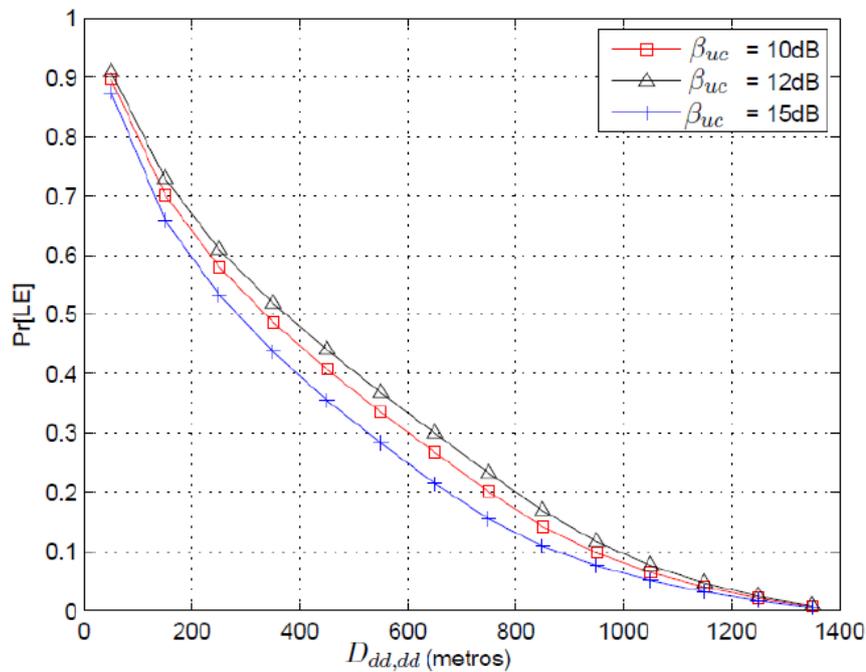


Figura 2.7: Curvas de probabilidade de existência do enlace em função da distância para diferentes valores de  $\beta_{dd}$

## 2.5 ABORDAGEM MULTICANAL

As probabilidades de existência do enlace mostradas até aqui contemplam o caso em que há apenas um recurso disponível para ser compartilhado entre usuário primário e secundário. À medida que se aumenta o número de canais, a tendência é que a probabilidade mostrada nas seções anteriores aumente. A presente seção estuda o aumento de probabilidade no caso em que há mais de 1 recurso a ser compartilhado.

Nesse cenário, considera-se que há  $N_{sc}$  canais disponíveis, cada um deles podendo ser acessado por um usuário celular e admitir transmissões D2D na camada secundária. No momento em que usuários D2D tentam estabelecer a comunicação, todos os  $N_{sc}$  recursos estão ocupados e a rede tentará descobrir se há algum recurso em que seja possível se estabelecer esse enlace

secundário. O acesso é permitido se houver pelo menos um recurso no qual se possa estabelecer a comunicação D2D.

A probabilidade de existência de enlace nesse caso é definida como a probabilidade de que em *pelo menos um* dos  $N_{sc}$  canais se consiga estabelecer a comunicação secundária entre determinado par D2D. Para entender o ganho de probabilidade inerente ao aumento do número de canais, é preciso voltar ao equacionamento dessas probabilidades. No caso anterior, tomando  $d = D_{dd,dd}$ ,  $C = C_{uc,bs}$ ,  $D = D_{dd,bs}$ ,  $c = C_{uc,dd}$ , para simplificar a notação, e considerando independência na distribuição destas grandezas tinha-se,

$$\Pr[LE|N_{sc} = 1] = \Pr[d < d_{crit}] = \int_D \int_C \int_c \Pr[d < d_{crit}|D, C, c] p_D(D) p_C(C) p_c(c) dD dC dc, \quad (2.18)$$

em que  $p_x(x)$  representa a função densidade de probabilidade da variável  $x$ . Segundo a teoria de probabilidades, que pode ser encontrada em [17], ao integrar a Equação 2.18 ao longo de  $C_{uc,bs}$  e  $C_{uc,dd}$ , chega-se a

$$\Pr[LE|N_{sc} = 1] = \int_D \Pr[d < d_{crit}|D] p_D(D) dD \quad (2.19)$$

Com o aumento do número de canais, basta que o usuário consiga um recurso para que o enlace seja declarado como existente. Ou, em outras palavras, o complemento de  $\Pr[LE]$ , a probabilidade de não-existência do enlace ( $\Pr[LNE]$ ), mede a chance de que não seja possível estabelecer o enlace em nenhum dos outros canais. Mas, lembrando-se que  $d_{crit}$  é função de  $D_{dd,bs}$ ,  $C_{uc,bs}$  e  $C_{uc,dd}$  e que  $D_{dd,bs}$  depende apenas da posição de  $D2D_{tx}$  e não é alterado para nenhum dos  $N_{sc}$  canais, enquanto  $C_{uc,bs}$  e  $C_{uc,dd}$  tem diferentes valores para cada um dos  $N_{sc}$  enlaces, portanto,

$$\Pr[LNE|N_c] = \int_D \Pr[d > d_{crit,0}|D] \Pr[d > d_{crit,1}|D] \dots \Pr[d > d_{crit,N_{sc}-1}|D] p(D) dD, \quad (2.20)$$

em que  $d_{crit,i}$  representa a distância crítica para o usuário no acesso ao  $i$ -ésimo recurso. Ou, escrevendo de forma mais sintética, considerando as distâncias críticas independentes:

$$\Pr[LNE|N_c] = \int_D \Pr[d > d_{crit}|D]^{N_{sc}} p_D(D). \quad (2.21)$$

Portanto a probabilidade de que pelo menos um recurso consiga suportar a existência desse enlace nessa situação é dada por:

$$\Pr[LE|N_c] = 1 - \Pr[LNE|N_c] = 1 - \int_D \Pr[d > d_{crit}|D]^{N_{sc}} p_D(D). \quad (2.22)$$

Sabendo-se que, se tratando de uma medida de probabilidade,  $\Pr[d > d_{crit}|D]$  assume valores menores entre 0 e 1, aumentar o número de canais, significa reduzir  $\Pr[d > d_{crit}|D]^{N_{sc}}$ . Mas, como  $D_{dd,bs}$  rege fortemente a probabilidade de existência do enlace e basta que  $D_{dd,bs}$  seja muito pequeno para que seja muito difícil se estabelecer o enlace, aumentar o número de canais traz um ganho em termos de  $\Pr[LE]$ , mas este ganho é limitado e passa a diminuir a medida que se aumenta  $N_{sc}$ , como mostra a figura 2.8. Este fenômeno ocorre porque, uma vez que  $D < d$  não importa quantos canais estejam disponíveis, o enlace não poderá ser estabelecido.

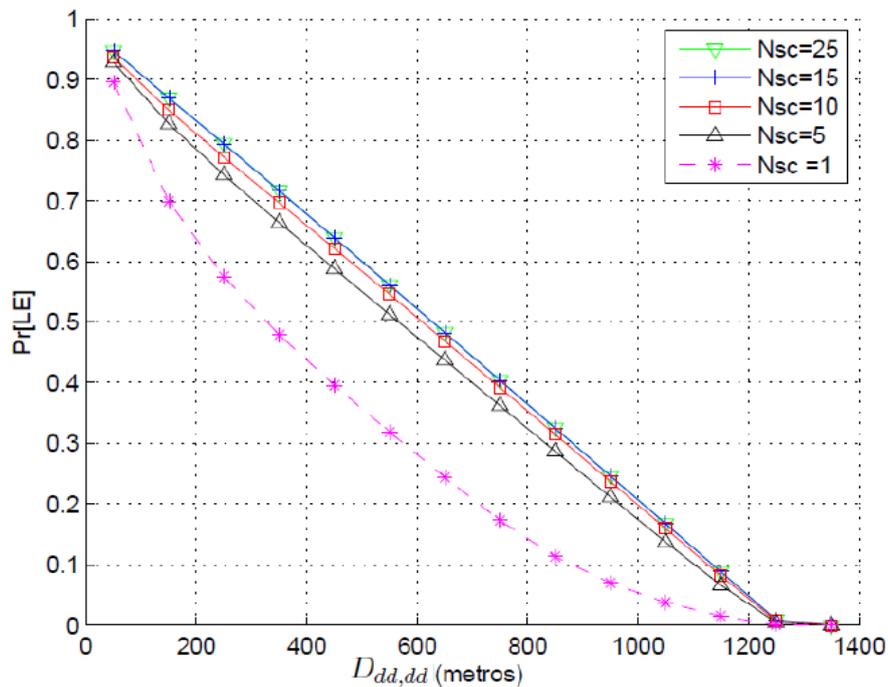


Figura 2.8: Resultados de simulação para o cenário 1, para vários valores de  $N_{sc}$

## 2.6 CONCLUSÃO

A comunicação D2D tem sido vista como uma estratégia que, nas futuras gerações de tecnologias para comunicação sem fio, pode aumentar a taxa de transmissão global do sistema. A maximização da taxa e dos usuários atendidos é obtida por meio dos recursos disponíveis na rede celular, utilizados por uma comunicação D2D subjacente.

Em outras palavras, o objetivo é que um usuário celular e um enlace D2D sejam capazes de compartilhar o mesmo recurso (em tempo e frequência). Uma das formas de se obter esse compartilhamento é realizar o controle de interferência do secundário no primário por meio de uma coordenação central.

O método de controle de interferência proposto em [14] e apresentado neste capítulo oferece uma idéia de uma estratégia a ser utilizada que, priorizando a comunicação celular, oferece uma solução interessante para enlaces D2D.

Ao longo deste capítulo, estudou-se a influência que as diversas variáveis do cenário tem na probabilidade de estabelecimento do enlace D2D quando já há um usuário celular utilizando-se do recurso em questão.

O estudo das variáveis de cenário mostra que a razão entre a distância do transmissor celular para a torre e a distância deste mesmo dispositivo ao receptor D2D tem forte influência na  $Pr[LE]$ . O valor absoluto destas distâncias em si não diz muito, mas a razão entre elas é bem significativa, uma vez que esta razão é quem determinará a parcela de interferência vista pelo secundário.

Além disso, nota-se que a distância do transmissor D2D à torre deve ser superior ao comprimento total do enlace D2D. Caso essa condição não seja atendida, o enlace será inviável, pois violará a restrição de interferência na BS. Em outras palavras, isto significa que um enlace D2D mais afastado do centro da célula tem chance maior de ser atendido do que um enlace mais centralizado.

Quanto ao tipo de ambiente, mostrou-se para o modelo apresentado que, quanto maior o valor do coeficiente de propagação, maior a probabilidade de existência do enlace. Esta ocorrência deve-se ao fato de que, apesar de o ambiente ser considerado mais severo, como  $D_{dd,bs}$  deve ser maior que  $D_{dd,dd}$  como condição inicial para o estabelecimento do enlace, um coeficiente de propagação maior provocará mais perdas no sinal interferente do que aquelas vistas na direção de interesse.

Os fatores de projeto, aqueles que podem ser controlados de acordo com os interesses do projetista, foram analisados segundo a sensibilidade da distância crítica a estes parâmetros.

Nesta análise, observa-se que aumentar o limiar de SINR mínima para o enlace primário ou para o enlace secundário diminui a probabilidade média de existência do enlace. Esse comportamento justifica-se pois um limiar maior exige maior potência para ser atingido o que resulta em maior interferência gerada entre as camadas de comunicação e uma maior interferência percebida por cada uma delas em isolado. Contudo, esta variação será para limiares maiores (sensibilidade mais baixa) do que para limiares menores (sensibilidade mais baixa).

Por fim, observou-se o comportamento do sistema em relação à margem tolerável de ruído que é gerado pelo secundário no primário. Embora aumentar esta taxa represente um acréscimo na probabilidade de existência do enlace, uma solução de compromisso deve ser adotada, pois aumentar esta margem significa acréscimo na potência de transmissão do primário e este valor não pode ser acrescentado indefinidamente.

Apesar de todas as conclusões apresentadas neste capítulo mostrarem que é possível sob certas circunstâncias obter um reaproveitamento do recurso, nenhuma conclusão sobre a melhor

maneira de distribuir os recursos entre usuários D2D concorrentes foi apontada. No Cap. 4, será apresentada uma rede onde há múltiplos recursos utilizados pela rede primária e vários enlaces D2D concorrendo pelo reaproveitamento dos mesmos.

Nesta situação serão apresentadas estratégias de alocação que maximizem o número de usuários acessando a rede. Além disso, um estudo sobre o aumento na taxa global do sistema será feito, uma vez que apenas a análise sobre probabilidade de existência do enlace não é suficiente para entender e perceber se o objetivo inicial (aumento da taxa de transmissão de dados da rede) foi atendido.

# 3 CDMA NA CAMADA SECUNDÁRIA

*Neste capítulo será analisada a comunicação D2D desenvolvida por um acesso CDMA sobreposto a uma camada primária que utiliza a tecnologia OFDM. Este capítulo se propõe a realizar o equacionamento necessário e investigar, por meio de simulação, eventuais ganhos providos pelo acesso CDMA.*

## 3.1 INTRODUÇÃO

No Cap. 2, investigou-se o uso da comunicação D2D como forma de aumentar o reaproveitamento dos recursos da rede. Nesse mesmo capítulo, a análise dos parâmetros do modelo apontou que enlaces intracelulares de longa distância não estavam aptos a realizar o compartilhamento do recurso, em um acesso D2D, respeitando as margens de interferência do sistema. A distância máxima do enlace D2D não poderia exceder uma fração de  $D_{dd,bs}$ , definida em função dos parâmetros  $\beta_{dd}$  e  $\kappa$ .

Quanto maior o valor de  $\beta_{dd}$ , maior a potência recebida mínima necessária para que a SINR seja atendida no receptor D2D. Contudo, estando limitada a interferência que este enlace gera no primário, a potência transmitida também estará. Estes dois fatos juntos exercem forte limitação à área de cobertura do enlace D2D, principalmente para maiores valores de SINR.

No presente capítulo, busca-se uma nova forma de acesso aos recursos na camada secundária, a fim de prover maior cobertura para enlaces ponto a ponto dentro de uma célula de transmissão, maximizando a probabilidade de reaproveitamento dos recursos.

A tecnologia CDMA foi escolhida como uma possível forma de acesso à camada secundária, devido à sua natureza de espalhar a energia de transmissão ao longo de uma larga faixa de espectro. Sendo a interferência um dos principais fatores que minimizam a cobertura do enlace D2D esse comportamento dos sistemas CDMA pode ser útil, dividindo a interferência total em diferentes recursos da rede primária (OFDM).

Neste capítulo, será proposto o novo esquema de acesso da camada secundária, será apresentada a formulação usada no estudo e os resultados de simulação, analisando o comportamento da probabilidade de existência do enlace para o acesso do tipo CDMA.

Algumas das formulações apresentadas foram inspiradas em [18], que apresenta um modelo de recepção para a coexistência OFDM/CDMA. No referido estudo, porém, apresenta-se um sistema CDMA com taxa de símbolos fixa e não é realizado o desespalhamento do sinal CDMA no receptor, mas um processo de detecção por máxima verossimilhança. Além disso, a taxa

de símbolos do sistema CDMA apresentada é a mesma do que a oferecida por uma portadora banda estreita OFDM, o que representa baixa eficiência espectral e uma taxa inferior quando se considera a capacidade multiportadora da transmissão OFDM.

Neste capítulo será realizada a detecção a partir do desespalhamento espectral e o sistema CDMA considerado desenvolvendo um taxa de transmissão comparável àquela provida pelo sistema OFDM.

### 3.2 MODELAGEM DO SISTEMA OFDM

A modulação por múltiplas portadoras OFDM se consolidou como uma técnica importante no rol das comunicações sem fio modernas que buscam atingir altas taxas de transmissão, como as redes WiFi [19], WiMax [20] e 3GPP/LTE [21]. Essa consolidação se deve a vários fatores, entre eles a robustez em relação à interferência intersimbólica (ISI, do inglês *intersymbol interference*) [22] e à seletividade em frequência do canal [23], baixa complexidade do receptor [24] e possibilidade de ser utilizado em bandas largas do espectro com muita flexibilidade na alocação do espectro [25].

Durante a transmissão OFDM, a sequência de símbolos (ou palavras) a ser transmitida é dividida, por meio de de uma conversão série-para-alelo, em  $K$  subseqüências com taxas de transmissão menores, como mostra a Figura 3.1. Cada uma destas subseqüências será transmitida em paralelo e, para preservar o fluxo de símbolos na entrada e na saída do receptor, o tempo de símbolo é aumentado em  $K$  após essa conversão. A duração do símbolo passa, portanto, de  $T$  para  $T_1 = KT$  segundos.

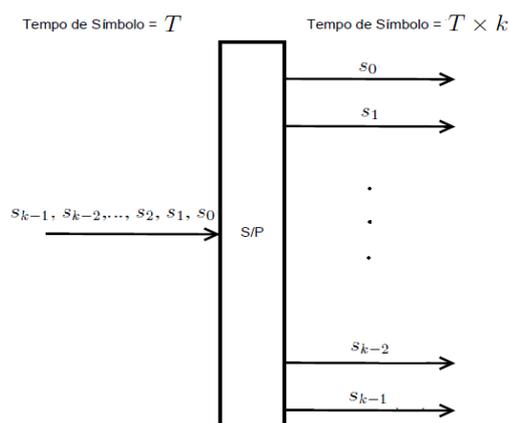


Figura 3.1: Fluxo de símbolos modulados em cada ramo de entrada e saída do conversor Série-Paralelo.

Após essa divisão, cada uma das subseqüências do sinal transmite um símbolo modulado em uma subportadora diferente. Ao conjunto de símbolos transmitidos simultaneamente em cada

subportadora em um intervalo de duração  $T_1$  dá-se o nome de símbolo OFDM.

O mapeamento das palavras nas subportadoras é feito por osciladores que alocam as subportadoras, em diferentes faixas de frequência: à  $k$ -ésima subportadora atribui-se a frequência  $f_k$ , sendo

$$f_k = \frac{k}{T_{ofdm}}, \quad (3.1)$$

em que  $T_{ofdm} = T_1$  é a nomenclatura utilizada para evitar abuso de notação nas seções posteriores.

A Figura 3.2 mostra o esquemático simplificado que descreve o funcionamento de um transmissor OFDM. No oscilador de frequência  $f_k$ , o sinal é multiplicado por  $e^{-j2\pi f_k t}$  e, após o somatório das  $K$  seqüências paralelas, o sinal está pronto para ser transmitido.

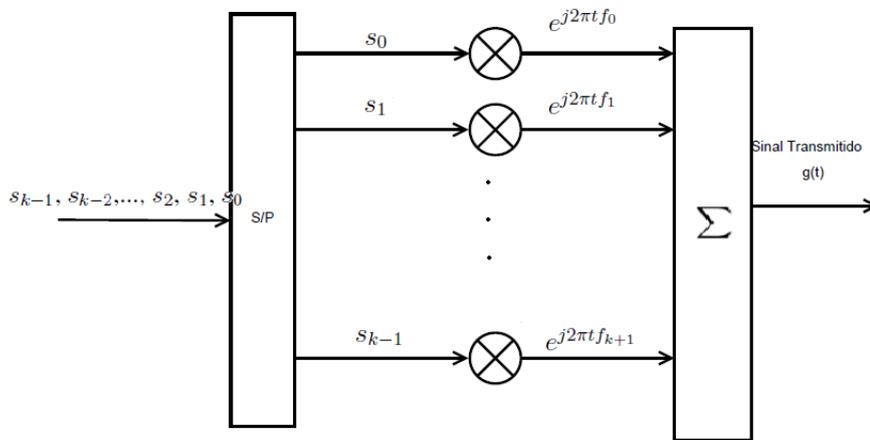


Figura 3.2: Diagrama de Blocos simplificado para o transmissor OFDM

A partir da Equação 3.1, conclui-se que se a transmissão for realizada em um total de  $K = N_{sc}$  subportadoras, então, em um transmissor como o representado na Figura 3.2, o sinal OFDM transmitido no intervalo  $[0, T_{ofdm})$  será:

$$g(t) = \sum_{k=0}^{N_{sc}-1} s_k e^{-j2\pi kt/T_{ofdm}}, \quad (3.2)$$

sendo  $s_k$  o símbolo modulado transmitido na  $k$ -ésima subportadora.

Com base nesse resultado e considerando o modelo de canal adotado no Cap. 2, presente na Equação 2.1, o sinal OFDM recebido,  $y(t)$ , a partir de  $g(t)$ , a uma distância  $d$  do transmissor, será:

$$y(t) = g(t)d^{-\alpha/2} + n(t) \quad (3.3)$$

### 3.2.1 Recepção OFDM

No receptor, deseja-se extrair do sinal recebido a informação contida nos símbolos  $s_k$  transmitidos. Para atingir esse objetivo, cada uma das  $N_{sc}$  subportadoras é demodulada por um ramo diferente do demodulador, como mostra a Figura 3.3.

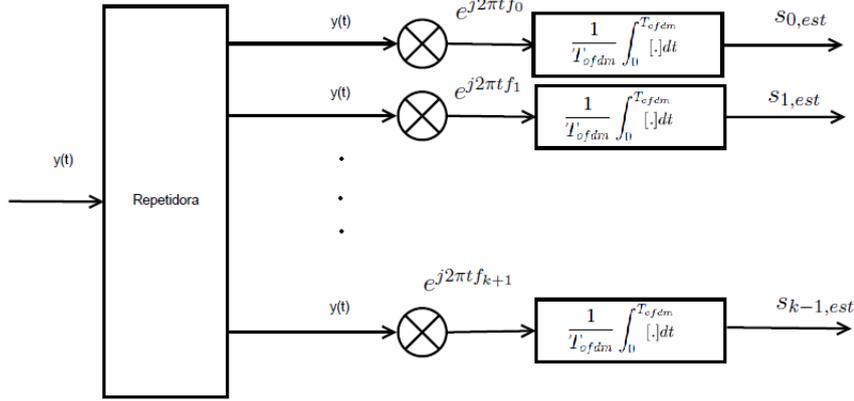


Figura 3.3: Diagrama de blocos simplificado para o receptor OFDM

No  $k$ -ésimo ramo, estima-se o símbolo recebido,  $s_{k,est}$ , a partir da correlação entre  $y(t)$  e  $e^{(j2\pi k \frac{t}{T_{ofdm}})}$ , conforme

$$s_{k,est} = \frac{1}{T_{ofdm}} \int_0^{T_{ofdm}} y(t) e^{j2\pi kt/T_{ofdm}} dt \quad (3.4)$$

Na Equação 3.4,  $s_{k,est}$  é formado por uma integral que envolve  $y(t)$  que é composto por uma soma de um componente de sinal e um componente de ruído (ver Equação 3.3). Portanto, o cômputo de  $s_{k,est}$  pode ser dividido em duas parcelas integradas separadamente.

A parcela correspondente à componente de sinal é dada por

$$\frac{1}{T_{ofdm}} \int_0^{T_{ofdm}} (g(t)d^{-\alpha/2}) e^{j2\pi kt/T_{ofdm}} dt = s_k d^{-\alpha/2} \quad (3.5)$$

e à componente do ruído,

$$n_k = \frac{1}{T_{ofdm}} \int_0^{T_{ofdm}} n(t) e^{j2\pi kt/T_{ofdm}} dt. \quad (3.6)$$

Portanto, a saída do correlator no k-ésimo ramo do demodulador pode ser resumida a

$$s_{k,est} = s_k d^{-\alpha/2} + n_k. \quad (3.7)$$

À luz da Equação 3.7, nota-se que a tomada correta, ou não, de decisão no receptor está, portanto, associada à influência do ruído sobre o sinal recebido, ou em outras palavras, a razão entre a potência do sinal e a potência do ruído [26].

De acordo com as equações 2.3 e 3.5, a potência recebida do sinal é

$$P = E[(s_k d^{-\alpha/2})(s_k d^{-\alpha/2})^*] = |s_k|^2 d^{-\alpha} \quad (3.8)$$

Além disso, o modelo adotado para o ruído  $n(t)$  na Equação 3.3 é do tipo AWGN (do inglês *additive White Gaussian noise*, ou ruído aditivo gaussiano branco), com média 0. Essa variável gaussiana tem como função de autocorrelação

$$R_n(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau) \quad (3.9)$$

Assim, a potência do ruído pode ser medida, a partir da Equação 2.3, pela variância da variável  $n_k$ , que a partir das equações 3.9 e 3.6 pode ser calculada de acordo com

$$N = \frac{N_0}{2T_{ofdm}} \quad (3.10)$$

Logo, pelas equações 3.8 e 3.10, a SNR para a k-ésima subportadora é:

$$\frac{P}{N} = \frac{2T_{ofdm} |s_k|^2 d^{-\alpha}}{N_0} \quad (3.11)$$

### 3.3 MODELAGEM DO SISTEMA CDMA

Sistemas CDMA (do inglês *Code Division Multiple Access*) utilizam técnicas de espalhamento espectral, acrescentando um estágio de modulação adicional que aumenta de forma significativa a banda do sinal a ser transmitido (comparado à banda do sinal de dados modulado). Entre outras vantagens, essa técnica permite supressão de interferências e transmissão bem sucedida em níveis baixos de potência [27]. As duas principais técnicas para espalhamento espectral

utilizadas são a modulação por sequência direta (DS-CDMA, considerado neste estudo, devido a maior simplicidade de seu tratamento matemático) e o salto em frequência (*frequency hopping*).

No DS-CDMA, o sinal transmitido,  $v(t)$ , na  $m$ -ésima palavra é o resultado da multiplicação do sinal modulado, por um sinal de espalhamento,  $h(t)$ :

$$v(t - mT_{cdma}) = C_m h(t - mT_{cdma}), \quad (3.12)$$

em que  $C_m$  representa a  $m$ -ésima palavra modulada que é transmitida durante um período de duração de  $T_{cdma}$  segundos.

Admitir-se-á, deste ponto em diante, que as palavras  $C_m$  seguem uma modulação do tipo BPSK e, então, assumem valores iguais a  $+A$  ou  $-A$ . Além disso, considera-se que o sinal de espalhamento,  $h(t)$ , tem a seguinte forma:

$$h(t) = \sum_{i=0}^{G-1} a_i \psi(t - iT_c). \quad (3.13)$$

Os *chips*  $a_i$ , presentes na Equação 3.13, formam uma sequência pseudo aleatória, que assume valores  $\pm 1$  e tem comprimento  $G$ . O parâmetro  $G$  é também conhecido como ganho de processamento do sistema CDMA e será maior à medida que se aumenta a taxa de *chips* por segundo (diminui-se o tempo de *chip*  $T_c$ ) ou que se diminui a taxa de transmissão de dados (aumenta-se  $T_{cdma}$ ).

A função porta,  $\psi(t)$ , de duração

$$T_c = T_{cdma}/G, \quad (3.14)$$

é limitada no intervalo  $[0, T_c)$  e assume-se, sem perda de generalidade, que sua potência é normalizada de acordo com [27]:

$$\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \psi^2(t) dt = 1. \quad (3.15)$$

Usando-se a Equação 3.13 na eq. 3.12, tem-se que a forma de onda do sinal CDMA transmitido pode ser escrita como:

$$v(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m \sum_{i=0}^{G-1} a_i \psi(t - iT_c - mT_{cdma}). \quad (3.16)$$

### 3.3.1 Espalhamento Espectral

Para compreender de que forma se dá o espalhamento espectral sobre o sinal transmitido, é preciso entender o efeito que a multiplicação por  $h(t)$  tem sobre as palavras moduladas.

Supondo-se que  $C_m$  é um símbolo BPSK de amplitude  $A$ , composto por um pulso de formato retangular de  $T_{cdma}$  segundos sem sobreposição, então, é possível escrever:

$$b_k = C_m a_i = \pm A, \text{ para } \begin{cases} i = 0, 1, \dots, G - 1; \\ m = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty; \\ \text{e } k = mG + i \end{cases} \quad (3.17)$$

A partir da forma sintética da Equação 3.17, é possível reescrever, simplificando-se a Equação 3.16 para  $v(t)$ :

$$v(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k \psi(t - kT_c) \quad (3.18)$$

A função de autocorrelação  $R_v(t, t + \tau)$  de  $v(t)$  é dada por

$$\begin{aligned} R_v(t, t + \tau) &= \overline{h(t)h(t + \tau)} \\ &= \frac{[\sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k \psi(t - kT_c)][\sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n \psi(t - nT_c + \tau)]}{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n \psi(t - kT_c) b_k \psi(t - nT_c + \tau)}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Mas, se os *chips* e os símbolos a serem transmitidos são supostos de distribuições independentes, então, tomando-se  $n = k + m$ , pode-se reescrever a Equação (3.19) :

$$R_v(t, t + \tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \overline{b_k b_{k+m}} \overline{\psi(t - kT_c) \psi(t - (k + m)T_c + \tau)}. \quad (3.20)$$

Por serem sequências aleatórias, isto é, com seus termos independentes entre si,  $\{b_k\}$  e  $\{b_{k+m}\}$  são, também, sequências independentes uma da outra se  $m \neq 0$ . E, portanto, segue que

$$\overline{b_k b_{k+m}} = \begin{cases} \overline{b_k} \overline{b_{k+m}} = (\overline{b_k})^2, \text{ se } m \neq 0 \\ \overline{b_k^2} = A^2, \text{ se } m = 0 \end{cases}. \quad (3.21)$$

Lembrando que os bits 0 e 1 são equiprováveis, tem-se que  $P(a_k = A) = P(a_k = -A) = \frac{1}{2}$ , o que leva a:

$$\overline{a_k} = AP(A) + (-A)P(-A) = \frac{A}{2} + \frac{-A}{2} = 0. \quad (3.22)$$

e

$$\overline{a_k^2} = A^2 P(A) + (-A)^2 P(-A) = \frac{A^2}{2} + \frac{A^2}{2} = A^2. \quad (3.23)$$

Substituindo, por fim, os resultados das equações (3.21),(3.22) e (3.23) na Equação (3.20), pode-se reduzi-la a

$$R_h(t, t + \tau) = A^2 \overline{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \psi(t - kT_c)\psi(t - kT_c + \tau)}. \quad (3.24)$$

Segue, então

$$R_v(t, t + \tau) = A^2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \psi(t - kT_c)\psi(t - kT_c + \tau) d\tau. \quad (3.25)$$

Uma vez que  $\psi(t)$  é limitado em um intervalo de  $T_c$  segundos, o integrando da Equação 3.25 acima pode ser reescrito trocando-se a integral e o somatório de lugar:

$$R_v(t, t + \tau) = A^2 \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{LT_c} \sum_{k=-L/2}^{L/2} \int_{-LT_c/2}^{LT_c/2} \psi(t - kT_c)\psi(t - kT_c + \tau) d\tau = R_v(\tau). \quad (3.26)$$

Realizando uma mudança de variável no integrando acima, tem-se,

$$R_v(\tau) = A^2 \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{LT_c} \sum_{k=-L/2}^{L/2} \int_0^{T_c} \psi(t)\psi(t - \tau) d\tau. \quad (3.27)$$

Por fim, a Equação para a função de autocorrelação do sinal  $v(t)$  pode ser resumida na expressão

$$R_v(\tau) = A^2 \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \psi(t)\psi(t + \tau) d\tau = A^2 \frac{R_\psi(\tau)}{T_c}. \quad (3.28)$$

Assim, utilizando a propriedade que a densidade espectral de potência  $S_f(\omega)$  de um sinal  $f(t)$  como a transformada de Fourier de sua função de autocorrelação tem-se que [28]:

$$S_v(f) = \frac{A^2}{T_c} S_\psi(f). \quad (3.29)$$

Analisando-se a Equação (3.29), é possível inferir que a banda essencial do sinal, após sua multiplicação por uma sequência de espalhamento, depende da função porta utilizada  $\psi(t)$ , e é

inversamente proporcional a duração de um *chip* ( $B_{CDMA} \propto \frac{1}{T_c}$ ), muito superior, portanto, à banda do sinal BPSK modulado  $B_{BPSK} \propto \frac{1}{T_{cdma}}$ , uma vez que  $T_{cdma}/T_c = G$ .

Nota-se, portanto, que o ganho de processamento do sinal  $G$  rege o ganho de banda do sinal após o espalhamento. Quanto maior for o valor de  $G$ , maior será a banda essencial do sinal com espectro espalhado. Como a potência do sinal não é alterada pela multiplicação pelo sinal de espalhamento, o espalhamento do espectro representa a diluição da potência de transmissão em uma banda larga e quanto maior for o ganho de processamento, mais diluída será a potência do sinal.

### 3.3.2 Recepção CDMA

O sinal recebido  $y(t)$  para um sinal CDMA,  $v(t)$ , enviado à distância  $d$  do receptor é

$$y(t) = v(t)d^{-\alpha/2} + n, \quad (3.30)$$

lembrando-se que  $v(t)$  é dado por

$$v(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m \sum_{i=0}^{G-1} a_i \psi(t - iT_c - mT_{cdma}). \quad (3.31)$$

No receptor CDMA, é necessário realizar o desespalhamento do sinal para recuperar a informação transmitida, o que corresponde a multiplicar o sinal recebido pela sequência de espalhamento  $h(t)$  [29]. A tomada de decisão em relação ao símbolo estimado na recepção se dá após uma medida de correlação entre os sinais  $y(t)$  e a sequência de espalhamento  $h(t)$ .

Considerando-se o processo de recepção apenas durante o intervalo de  $[0, T_{cdma})$  segundos, no qual o símbolo  $C_0$  é recebido, pode-se, sem perda de generalidade, analisar a recepção do sinal CDMA. Nessa situação ter-se-á:

$$C_{0,est} = \frac{1}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} y(t)h(t)dt = \frac{1}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} [v(t)d^{-\alpha/2} + n]h(t)dt. \quad (3.32)$$

É possível separar o integrando acima em duas componentes (sinal e ruído). Para a componente do sinal, o integrando será  $v(t)d^{-\alpha/2}h(t)$  e, dessa forma:

$$\frac{d^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} v(t)h(t)dt = \frac{d^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} v(t) \cdot \sum_{i=0}^{G-1} a_i \psi(t - iT_c)dt \quad (3.33)$$

Como  $\psi(t)$  é limitado ao intervalo de  $[0, T_c)$ , então

$$\frac{d^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} v(t)h(t)dt = \frac{d^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \sum_{i=0}^{G-1} \int_{iT_c}^{(i+1)T_c} v(t)a_i\psi(t - iT_c)dt. \quad (3.34)$$

Substituindo-se o valor de  $v(t)$  da Equação 3.16 na eq. 3.34, após algumas manipulações algébricas simples, chega-se a:

$$\frac{d^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} v(t)h(t)dt = \frac{d^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \sum_{i=0}^{G-1} \int_{iT_c}^{(i+1)T_c} C_0\psi^2(t - iT_c)dt. \quad (3.35)$$

Utilizando-se dos resultados das eq. 3.3 e 3.15 na Equação 3.35, tem-se, por fim:

$$\frac{d^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} v(t)h(t)dt = C_0d^{-\alpha/2}. \quad (3.36)$$

Assim, a componente do sinal na saída do correlator corresponde à palavra transmitida,  $C_0$ . A componente do ruído na saída do correlator será:

$$n_0 = \frac{1}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} n(t)h(t)dt = \frac{1}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} n(t) \sum_{i=0}^{G-1} a_i\psi(t - iT_c)dt. \quad (3.37)$$

A potência do sinal na recepção será, de acordo com as equações 2.3 e 3.36, dada por

$$P = C_0^2d^{-\alpha/2} = A^2d^{-\alpha/2}. \quad (3.38)$$

Além disso, usando-se os resultados das equações 3.9 e 3.15 e sabendo-se que  $E[n(t)] = 0$ , então

$$N = var[n_0] = \frac{N_0}{2T_{cdma}}. \quad (3.39)$$

Logo, a razão sinal-ruído na saída do receptor CDMA será

$$\frac{P}{N} = \frac{2C_0^2d^{-\alpha}T_{cdma}}{N_0}. \quad (3.40)$$

### 3.4 INTERFERÊNCIA

Nas comunicações sem fio, o processo de recepção envolve a decodificação do sinal recebido e uma estimação dos prováveis símbolos transmitidos. Quanto menor for o número de erros na estimação, mais fidedigna será a comunicação e maior a chance de efetuá-la com sucesso.

Nesse processo, além da influência negativa do ruído, pode haver um interferidor degradando a qualidade da estimação.

A interferência é o principal fator limitante da comunicação celular e advém geralmente de outros usuários na mesma célula, comunicações nas células vizinhas ou outros aparelhos estranhos à rede celular, mas que injetam potência indevidamente na banda de interesse [26].

No modelo exposto neste estudo, considera-se que a interferência por canal adjacente é desprezível, isto é, há pouca potência radiada fora de banda pelas portadoras vizinhas e interferindo com o sinal recebido. Por outro lado, o reaproveitamento de frequências na mesma célula pressupõe que o receptor percebe fortemente a interferência co-canal (interferidores utilizando o mesmo recurso), uma vez que para que essa interferência seja desprezível os interferidores precisam estar fisicamente bastante afastados para que o sinal interferidor chegue com potência desprezível no receptor.

Nas próximas seções, será estudado, qual o impacto da interferência na recepção do sinal OFDM vindo de fontes CDMA e OFDM e, de forma análoga, qual o impacto na recepção CDMA causado por interferências de sinais do tipo OFDM e CDMA.

### 3.4.1 Interferência na Recepção do Sinal OFDM

Considera-se, primeiramente, o caso em que um usuário OFDM recebe o sinal desejado na presença de interferência, assim a Equação 3.3 pode ser estendida para o caso com interferência :

$$y(t) = g(t)d^{-\alpha/2} + i(t)c^{-\alpha/2} + n(t), \quad (3.41)$$

em que  $i(t)$  é o sinal de interferência e  $c$ , a distância entre o dispositivo que transmite o sinal interferidor e o dispositivo que realiza a recepção. A parcela do sinal na saída do correlator, devido à interferência, para  $k$ -ésima palavra será, portanto,

$$i_k = c^{-\alpha/2} \int_0^{T_{ofdm}} i(t) e^{j2\pi k \frac{t}{T_{ofdm}}} dt. \quad (3.42)$$

#### 3.4.1.1 Interferidor OFDM

Se a interferência for do tipo OFDM, isto é, se  $i(t)$  for do tipo OFDM,

$$i(t) = \sum_{m=0}^{N_{sc}-1} I_m e^{-j2\pi m \frac{t}{T_{ofdm}}}. \quad (3.43)$$

então, substituindo-se a Equação 3.43 na Equação 3.42, chega-se a:

$$i_k = I_m c^{-\alpha/2}. \quad (3.44)$$

em que  $I_m$  representa o símbolo transmitido pelo interferidor OFDM na  $m$ -ésima subportadora.

Portanto, a potência é devida a interferência na saída do correlator OFDM,  $I_k$ , depende nesse caso da potência do símbolo transmitido pelo interferidor e das perdas de potência sofrida por este sinal no percurso entre interferidor e receptor:

$$I_k = var(i_k) = |I_m|^2 c^{-\alpha}. \quad (3.45)$$

### 3.4.1.2 Interferidor CDMA

Considerando o caso em que um usuário OFDM compartilha recursos de canal com um usuário da rede CDMA, então no momento da recepção  $i(t)$  tem forma(ver Equação 3.16):

$$i(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m c^{-\alpha/2} \sum_{i=0}^{G-1} a_n \psi(t - iT_c - mT_{cdma}). \quad (3.46)$$

Portanto, na saída do correlator, para a  $k$ -ésima portadora, tem-se:

$$i_k = \frac{c^{-\alpha/2}}{T_{ofdm}} \int_0^{T_{ofdm}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m \sum_{n=0}^{G-1} a_n \psi(t - nT_c - mT_{cdma}) e^{j2\pi kt/T_1} dt. \quad (3.47)$$

Considerando-se que um símbolo OFDM tem duração de  $T_{ofdm}$  e um símbolo CDMA tem duração de  $T_{cdma}$ , tal que  $T_{cdma}/T_{ofdm} = L > 1$ , pode-se expandir a Equação (3.47):

$$\begin{aligned} i_k &= \frac{c^{-\alpha/2}}{T_{ofdm}} \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{G-1} C_m a_n \int_{mT_{cdma}+nT_c}^{mT_{cdma}+(n+1)T_c} \psi(t - nT_c - mT_{cdma}) e^{j2\pi kt/T_{ofdm}} dt \\ &= \frac{c^{-\alpha/2}}{T_{ofdm}} \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{G-1} C_m a_n \Psi(k/T_{ofdm}) e^{j2\pi(nT_c+mT_s)k/T_{ofdm}}. \end{aligned} \quad (3.48)$$

em que  $\Psi(f)$  é a transformada de Fourier de  $\psi(t)$ .

É possível, ainda, com uma mudança apropriada de variáveis no somatório, sintetizar a equação acima em:

$$i_k = \frac{\Psi(k/T_{ofdm}) c^{-\alpha/2}}{T_{ofdm}} \sum_{r=0}^{GL-1} z_r e^{j2\pi kr/GL}, \quad (3.49)$$

em que  $z_r$  é o  $r$ -ésimo elemento da sequência produzida pelas multiplicações dos elementos  $C_m$  e  $a_n$

Assim a potência do sinal de interferência na saída do correlator será:

$$\begin{aligned}
I_k &= \text{var}(i_k) = \frac{A^2 c^{-\alpha} |\Psi(k/T_{ofdm})|^2}{T_{ofdm}^2} \text{var} \left[ \sum_{r=0}^{GL-1} z_n e^{j2\pi kr/GL} \right] \\
&\leq \frac{A^2 c^{-\alpha} |\Psi(k/T_{ofdm})|^2}{T_{ofdm} T_C GL} GL = \\
&= \frac{A^2 c^{-\alpha} |\Psi(k/T_{ofdm})|^2}{T_{ofdm} T_C}.
\end{aligned} \tag{3.50}$$

O que leva, utilizando-se o resultado da Equação (3.29), à seguinte dedução, a respeito da potência da interferência do sinal CDMA na  $k$ -ésima subportadora:

$$I_k \leq \frac{A^2 |S_h(k/T_{ofdm})|}{T_{ofdm}} = A^2 S_h(k/T_{ofdm}). \tag{3.51}$$

O fator  $|S_h(k/T_{ofdm})|/T_{ofdm}$  é uma aproximação da integral obtida pela fórmula dos trapézios da densidade espectral de potência do sinal CDMA espalhado ao longo da banda da subportadora OFDM.

### 3.4.2 Interferência na Recepção do Sinal CDMA

De forma análoga ao exemplo anterior na entrada do receptor CDMA, o sinal na presença de interferência e de um ruído AWGN será, a partir da extensão da Equação 3.30, dado por:

$$y(t) = v(t)d^{-\alpha/2} + i(t)c^{-\alpha/2} + n, \tag{3.52}$$

E a componente do ruído na saída do correlator e na entrada do tomador de decisão a partir da eq. 3.32 será

$$i = \frac{1}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} i(t)h(t)dt. \tag{3.53}$$

#### 3.4.2.1 Interferidor OFDM

Se o sinal de interferência na entrada do receptor for do tipo OFDM (ver Equação 3.43), no qual as  $N_{sc}$  subportadoras estão ocupando a banda do sinal CDMA, então, usando-se o resultado da Equação 3.13 em 3.53, a parcela da interferência da  $m$ -ésima subportadora na saída do receptor CDMA será:

$$i_k = \frac{c^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} I_k e^{\left(-j2\pi k \frac{t}{T_{ofdm}}\right)} h(t) dt. \tag{3.54}$$

Expandindo  $h(t)$  na equação anterior:

$$i_k = \frac{c^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} \left[ I_k e^{-j2\pi k \frac{t}{T_{ofdm}}} \right] \left[ \sum_{r=0}^{G-1} a_r \psi(t - rT_c) \right] dt. \quad (3.55)$$

Mas, como  $\psi(t - rT_c)$  é limitado no intervalo  $[rT_c, (r+1)T_c)$ , então mudando-se a ordem do somatório e da integral na equação anterior, chega-se a

$$\begin{aligned} i_k &= \frac{c^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \sum_{r=0}^{G-1} I_k a_r \int_{rT_c}^{(r+1)T_c} [\psi(t - rT_c)] e^{-j2\pi k \frac{t}{T_{ofdm}}} dt \\ &= \frac{c^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \sum_{r=0}^{G-1} I_k a_r \Psi\left(\frac{k}{T_{ofdm}}\right). \end{aligned} \quad (3.56)$$

Assim, a potência média do interferidor OFDM na saída do receptor CDMA é dada por:

$$I_k = var(i) = \frac{c^{-\alpha} |I_k|^2 |\Psi(\frac{k}{T_{ofdm}})|^2}{T_{cdma}^2} G = \frac{|I_k|^2 |S(\frac{k}{T_{ofdm}})|}{T_c G}. \quad (3.57)$$

### 3.4.2.2 Interferidor CDMA

Para uma interferência do tipo CDMA, a parcela de interferência na saída do receptor será:

$$\begin{aligned} i &= \frac{c^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \int_0^{T_{cdma}} \sum_{r=0}^{G-1} I_m b_r \psi(t - rT_c) h(t) dt \\ &= \frac{\sum_{r=0}^{G-1} I_m b_r}{T_{cdma}} \int_{rT_c}^{(r+1)T_c} \psi(t - rT_c) \left[ \sum_{n=0}^{G-1} a_n \psi(t - nT_c) \right] dt, \end{aligned} \quad (3.58)$$

em que  $b_r$  representa o  $r$ -ésimo *chip* da sequência de espalhamento CDMA utilizada para espalhar o espectro do sinal interferidor. Mas, sabendo-se que  $\psi(t - nT_c)$  é limitado no tempo, o integrando acima é diferente de 0 apenas quando  $r = n$ , portanto,

$$i = \frac{c^{-\alpha/2}}{T_{cdma}} \sum_{r=0}^{G-1} I_m a_r b_r \int_{rT_c}^{(r+1)T_c} \psi^2(t - rT_c) dt. \quad (3.59)$$

Uma das principais propriedades dos códigos de espalhamento do CDMA é que o gerador pseudo-aleatório das sequências de espalhamento é feito de tal forma que o produto elemento a elemento entre duas sequências distintas resulta em uma terceira sequência que conserva as propriedades das outras duas [27]. A partir desse resultado e da Equação 3.15, tem-se:

$$i = \frac{c^{-\alpha/2} I_m}{G} \sum_{r=0}^{G-1} z_r. \quad (3.60)$$

, em que  $z_r$ , nesse caso, será o  $r$ -ésimo elemento gerado a partir da multiplicação das sequências  $a_r$  e  $b_r$ .

Portanto, a potência média da interferência na saída do receptor para esse caso será

$$I = \text{var}(i) = \frac{c^{-\alpha} |I_m|^2}{G}. \quad (3.61)$$

### 3.5 ADAPTAÇÃO DO MODELO D2D

A partir das análises realizadas na Seção 3.4 pode-se estender o modelo D2D para diferentes casos em que a camada secundária busca acessar a rede utilizando diferentes esquemas de acesso.

Para a camada primária utiliza-se o OFDM, devido ao fato de ser uma técnica amplamente aceita e utilizada pelas comunicações sem fio modernas.

A vantagem buscada em se tentar diferentes técnicas de acesso para a camada secundária é descobrir aquela que melhor se adapta ao modelo adotado para a maximização da probabilidade de existência do enlace,  $Pr[LE]$ . Ainda que uma técnica não se sobressaia sobre a outra de maneira evidente, é possível buscar, de acordo com as condições do cenário, escolher aquela que é capaz de usufruir melhor dos recursos da rede. Como os dois métodos de acesso se comportam diferentemente no que tange à interferência, sob certas condições de cenário, pode ser que a escolha de um ou outro apresente ganho.

Como mostra a Seção 3.4, a tecnologia CDMA, além de ser mais robusta em relação a interferências do tipo banda estreita (que é o caso das subportadoras OFDM), também acaba injetando menor potência nos usuários primários, uma vez que a energia do seu sinal é espalhada em um espectro de banda larga. Por outro lado, como ocupa uma faixa larga de frequências, o sinal CDMA sofre interferência de diversas subportadoras ao mesmo tempo e pode ser afetado não por um usuário primário em específico mas pela soma das contribuições de interferência de diversos usuários primários que coexistem na mesma banda.

De forma oposta, o OFDM não oferece os ganhos em interferência promovidos pelo espalhamento espectral, mas, por ocupar uma faixa estreita de frequências, sofre a interferência apenas do usuário com os quais compartilham recursos. Mas, apesar disso, não há cancelamento ou mitigação da interferência que esse sinal produz na comunicação primária.

Essa análise preliminar, entretanto, não é suficiente para fazer inferências sobre a influência do tipo de acesso no comportamento da  $Pr[LE]$ . É preciso estender o equacionamento da  $Pr[LE]$  e analisar os cenários separadamente e a partir de simulações estabelecer os casos em que se é vantajoso poder acessar o meio por tecnologias diferentes.

Nesta seção, busca-se estender o modelo considerado no Capítulo 2, considerando-se que a

tecnologia da camada primária utiliza sinais do tipo OFDM, e que as distâncias entre transmissor e receptor são descritas de acordo com o cenário apresentado na Figura 2.1. De acordo com as equações 2.4, 3.2 e 3.10, a razão sinal-ruído para a  $n$ -ésima subportadora no receptor da BS deve satisfazer, respeitando a margem  $\kappa$  de projeto do modelo adotado:

$$\frac{|s_{mu,n}|^2 2T_{ofdm} C_{uc_k,bs}^{-\alpha}}{N_0} \geq (\kappa + 1)\beta_{mu}. \quad (3.62)$$

Portanto, a potência dos símbolos  $P_{mu}$  deve satisfazer, minimamente,

$$|s_{mu,n}|^2 \geq \frac{\beta_{mu} N_0 C_{uc_k,bs}^{\alpha} (\kappa + 1)}{2T_{ofdm}}. \quad (3.63)$$

### 3.5.1 Camada Secundária utilizando OFDM

Assumindo-se que o usuário primário escolha transmitir na potência mínima possível, como é de seu interesse, então na presença de um interferidor OFDM, utilizando-se os resultados das equações 3.2, 3.10 e 3.44, a SINR deve satisfazer:

$$\frac{|s_{mu,n}|^2 C_{uc_k,bs}^{-\alpha}}{\frac{N_0}{2T_{ofdm}} + |s_{dd,n}|^2 D_{dd,bs}^{-\alpha}} \geq \beta_{mu} \quad (3.64)$$

$$\therefore |s_{dd,n}|^2 \leq \kappa \frac{N_0}{2T_{ofdm}} D_{dd,bs}^{\alpha}. \quad (3.65)$$

Sabe-se, portanto, que o usuário secundário pode aumentar sua potência até que atinja o limite estabelecido pela inequação anterior ou que consiga estabelecer o enlace D2D. O estabelecimento desse enlace só ocorre quando a razão sinal-ruído desse enlace satisfaz:

$$\frac{P_{dd} D_{dd,dd}^{-\alpha}}{\frac{N_0}{2T_{ofdm}} + P_{mu} C_{uc_k,dd}^{-\alpha}} \geq \beta_{dd}. \quad (3.66)$$

Logo, na condição crítica em que a potência é a máxima possível:

$$d_{crit,k} = D_{dd,bs} \left\{ \frac{\kappa}{\beta_{dd} \left( 1 + \beta_{mu} \left( \frac{C_{uc_k,bs}}{C_{uc_k,dd}} \right)^{\alpha} (1 + \kappa) \right)} \right\}^{1/\alpha}. \quad (3.67)$$

Essa equação repete o resultado da Equação 2.11 e evidencia que, ao se utilizar o OFDM nas camadas primária e secundária, os resultados obtidos no Cap. 2 são mantidos.

### 3.5.2 Camada Secundária utilizando CDMA

Caso o sinal enviado pelo secundário seja do tipo CDMA, então, por ser esse um sinal de banda larga, cada símbolo transmitido interferirá em todas as subportadoras do sinal primário, de acordo com a fórmula obtida na Equação 3.57. Assim, para a  $n$ -ésima subportadora:

$$\frac{|s_{n,mu}|^2 C_{ucn,bs}^{-\alpha}}{\frac{N_0}{2T_{ofdm}} + \frac{|s_{dd}|^2 |S(n/T_{ofdm})| D_{dd,bs}^{-\alpha}}{T_{ofdm}}} \geq \beta_{mu}. \quad (3.68)$$

Além disso, na BS, todas as subportadoras devem satisfazer a condição acima e também à Equação 3.63. Usando-se ambos os resultados, chega-se a:

$$|s_{dd}|^2 \leq \frac{N_0 \kappa D_{dd,bs}^\alpha}{2 |S_h(n/T_{ofdm})|}. \quad (3.69)$$

Uma vez que  $|s_{dd}|^2$  deve satisfazer a equação acima para todas as  $n$  subportadoras ao mesmo tempo, o seu valor máximo está limitado pela subportadora que maximiza  $S_h(n/T_{ofdm})$ . Na situação crítica em que o usuário D2D transmite com potência máxima, tem-se por fim:

$$|s_{dd}|^2 = \frac{N_0 \kappa D_{dd,bs}^\alpha}{2 \max_n (|S_h(n/T_{ofdm})|)}. \quad (3.70)$$

Essa potência crítica deve ser suficiente para estabelecer o enlace D2D com, pelo menos, a SNR mínima requerida. Mas este sinal de banda larga sofre na sua recepção, ao mesmo tempo, interferência de todas as subportadoras da camada primária:

$$\frac{|s_{dd}|^2 D_{dd,dd}^{-\alpha}}{\frac{N_0}{2T_{cdma}} + \frac{\sum_{n=0}^{N_{sc}-1} |s_{mu,n}|^2 C_{ucn,dd}^{-\alpha} |S_h(n/T_{ofdm})|}{T_{ofdm}}} \geq \beta_{dd}. \quad (3.71)$$

Substituindo nessa equação os valores de  $|s_{dd}|^2$  e  $|s_{mu,n}|^2$  encontrados nas equações 3.70 e 3.63, chega-se ao valor de  $d_{crit}$  como feito no Capítulo 2:

$$d_{crit} = D_{dd,bs} \left\{ \frac{\kappa T_{cdma}}{\beta_{dd} \max_n (|S_h(n/T_{ofdm})|) \left[ 1 + \beta_{mu} (1 + \kappa) \sum_{n=0}^{N_{sc}-1} \left( \frac{C_{ucn,bs}}{C_{ucn,dd}} \right)^\alpha |S_h(n/T_{ofdm})| \right]} \right\}^{1/\alpha}. \quad (3.72)$$

## 3.6 SIMULAÇÕES

O equacionamento puro dos dois modelos não permite em um primeiro momento entender sob quais circunstâncias um método leva vantagem sobre o outro. Como visto no Cap. 2, ex-

istem diversos fatores que influenciam na probabilidade de existência do enlace e os parâmetros de projeto podem ser alterados, de acordo com a conveniência da rede, para aumentar essa probabilidade. Contudo, aumentar a probabilidade de existência do enlace exige uma solução de compromisso que cobra um custo em termos de taxa ou de potência gasta pelos terminais.

Para o caso em que as duas camadas de comunicação utilizam o mesmo método de acesso (OFDM), as equações obtidas anteriormente são mantidas, o que preserva as relações entre seus parâmetros. Mas para o segundo caso que se deseja estudar, isto é, com a camada secundária utilizando um enlace com a técnica CDMA, a fórmula para a distância crítica é alterada e, além disso, novos parâmetros são adicionados ao problema (forma de onda, taxa de *chips* por segundo e taxa de transmissão de símbolos por segundo, tempo de símbolo, e outros).

Outro aspecto a ser ressaltado é que o sistema CDMA se utiliza de uma banda larga do espectro para realizar sua transmissão atuando portanto em sobreposição de recursos com várias subportadoras OFDM do sistema primário. Isso significa que, para a justa comparação, tem-se que considerar os dois modelos de acesso à camada secundária em um cenário que possui  $N_{sc}$  subportadoras no primário, onde tais portadoras possam usufruir de toda a banda usada pelo sinal CDMA.

Em outras palavras, ao colocar os modelos lado a lado, o modelo CDMA buscará obter vantagem por espalhar o espectro e mitigar a interferência; o modelo OFDM tentará extrair vantagem dos múltiplos canais disponíveis para acesso.

As primeiras simulações foram feitas com os parâmetros da Tabela 3.1. O sistema OFDM projetado para o primário adota símbolos com duração de 0,1 ms o que corresponde a uma banda mínima de 10 kHz para cada subportadora. O número total de subportadoras contidas em um quadro de transmissão do primário é 450, o que leva a uma banda útil de 4,5 MHz. Os 500 kHz restantes são colocados para a utilização da banda de guarda.

As subportadoras são subdivididas, sem perda de generalidade, em grupos contíguos de portadoras chamados de blocos de recurso. Cada usuário, para realizar sua comunicação, deve receber pelo menos um bloco de recurso, por outro cada bloco de recurso não pode ser compartilhado por mais de um usuário na camada primária.

A adoção do bloco de recursos deve-se ao fato de que cada subportadora carrega uma palavra por símbolo OFDM, portanto, a taxa máxima que cada subportadora consegue transmitir é de 10 mil símbolos por segundo. Essa taxa é considerada baixa para os sistemas modernos de comunicação, portanto, para garantir um sistema de qualidade, visa-se garantir que cada usuário receba mais do que uma subportadora por vez, para que, mesmo com a fração mínima de recursos disponível na rede consiga realizar transmissões sem fio dentro de taxas razoáveis. Além disso, as subportadoras dentro dos blocos são contíguas para facilitar o gerenciamento dos recursos e minimizar a sinalização: como as subportadoras de cada bloco de recurso são predeterminadas, é preciso menos informação para atribuir ao usuário um bloco de recurso do que informar cada

Tabela 3.1: Parâmetros de simulação - Cenário 1

Parâmetro	Valor
$R$	2 km
$\kappa$	1
$\beta_{mu}$	10 dB
$\beta_{dd}$	7 dB
$\alpha$ (coeficiente de propagação)	3,5
$T_{ofdm}$	0,1ms
$R_{cps}$	2,3Mcps
$T_c$	$1/R_{cps}$
$T_{cdma}$	$T_c G$
$GL$	230
$S_h(f)$	$T_c sinc^2(fT_c)$
Subportadoras OFDM	450
Blocos de Recursos	25

subportadora que ele pode acessar em determinado instante de tempo.

Os blocos de recursos adotados no modelo simulado têm 18 subportadoras cada, totalizando um total de 25 blocos de recursos. Em um primeiro momento a simulação atribuirá cada bloco de recurso a um usuário primário distinto, posicionado aleatoriamente dentro da célula. É nesse cenário que cada usuário secundário desejará realizar sua transmissão.

As primeiras simulações são feitas com cada um dos usuários primários adotando modulação QPSK com 2 bits por símbolo, e tanto a razão sinal-ruído mínima como a margem de ruído adotada seguem o padrão adotado a partir do Cap. 2. Enquanto a modulação QPSK permite a transmissão com 2 bits por símbolo, a transmissão por CDMA adotada utiliza a modulação BPSK, com apenas 1 bit transmitido por símbolo.

O acesso à camada secundária pode se dar por dois tipos de transmissão. No primeiro tipo, a transmissão será OFDM, com os mesmos parâmetros para a camada primária, exceto para a razão sinal-ruído, que seguirá os valores de  $\beta_{dd}$  enunciados no Cap. 2. No segundo modelo de transmissão, na camada secundária, a tecnologia de acesso é CDMA.

Para esse segundo modelo, adotou-se, em primeira análise, o *chip* CDMA sendo retangular ideal, isto é,

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 \leq t \leq T_c ; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.73)$$

Assim, a densidade espectral de potência de  $h(t)$  é dada por:

$$S_h(f) = T_c \text{sinc}^2(fT_c), \quad (3.74)$$

com a função  $\text{sinc}(x) = \frac{\text{sen}(\pi x)}{\pi x}$ .

Como este pulso retangular ideal terá o lóbulo principal do seu espectro ocupando uma banda de  $2/T_c$  Hz, o tempo de *chip* deve ser calculado para permitir que a transmissão se dê dentro da banda de 5 MHz. O motivo dessa suposição é que se deseja fazer o estudo para usuários que compartilham em uma dada célula recursos que sejam previamente alocados para as redes sem fio. Ademais, a radiação extra-banda pode prejudicar a comunicação nos canais vizinhos promovidos pela própria prestadora do serviço que detém esta banda, por uma concorrente ou até mesmo um outro tipo de serviço que se utiliza do espectro.

Assim, devido ao decaimento lento do espectro do sinal CDMA (função *sinc*), limitou-se a banda de transmissão a 4,6 MHz ou à taxa de transmissão de *chips* por segundo ( $R_{cps}$ ) a 2,3 Mcps. O ganho de processamento associado a essa transmissão rege a taxa de símbolos por segundo  $R_b$ .

Com a forma de onda adotada, a equação para a distância crítica pode ser reescrita substituindo-se  $|S_h(k/T1)|$  de acordo com a equação 3.74:

$$d_{crit} = D_{dd,bs} \left\{ \frac{\kappa G}{\beta_{dd} \left[ 1 + \beta_{mu} GL(1 + \kappa) \sum_{n=0}^{N_{sc}-1} \left( \frac{C_{ucn,bs}}{C_{ucn,dd}} \right)^\alpha \text{sinc}^2(n/T_{ofdm}) \right]} \right\}^{1/\alpha}. \quad (3.75)$$

Os resultados obtidos por essa simulação são mostrados no gráfico presente na Figura 3.4. Nesse gráfico, é possível ver que a escolha do ganho de processamento influi fortemente na probabilidade de existência do enlace: as curvas para diferentes valores de G encontram-se bem espaçadas. De fato, além do valor de G ser dobrado de uma curva para a outra a sensibilidade, da distância crítica em relação ao fator G, dada por,

$$\rho_G(d_{crit}) = \frac{d_{crit}}{\alpha G}, \quad (3.76)$$

é elevada se comparada com àquelas estudadas no Cap. 2. Neste caso,  $\rho_G(d_{crit})$  tem formulação semelhante a  $\rho_{\beta_{dd}}(d_{crit})$ , apresentada pela Equação 2.15. Pelo denominador da Equação 3.76, espera-se que quanto maior o valor de G menor a sensibilidade de  $d_{crit}$  a variações nesse parâmetro. Contudo, pelas características dos códigos CDMA, o valor de G deve ser uma potência 2, portanto acréscimos em G representam multiplicação por potências de 2, enquanto decréscimos indicam divisão por potências de 2.

Assim, como variações positivas no valor de G são da ordem de pelo menos 2G, observa-se, na Figura 3.4, que a  $\text{Pr}[LE]$  passa a apresentar ganhos cada vez maiores a medida que se aumenta o valor do ganho de processamento.

Apesar desse ganho de  $\Pr[LE]$  em função de  $G$ , a curva de probabilidade de existência do enlace para o modelo OFDM prevaleceu sobre as curvas CDMA em praticamente todos os casos. A exceção é quando  $G = 128$  ou para  $G = 64$  com distâncias maiores que 1100 m.

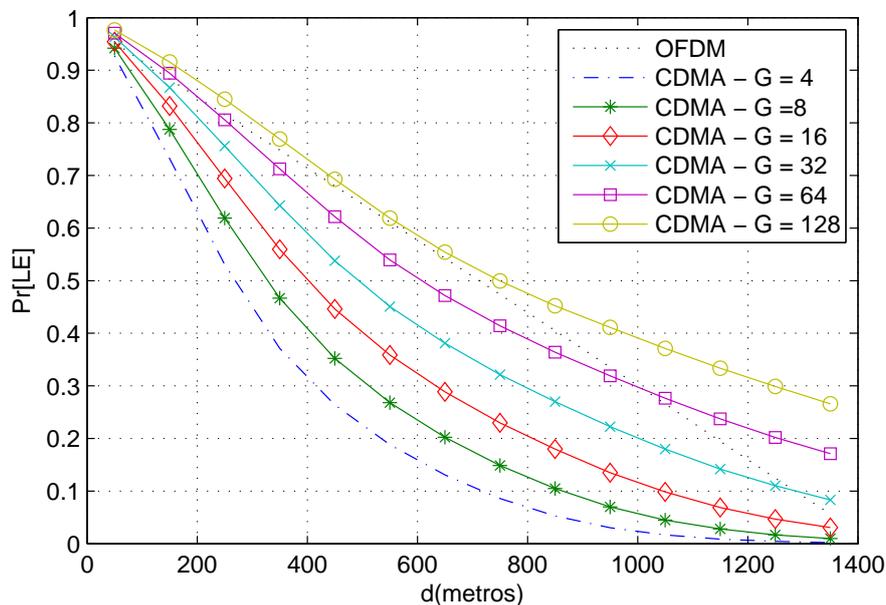


Figura 3.4: Resultados de simulação para o cenário 1, para vários valores de  $G$

Embora esse ganho passe a ser maior no gráfico à medida que se aumenta a distância, vale ressaltar que a adoção do CDMA nas duas situações em que esse tipo de serviço prevalece nem sempre será útil. Isso porque a taxa de transmissão obtida com um ganho de processamento tão elevado é próxima a 36 kbps para  $G = 64$  e 18 kbps para  $G = 128$ , uma taxa baixa para diversos tipos de serviços.

Por outro lado, para distâncias pequenas, há situações em que o CDMA diminui a  $\Pr[LE]$  de uma forma geral. Porém o enlace ainda é atendido em alguns casos e, nestas situações especificamente, pode ser vantajoso adotar o enlace CDMA, pois para  $G$  pequeno é possível obter taxas elevadas. No caso particular em que  $G = 4$ , a taxa obtida é de 575 kbps que é superior ante os 360 kbps fornecidos pelo modelo OFDM (taxa líquida). Para um enlace de até 200 m, em particular, é possível ter esse ganho de taxa em 60% dos casos.

Apesar de apresentar ganhos em alguns pontos específicos da curva, o desempenho do sistema CDMA foi inferior ao do sistema OFDM para a maioria dos casos. Isso se deve ao fato de que, apesar de atenuar a interferência de cada subportadora no enlace D2D por um fator  $S(n/T_{ofdm})/T_{ofdm}$ , o sistema CDMA sofre a influência de todas as subportadoras somadas. Isto é, se a contribuição de cada parcela de interferência somada for suficiente para degradar o sinal, o enlace não é atendido. O sistema OFDM, por sua vez, necessita que apenas um bloco de recurso esteja em boas condições de atendimento para que o enlace seja satisfeito.

Uma forma de melhorar o desempenho do sistema CDMA é buscar uma forma de onda que minimize  $\sum_{n=0}^{N_{sc}-1} \left(\frac{C}{c}\right)^\alpha \text{sinc}^2(n/T_{ofdm})$  ou que maximize  $\max_n(S(n/T_{ofdm}))$ , para buscar reduzir o denominador da Equação 3.72 e promover ganhos na distância crítica (aumentando a  $Pr[LE]$ ).

Duas outras formas de onda são propostas para buscar aumentar o desempenho do sistema CDMA. A primeira forma de onda é senoidal e é dada pelo pulso que segue

$$\psi(t) = \begin{cases} \sqrt{2}\text{sen}(\pi t/T_c), & \text{se } t \leq T_c; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.77)$$

Esse pulso produz uma densidade espectral de potência de  $h(t)$  regida por:

$$S_h(f) = \frac{8}{\pi^2} T_c \left( \frac{\cos(\pi f T_c)}{(1 - 4f^2 T_c^2)} \right)^2. \quad (3.78)$$

Já o filtro cosseno levantado trata-se de um sinal não limitado no intervalo  $[0, T_c]$ , contudo, tendo a precaução de se obter um fator de *roll-off*,  $r$ , próximo a 1, é possível aproximar este filtro para o caso desejado (uma vez que o nível de sinal radiado fora desse período torna-se baixíssimo). Esse tipo de filtro produz uma densidade espectral de potência dada por:

$$S_h(f) = \begin{cases} T_c, & \text{se } |f| \leq \frac{1-r}{2T_c}; \\ \frac{T_c}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi T_c}{r} \left[|f| - \frac{1-r}{2T_c}\right]\right) \right]^2, & \text{se } \frac{1-r}{2T_c} < |f| < \frac{1+r}{2T_c}; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.79)$$

As densidades espectrais de potência obtidas pelas formas de onda acima descritas,  $S_h(f)$ , são mostradas na Figura 3.5 onde é possível analisar como se comporta cada uma das curvas. Nesse gráfico, para a curva do cosseno levantado,  $r = 0.9$  e  $R_{cps} = 2.56$  Mcps. Estes fatores foram escolhidos, por apresentar maior decaimento, o filtro cosseno levantado radia menor energia na faixa de frequências extra banda o que permite explorar melhor a banda disponível. Com isso, conservando-se o fator de *roll-off* desejado é possível aumentar a taxa de transmissão do sistema.

Na Figura 3.5, é possível notar que as duas formas de onda simuladas na tentativa de aumentar a probabilidade de existência do enlace apresentam diferentes características dentre aquelas desejadas. Enquanto a forma de onda senoidal diminui o valor máximo de  $S(f)$  (em um fator  $8/\pi^2$ , de acordo com a Equação 3.78) e, por consequência, aumenta a potência máxima de transmissão possível para o enlace D2D (ver a eq. 3.69), a mesma forma de onda apresenta um decaimento bem lento (baixa mitigação da interferência nas bordas do sinal CDMA). Já o filtro do cosseno levantado apresenta decaimento rápido, o que leva a uma maior atenuação da interferência ao longo da banda de transmissão.

Para uma justa comparação os modelos CDMA foram todos considerados para  $G = 8$ , que

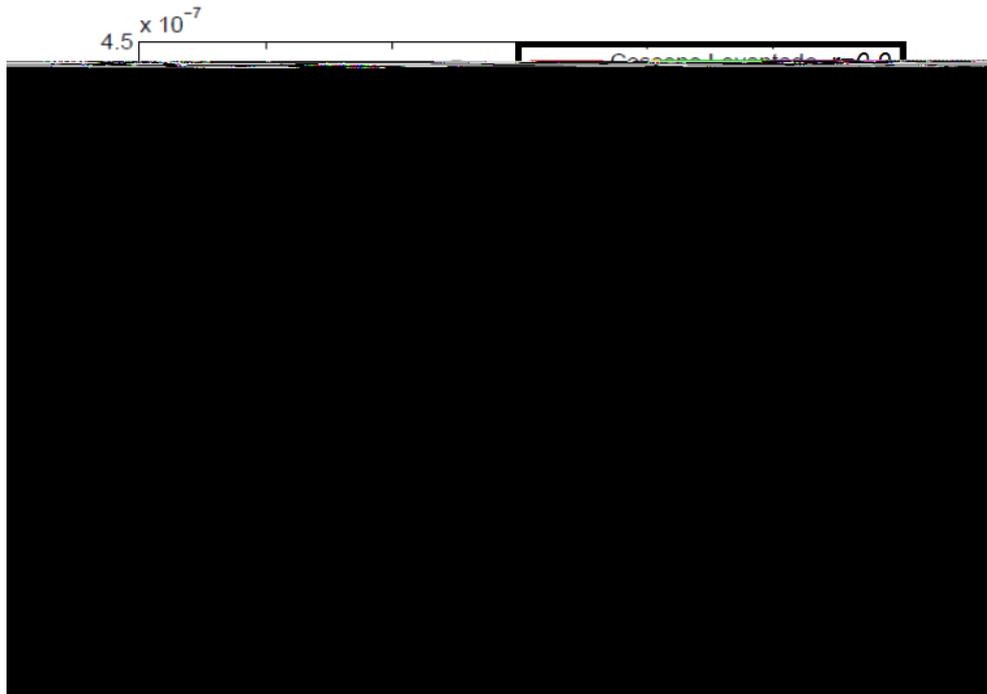


Figura 3.5: Densidade Espectral de Potência para diferentes formatos de pulso

leva à taxa de transmissão bruta de 287,5 kbps para a forma de onda senoidal e retangular; e 320 kbps para a forma de onda do cosseno levantado ( $r = 0,9$ ). Esta escolha foi feita pois essas grandezas são as que mais se aproximam do sistema OFDM atuando com transmissão QPSK (360 kbps).

A Figura 3.6 mostra como a escolha da forma de onda atua sobre a probabilidade de existência do enlace. Neste gráfico, nota-se que a forte atenuação da forma de onda do cosseno levantado leva esse sistema a maior robustez em relação a interferência, que se traduz em um leve aumento na probabilidade de existência do enlace.

Já a função porta do tipo senoidal teve desempenho semelhante ao da função retangular. Isso porque, apesar de permitir uma maior potência de transmissão do usuário D2D, seu decaimento sensivelmente mais lento confere baixo poder de atenuação ao sinal CDMA, e a interferência tem efeito mais degradante neste caso.

O formato da função porta que se sobressaiu sobre as demais é do tipo cosseno levantado, com alto fator de *roll-off*. Esse fato justifica sua adoção na maioria das comparações realizadas doravante.

À primeira vista, a transmissão em CDMA não traz grandes ganhos em relação a  $Pr[LE]$ , uma vez que a melhor curva obtida para taxas parecidas tem desempenho apenas próximo ao modelo OFDM (que possui taxa de transmissão ligeiramente maior). Contudo, é possível que a

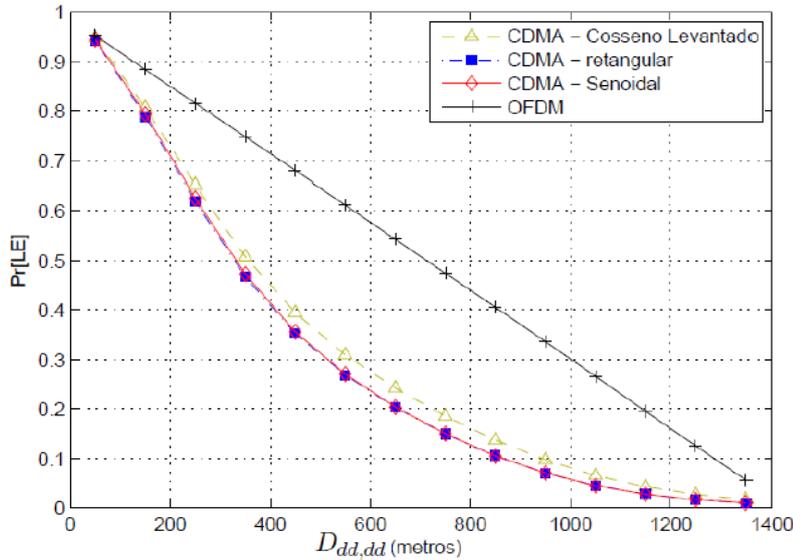


Figura 3.6: Desempenho do sistema para diferentes formatos de pulso.

BS coordene a distribuição dos recursos para os usuários de forma a melhorar o desempenho da camada secundária.

Na Figura 3.5, é possível notar que todas os pulsos adotados apresentam um decaimento considerável na densidade espectral de potência nas proximidades das bordas da banda do sinal CDMA. Sabe-se que, além disso, a parcela de interferência de determinada subportadora do primário sobre o secundário depende da densidade espectral de potência do sinal CDMA na frequência dessa subportadora, como mostra a Equação 3.57.

Assim, se o sistema agir de forma coordenada, antes que o enlace D2D seja estabelecido, o receptor da camada secundária pode informar a BS, por meio de um canal de sinalização, em quais faixas de frequência a potência medida no sensoriamento do espectro é maior. A BS pode então realocar os usuários primários que ocupam essas faixas de frequência (maiores responsáveis pela interferência) em faixas mais próximas a borda do espectro CDMA. No modelo apresentado, não há prejuízo para o primário em se adotar essa estratégia.

A grande vantagem desse procedimento é garantir que a maior atenuação ficará justamente para os usuários que causam maior interferência (minimizando o produto  $|S_h(n/T_{ofdm})|(\frac{C_{ucn,bs}}{C_{ucn,bs}})^{1/\alpha}$ ), melhorando a SINR do sistema CDMA. Quando essa estratégia não é adotada, se um usuário que utiliza recursos na faixa central do espectro joga muita interferência sobre o enlace D2D, essa degradação pode ser suficiente para que o enlace não se estabeleça. Contudo, se esse mesmo usuário for deslocado para uma faixa lateral, a interferência que ele causa no secundário que deseja utilizar um acesso do tipo CDMA diminui consideravelmente.

A Figura 3.7 evidencia um aumento considerável na  $Pr[LE]$  quando se adota essa estratégia

de alocação dos usuários antes de uma transmissão CDMA na camada secundária. Os resultados neste gráfico foram obtidos em um cenário com os parâmetros da Tabela 3.1, exceto pela forma de onda de  $\psi(t)$  que foi adotado como sendo uma função porta do tipo cosseno levantado ( $r = 0,9$ ), que possui forte atenuação nas bordas do espectro. O ganho do sistema é considerável e passa a ser superior ao sistema OFDM, mesmo para altas taxas de transmissão (para  $G = 4$  a taxa é de 640 kbps).

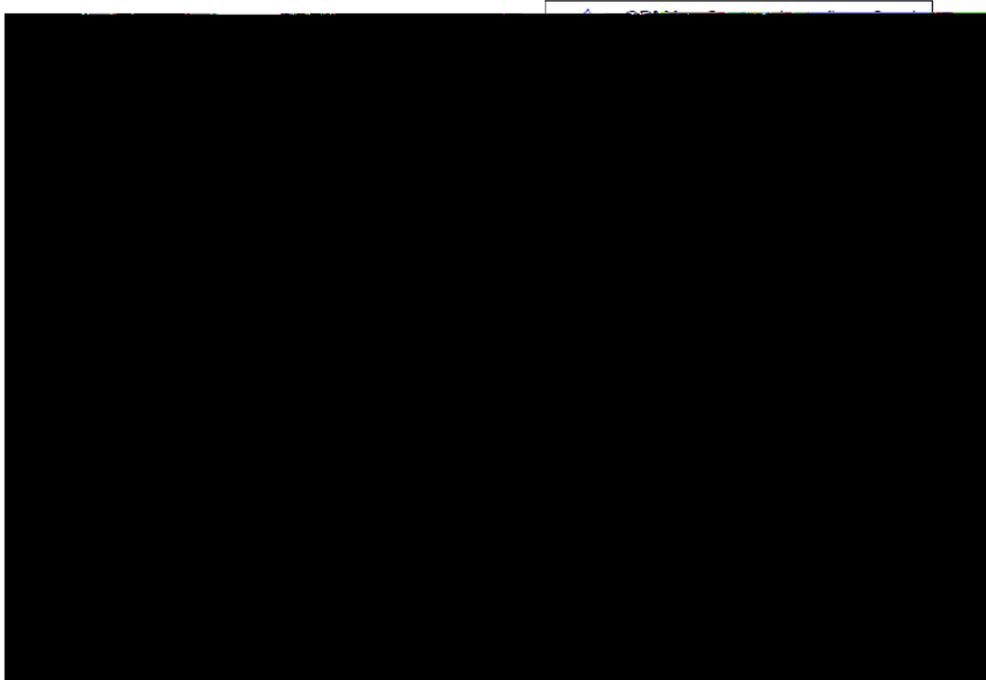


Figura 3.7: Comparação do desempenho do enlace D2D na camada secundária, com e sem realocação de usuários primários.

Há ainda, um ganho subjacente às curvas mostradas na Figura 3.7. Se o usuário D2D tiver um rádio que lhe permita, em determinado momento, operar tanto por meio de uma transmissão OFDM como por meio de uma transmissão CDMA, ele poderá optar por um ou por outro à medida que determinada tecnologia prevaleça sobre a outra.

As equações que regem os dois modelos não são iguais e, sob certas condições, é possível que a transmissão OFDM na camada secundária não seja possível, mas que a transmissão em CDMA seja e vice-versa.

Em alguns casos, há pelo menos um recurso com qualidade mínima disponível para o enlace secundário transmitir em uma tecnologia OFDM, mas para a transmissão CDMA não é possível realizar a transmissão pois mesmo que exista um bloco de recurso que injete pouca interferência no secundário e receba pouca interferência na direção deste, alguns dos outros 24 usuários que acessam os outros blocos de recursos podem estar produzindo um alto nível de interferência (ou limitando a potência de transmissão) na banda do sinal CDMA, que por ser maior sofre a

interferência de todos os usuários do sistema, o que pode degradar o sinal mais que o permitido. Quando uma situação assim ocorre, o enlace D2D só será estabelecido se o rádio for capaz de realizar uma comunicação OFDM.

Por outro lado, há casos em que nenhum dos blocos de recursos tem qualidade suficiente para transmissão OFDM. Contudo, se nenhum dos blocos de recursos estiver injetando uma potência muito elevada, a mitigação das parcelas de interferência pelo desespalhamento na recepção do sinal CDMA, pode garantir transmissão nesta forma de acesso.

A diferença entre estes dois cenários mostra que a possibilidade do rádio escolher entre uma ou outra forma de acesso pode aumentar a probabilidade de reaproveitamento do sistema. A Figura 3.8 mostra o ganho na probabilidade total e se estabelecer um enlace D2D quando se pode acessar a tecnologia por um método ou outro. Para a obtenção deste gráfico, utilizou-se,  $G = 8$  e uma função porta,  $\psi(t)$ , do tipo cosseno levantado, com os mesmos parâmetros de simulação utilizados para o caso anterior. Observa-se que a probabilidade total de existência do enlace é muito próxima àquela oferecida pelo acesso CDMA. Em poucos casos observou-se o caso em que o acesso CDMA era inviável, mas o acesso OFDM foi capaz de prover o enlace na camada secundária para pelo menos um bloco de recurso.

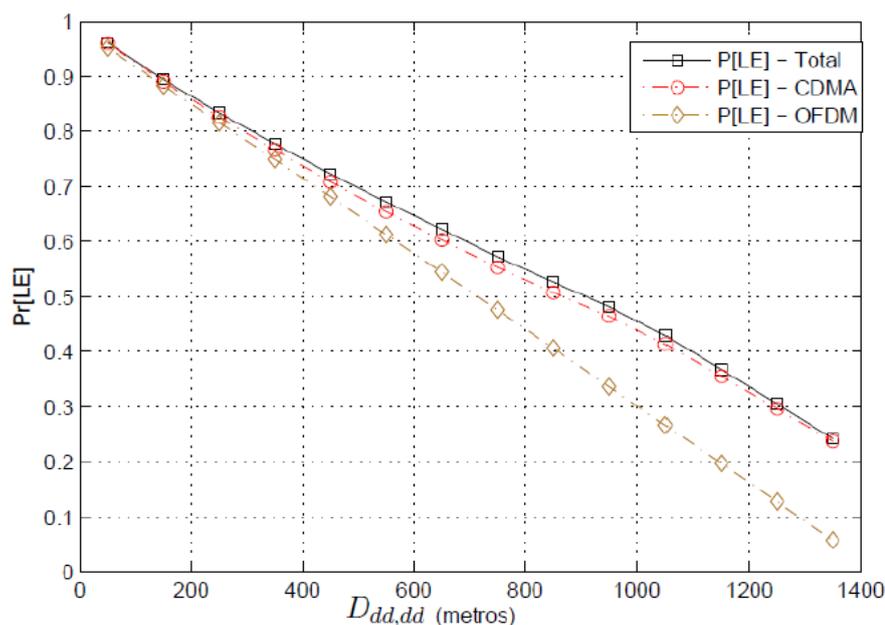


Figura 3.8:  $Pr[LE]$  para as diferentes formas de acesso.

Outra diferença entre as duas formas de acesso que pode ser explorada em um rádio híbrido é o comportamento da probabilidade de existência de enlace para os casos em que o transmissor D2D está mais próximo da BS (onde injeta interferência) do que do receptor D2D (onde deseja

que seu sinal chegue com qualidade).

Como as relações discutidas no Cap. 2 se mostraram preservadas para a transmissão secundária em OFDM, então, à luz da Equação 2.12, a distância crítica máxima para um secundário será:

$$\lim_{\left(\frac{C_{ucn,bs}}{C_{ucn,dd}}\right)^\alpha \rightarrow 0} d_{crit} = D_{dd,bs} \left(\frac{\kappa}{\beta_{dd}}\right)^{1/\alpha} \quad (3.80)$$

o que limita a distância máxima do enlace D2D. Para  $\kappa = 1$  e  $\beta_{dd} = 5$  dB, como mostra a Tabela 3.1, tem-se  $d_{crit} \approx 0,72D_{dd,bs}$ . Em outras palavras, a distância do enlace D2D poderá ser apenas da ordem de 70% a distância entre o transmissor D2D e a BS.

No caso CDMA a distância crítica será máxima quando a soma das interferências do primário no secundário for próxima de 0. Neste caso, se o filtro for do tipo cosseno levantado, a distância crítica máxima será dada por:

$$\lim_{\left(\sum_{n=0}^{N_{sc}-1} \frac{C_{ucn,bs}}{C_{ucn,dd}}\right)^\alpha |S_h(n/T_{ofdm})| \rightarrow 0} d_{crit} = D_{dd,bs} \left(\frac{\kappa G}{\beta_{dd}}\right)^{1/\alpha}, \quad (3.81)$$

que apresenta um ganho de  $G^{1/\alpha}$  em relação a distância crítica máxima para o secundário em OFDM. Desde que  $\kappa G$  seja maior que  $\beta_{dd}$ , a distância crítica poderá ser maior que  $D_{dd,bs}$ . Mesmo para um baixo ganho de processamento, por exemplo  $G = 4$ , a distância crítica sobe de  $0,72D_{dd,bs}$  para aproximadamente  $1,07D_{dd,bs}$ . Para taxas mais baixas, o ganho é ainda maior. O comportamento da  $Pr[LE]$  em função de  $D_{dd,dd}$  para  $D_{dd,bs}$  fixo comparando as duas formas de acesso está na Figura 3.9. Neste gráfico,  $D_{dd,bs}$  foi fixado em 400 m e a probabilidade de existência do enlace para um transmissor D2D posicionado a essa distância da BS em função da distância mostra como o ganho de processamento do sinal CDMA pode influir fortemente em  $Pr[LE]$ .

### 3.7 CONCLUSÕES

O sistema de camada secundária CDMA apresentada neste Capítulo traz em especial duas vantagens quando comparado ao modelo anterior. A primeira é o aumento na probabilidade de existência do enlace pela simples adaptação do ganho de processamento ( $G$ ). Sistemas CDMA costumam ser bastante flexíveis quanto ao tempo de símbolo, aumentando ou diminuindo o ganho de processamento do sistema. A Figura 3.4 mostra como é possível aumentar ou diminuir a  $Pr[LE]$  pela adaptação do ganho de processamento.

O ganho na  $Pr[LE]$  obtido neste caso é superior ao ganho obtido pela mudança na taxa de modulação apresentado no Capítulo 2. Além disso, mais do que permitir o ganho nesta probabilidade o sistema pode, em casos em que a qualidade do sinal secundário está acima de um certo

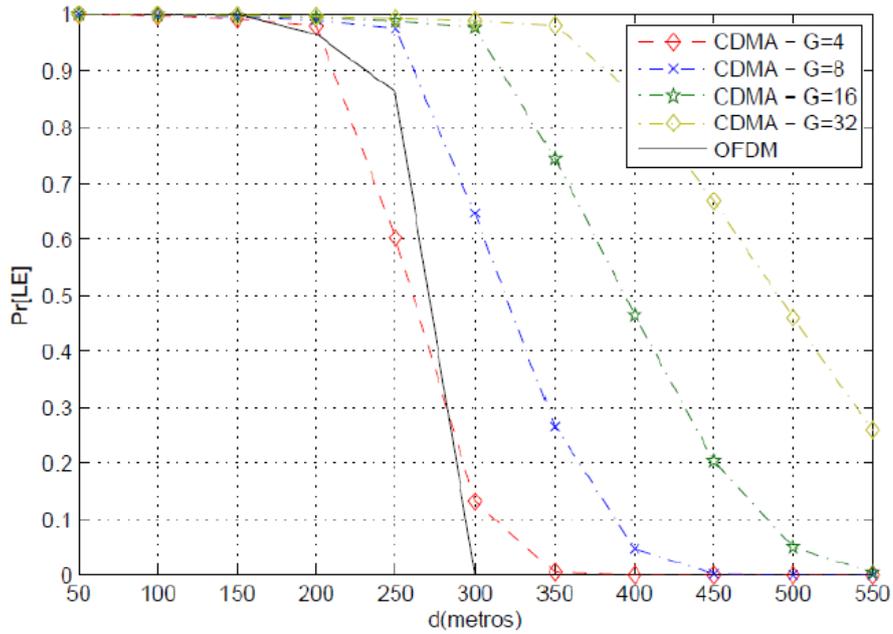


Figura 3.9:  $Pr[LE]$  para D fixo em 400 metros

nível diminuir o ganho de processamento e, com isso, aumentar a taxa do sistema. De forma resumida, pode-se afirmar que a relação taxa de transmissão por  $Pr[LE]$  é mais sensível a mudanças no ganho de processamento do sinal CDMA do que a mudanças na ordem de modulação do sistema OFDM.

Outra vantagem é que, para serviços que requeiram taxas mais baixas o acesso na camada secundária pela tecnologia CDMA permite em alguns casos, estabelecer um enlace D2D em que  $D_{dd,dd} > D_{dd,bs}$ . Este ganho será particularmente importante em situações na quais o transmissor D2D estiver próximo da BS.

Contudo, esses ganhos são obtidos de forma custosa ao sistema. O melhor desempenho desta tecnologia é obtido quando as subportadoras da camada secundária são posicionadas na frequência de acordo com a interferência que causam no enlace D2D: as subportadoras que pertencem aos usuários que causam maior interferência devem ser colocadas próximas as laterais da banda, enquanto a faixa central deve ser ocupada prioritariamente pelos usuários que causam menor interferência.

Este rearranjo das faixas designadas para cada usuário do primário exige maior sinalização, tanto para obter a informação do secundário de quais são os usuários que causam maior interferência quanto para informar aos primários quais as faixas que devem ocupar. Além disso, uma única comunicação D2D é realizada ocupando toda a banda da camada secundária (todas os  $M$  recursos disponíveis são ocupados por um único usuário).

Levando-se em consideração o caso anterior, apenas um dos recursos é necessário para que o enlace D2D seja estabelecido, liberando os outros  $M - 1$  recursos para outros enlaces. Isso posto, e tendo em vista que o sistema proposto não prevê adaptação para acomodar dois usuários CDMA na camada secundária, a utilização desta técnica pode diminuir o número máximo de enlaces D2D.

Ademais, caso os usuários da camada secundária desejem maior taxa, em alguns casos, o sistema pode liberar o acesso D2D para estes usuários em 2 ou mais recursos dos  $M$  totais disponíveis.

Em suma, o sistema CDMA permite a maximização da probabilidade de existência de um enlace individual, principalmente para usuários localizados próximo à BS. Contudo o sistema OFDM permite que mais recursos continuem liberados para novas tentativas de enlace D2D. Com base nestas limitações, no Capítulo 4 estudar-se-ão formas alocação que permitam que a banda seja ocupada tanto por secundários OFDM quanto por usuários CDMA ao mesmo tempo, permitindo a rede, como um todo, extrair os ganhos permitidos pelos diferentes tipos de acesso ao mesmo tempo.

Além disso, estratégias de maximização do reaproveitamento do sistema serão estudadas, com o objetivo de atender mais de um usuário secundário por recurso disponível.

# 4 ALOCAÇÃO NA CAMADA SECUNDÁRIA

*O presente capítulo investigará resultados de estratégias de alocação na camada secundária. As estratégias serão avaliadas pela capacidade, pelo número médio de usuários alocados e pela justiça na distribuição dos recursos.*

## 4.1 INTRODUÇÃO

A grande motivação para se considerar a comunicação D2D nas redes OFDMA, como WiMax e LTE-A, é o aumento na taxa de transmissão da rede e no número de usuários atendidos que esta técnica é capaz de propiciar. A estratégia adotada para se estabelecer a comunicação D2D tem um papel chave, uma vez que ela pode decidir a eficiência no reaproveitamento dos recursos da rede e o ganho de taxa propiciado.

Estudos recentes apresentam considerações e propostas acerca da forma de se alocarem os recursos visando obter o maior ganho de taxa possível para o sistema, como aqueles já citados no Cap. 1 [6], [13], [12] e outros.

No Cap. 2, verificou-se o comportamento da probabilidade de existência do enlace D2D,  $Pr[LE]$ , quando um enlace D2D tenta obter uma transmissão reaproveitando um recurso que está sendo utilizado pela rede celular. Entretanto, quando há mais de um enlace D2D requisitando comunicação na mesma célula, e os usuários da camada secundária passam a competir pelo reaproveitamento dos recursos é necessário definir uma estratégia de alocação que defina prioridades e tome decisões em curto intervalo de tempo, buscando otimizar os interesses da rede.

A escolha dos usuários que receberão os recursos da rede tem influência direta na taxa total. Usuários que apresentam níveis de SNR maiores são capazes de produzir taxas de comunicação maiores. Contudo, se todos os recursos forem distribuídos para os usuários capazes de transmitir com taxas mais elevadas, usuários na borda da célula ou que apresentem níveis elevados de interferência não serão atendidos, tornando a disputa por recursos injusta.

O presente capítulo, além de observar estratégias de alocação pelo ponto de vista da capacidade oferecida pelo sistema, investigará a justiça na distribuição dos recursos providos por cada uma dessas estratégias. Além disso, pretende-se apresentar neste capítulo uma solução para o problema de múltiplo reaproveitamento, em que mais de um usuário D2D pode ser alocado em compartilhamento no mesmo recurso da rede primária. O ganho de capacidade e a justiça serão avaliados também nessa condição.

## 4.2 MÚLTIPLOS ENLACES D2D

No Cap. 2, verificou-se o comportamento da  $Pr[LE]$  quando um enlace D2D tenta obter uma transmissão reaproveitando recurso que está sendo utilizado pela rede celular. Entretanto, quando há mais de um enlace D2D requisitando comunicação na mesma célula, e os usuários da camada secundária passam a competir pelo compartilhamento dos recursos, é necessário definir uma estratégia de alocação que defina prioridades e tome decisões em curto intervalo de tempo, buscando otimizar os interesses da rede.

O objetivo proposto é conseguir alocar o maior número de enlaces D2D preservando a qualidade mínima requerida ( $\beta_{dd}$ ), supondo-se nos algoritmos aqui apresentados, sem perda de generalidade, que apenas um PRB será distribuído para cada secundário e que todos os recursos da rede estão previamente sendo utilizados por usuários primários, que utilizam igualmente um PRB por usuário.

Um primeiro algoritmo é proposto neste estudo para realizar a alocação atendendo os requisitos propostos. Considerando que há um total de  $N_{prb}$  blocos de recursos e  $M$  enlaces D2D, este primeiro algoritmo aloca o recurso para o usuário secundário segundo um ordenamento de fila respeitando os requisitos mínimos. Não é considerado nenhum critério para formação da fila e a ordenação desta é feita de forma aleatória. Os passos dessa estratégia estão presentes no Algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1** Alocação Aleatória dos Recursos na camada secundária

---

```
1:  $k = 0$ 
2: while  $k < M$  do
3:   Seleciona o  $k$ -ésimo enlace D2D
4:    $n = 0$ 
5:    $d_{crit} = 0$ 
6:   while  $n < N_{prb}$  do
7:     if o recurso  $n$  ainda não foi reutilizado por um secundário then
8:       Calcula a distância crítica ( $d_{crit}$ ) para o enlace  $k$  no PRB  $n$ 
9:       if  $d_{crit} >$  distância do enlace  $k$  then
10:        Aloca o usuário  $k$  no recurso  $n$ 
11:        Bloqueia o recurso  $n$  para novas alocações na camada secundária
12:        break
13:      end if
14:    end if
15:     $n = n + 1$ 
16:  end while
17:   $k = k + 1$ 
18: end while
```

---

Por outro lado, ao se decidir quais usuários secundários serão atendidos segundo uma fila, nenhuma consideração foi feita no sentido de aumentar o número de usuários atendidos na segunda camada.

Para ilustrar um exemplo em que a adoção desta estratégia não atinge o número máximo de acessos possíveis na camada secundária, define-se primeiramente a Matriz de Disponibilidade ( $MD$ ), proposta nesse estudo para auxiliar a compreensão dos algoritmos. Nessa matriz, de dimensões  $M \times N_{prb}$ , cada linha corresponde a um usuário D2D e cada coluna a um recurso da rede.

A matriz  $MD$  é construída a partir do seguinte critério: o elemento  $MD_{ij}$  será 1 se a distância crítica para o usuário  $i$  no recurso  $j$  satisfizer a inequação 2.10 (o reaproveitamento é possível para este usuário) e, 0, caso contrário.

Se o usuário  $U$  possui disponibilidade 1 para um recurso  $X$ , diz-se que  $U$  está apto a receber  $X$ . O índice de disponibilidade de  $U$  indica para quantos recursos o usuário  $U$  está apto, e é computado a partir da soma dos elementos da linha  $U$  na  $MD$ .

A Tabela 4.1 mostra um exemplo de Matriz de Disponibilidade para um cenário onde  $M = 2$  e  $N_{prb} = 2$ . Neste exemplo, o usuário D2D #1 pode fazer reaproveitamento tanto do primeiro quanto do segundo PRB com os usuários da rede primária, enquanto o usuário D2D #2 só terá o critério estabelecido na inequação 2.10 atendido para o primeiro PRB.

Tabela 4.1: Matriz de Disponibilidade - Exemplo 1

	PRB 1	PRB 2
D2D #1	1	1
D2D #2	1	0

Segundo o modelo apresentado, o algoritmo 1 destinará o primeiro PRB para o compartilhamento do usuário #1. Essa decisão torna inviável que usuário #2 consiga receber algum recurso em compartilhamento com a rede primária. Observando a Matriz de Disponibilidade, conclui-se que o usuário não é capaz de acessar o PRB 2 respeitando a margem de interferência da rede.

Para combater esse efeito, um novo algoritmo foi elaborado, durante o desenvolvimento desse trabalho, visando aumentar o número de usuários D2D atendidos. O Algoritmo de Prioridade a Baixa Disponibilidade (PBD) atribui prioridades de alocação ao usuário que tem menor índice de disponibilidade.

Escolhido o usuário que tem prioridade, o próximo passo do algoritmo é realizar a alocação do recurso a esse usuário. Para tal, o algoritmo observa o conjunto de recursos para o qual o usuário está apto na linha deste usuário na  $MD$ . O algoritmo selecionará para o usuário, entre esses recursos, aquele para qual menos usuários se encontram aptos (menos concorrentes). Nos

casos em que houver empate, a decisão será realizada seguindo a ordem da fila.

---

**Algoritmo 2** Alocação com Prioridade a Baixa Disponibilidade

---

```
1: Calcula a Matriz de Disponibilidade (MD)
2:  $k = 0$ 
3: while  $k < M$  do
4:   Índice de Disponibilidade do usuário  $k$  = soma da  $k$ -ésima linha
5:    $k=k+1$ 
6: end while
7: while  $\max(\text{Índice de Prioridade}) > 0$  do
8:    $U$  = usuário com menor índice de Disponibilidade acima de 0.
9:    $n=0$ 
10:  concorrência =  $M + 1$ 
11:  while  $n < N_{prb}$  do
12:    if  $MD_{U_n} = 1$  then
13:      if  $\sum_{i=0}^M MD_{in} < \text{concorrência}$  then
14:        concorrência =  $\sum_{i=0}^M MD_{in}$ 
15:         $S = n$ 
16:      end if
17:    end if
18:     $n = n+1$ 
19:  end while
20:  Aloca o usuário  $U$  no recurso  $S$ 
21:  Faz a linha  $U$  da tabela  $MD = 0$ 
22:  Faz a linha  $S$  da tabela  $MD = 0$ 
23:  Atualiza índice de disponibilidade dos usuários
24: end while
```

---

A Figura 4.1 mostra as duas primeiras alocações feitas por esse segundo algoritmo em um ambiente onde  $M = 5$  e  $N_{prb} = 5$ . Nesse exemplo em específico, o índice de disponibilidade igual a 2 dos enlaces D2D #1 E #4 é o menor da tabela. Utilizando a regra estipulada para os casos de empate, o usuário #1 tem prioridade em receber recurso.

Vale observar que embora D2D #5 também tenha índice de disponibilidade 2, o empate é decidido a favor do primeiro enlace, pois este aparece primeiro na matriz de disponibilidade, o que representa certa aleatoriedade no desempate que depende da organização inicial da  $MD$ .

Estão disponíveis para D2D #1 os PRBs 2 e 3. No PRB 2 há outros 3 enlaces D2D que concorrem por esse recurso, enquanto para o PRB 3 existem 4 concorrentes (todos os usuários estão aptos a concorrer por este recurso). Assim, o PRB 2 é destinado ao enlace D2D #1.

Feita esta alocação, a  $MD$  é atualizada, bloqueando o acesso ao PRB 2 na segunda camada

e tirando o primeiro enlace D2D da fila de espera. Seguindo com o exemplo, o enlace D2D #5 passa a apresentar o menor índice de disponibilidade, 1. Este enlace está apto a receber apenas o PRB 3, e, portanto, é alocado neste recurso.

O Algoritmo 2, terminado o processo, é capaz de alocar os 5 usuários D2D em recursos diferentes. O resultado dos recursos alocados foi o conjunto  $A = \{(1, 2); (5, 3); (4, 4); (2, 1); (3, 5)\}$ , onde o par ordenador  $(x, y)$  representa que o usuário D2D # $x$  recebeu o PRB  $y$ . No mesmo cenário, dada a ordenação inicial, o algoritmo aleatório resultou em um conjunto de alocação  $A = \{(1, 2); (2, 1); (3, 3); (4, 4)\}$  o que novamente representa que um usuário a menos foi alocado.

	PRB 1	PRB 2	PRB 3	PRB 4	PRB 5
D2D # 1	0	1	1	0	0
D2D #2	1	1	1	1	1
D2D #3	1	0	1	1	1
D2D #4	0	1	1	1	0
D2D #5	0	1	1	0	0

↓

	PRB 1	PRB 2	PRB 3	PRB 4	PRB 5
D2D # 1	0	0	0	0	0
D2D #2	1	0	1	1	1
D2D #3	1	0	1	1	1
D2D #4	0	0	1	1	0
D2D #5	0	0	1	0	0

Figura 4.1: Exemplo de alocação mostrando os dois primeiros passos do algoritmo PDB

As duas estratégias de alocação foram comparadas considerando-se uma banda de  $5MHz$ . Supõe-se ainda, sem perda de generalidade, que essa banda é subdivida em 25 blocos de recursos onde cada um deles ocupa uma faixa de  $180kHz$ , totalizando uma banda efetiva de  $4,5MHz$  [30]. Os 25 PRBs são alocados para 25 usuários primários posicionados aleatoriamente dentro da célula.

Supõe-se ainda, sem perda de generalidade, a média 1 enlace D2D tentando recursos em média para cada PRB disponível, totalizando 25 enlaces D2D distribuídos também de forma aleatória, buscando recursos, em uma rede totalmente carregada, por meio de reaproveitamento. A distância  $d$ , como no Cap. 2, do enlace secundário foi fixada em certos valores para facilitar a compreensão dos resultados e permitir uma melhor interpretação gráfica.

O resultado encontra-se no gráfico presente na Figura 4.2, onde a curva PBD representa o algoritmo de prioridade a baixa disponibilidade e o algoritmo SR representa a seleção aleatória e o eixo da distância normalizada  $(d/R)$  representa a distância do enlace D2D em função do raio de célula. É possível observar que há um pequeno declínio no número de usuários atendidos quando se desloca da estratégia PBD para a estratégia SR para todas as distâncias. A queda no número

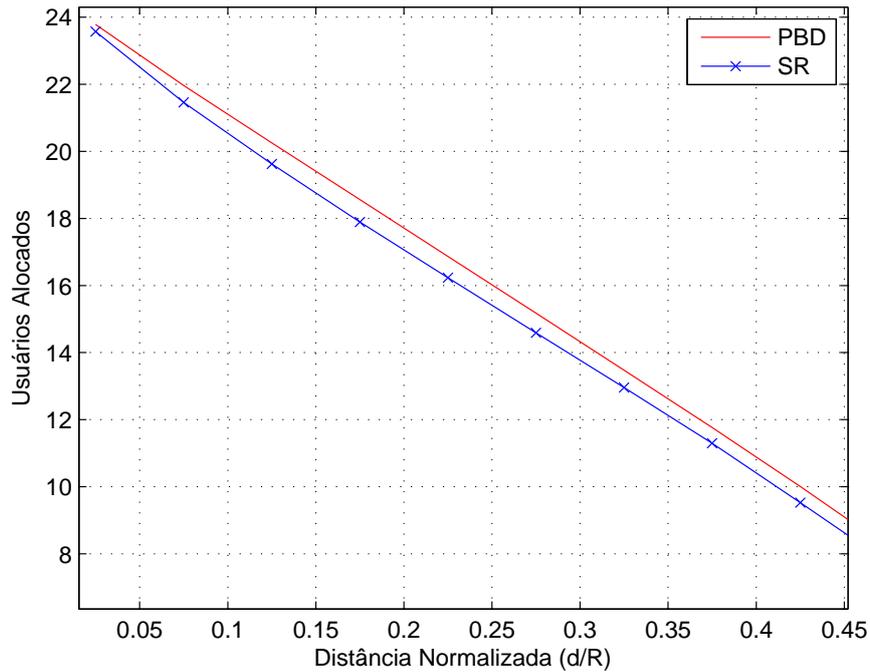


Figura 4.2: Número médio de usuários D2D atendidos pelos algoritmos SR e PBD

de usuários atendidos é da ordem de 4% para uma distância de 0,25 do raio de célula.

A diferença de desempenho dos dois algoritmos (SR e PBD) é pequena em relação ao número médio de usuários alocados. Observando essa grandeza se vê poucas vantagens na adoção da técnica PBD, uma vez que a técnica SR obtém desempenho semelhante, com um algoritmo mais simples. Por outro lado, considerando-se como bloqueio na segunda camada, a situação em que um enlace D2D não recebe nenhum recurso devido a concorrência de outros enlaces secundários, apesar de estar apto para receber pelo menos um recurso, então é possível notar alguma diferença entre os dois algoritmos.

A Figura 4.3 mostra o resultado da taxa de bloqueio segundo essa hipótese para os dois algoritmos. Enquanto para todas as distâncias o algoritmo PBD deixa de atender no máximo 2% (quando  $D_{dd,dd} = 0,5R$ ) dos usuários D2D, que tenham condições de receber algum recurso. Essa taxa é inferior a 1% se  $D_{dd,dd} < 0,4R$ . Para o caso do algoritmo SR essa taxa varia entre 2% e 4,5% para  $D_{dd,dd}$  entre 0,1 e 0,4  $R$ , atingindo 7% para  $D_{dd,dd} = 0,5R$ . Como, pela definição adotada, o bloqueio para os secundários só ocorre quando todos os recursos para qual ele estava apto foram alocados para outros usuários, esse resultado mostra um desempenho consideravelmente superior do algoritmo PBD em relação a taxa de bloqueio de usuários D2D aptos. Representando um bloqueio de usuários até 4 vezes maior para o algoritmo SR.

Essa análise leva à conclusão de que, se o projeto da rede a ser elaborado decidir contemplar o maior número de usuários atendidos, o algoritmo PBD se mostra uma escolha interessante.

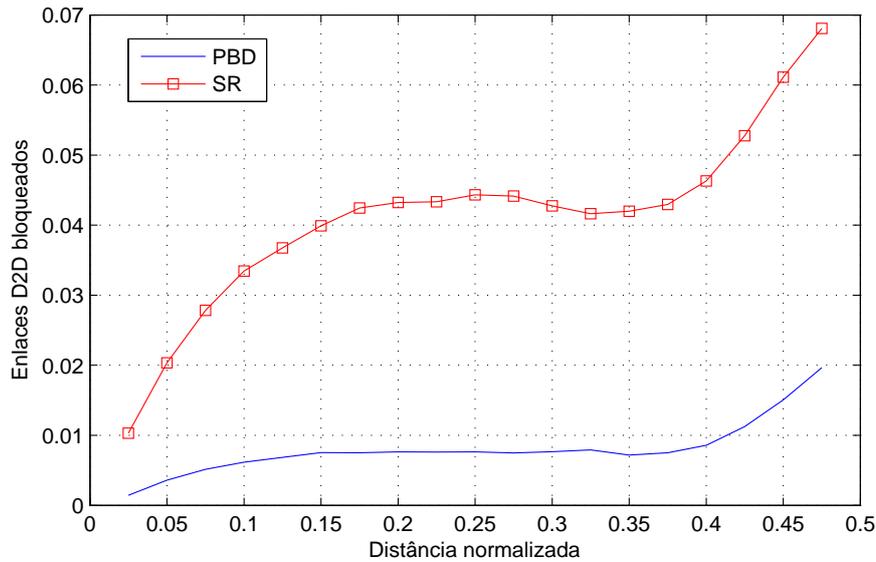


Figura 4.3: Taxa média de usuários D2D bloqueados pelos algoritmos SR e PBD

Contudo, o ganho na média de usuários atendidos pode ser considerado pequeno em relação ao ganho em termos de simplicidade do algoritmo SR. Essas duas questões devem ser levadas em conta pelo projetista para a escolha de uma ou outra estratégia.

### 4.3 TAXA DE TRANSMISSÃO

O estudo realizado na Seção 4.2 mostra como a escolha da estratégia de alocação pode influenciar no número de usuários atendidos no sistema. Todavia, uma das grandes motivações em se adotar a comunicação D2D sobreposta nas redes modernas tem sido, mais do que aumentar o atendimento aos usuários da rede, a possibilidade em prover ganhos de taxa de transmissão ao sistema.

Assim, comparar esquemas de alocação dos recursos apenas pela dimensão de usuários atendidos não fornece as informações completas sobre qual estratégia se sobressai. É possível que uma estratégia que consiga distribuir recursos para uma quantidade maior de usuários (PDB, por exemplo), apresente uma taxa total de transmissão baixa, enquanto outra estratégia capaz de alocar menos usuários (SR) pode produzir taxas mais elevadas. Isso decorre pelo fato de que, ao priorizar a quantidade de usuários, a primeira pode distribuir recursos para enlaces de baixa qualidade e isso representar perda na taxa do sistema.

Portanto, é preciso analisar os algoritmos apresentados sob a ótica da taxa de transmissão provida por estes. Para realizar essa análise, utilizar-se-á a formulação da capacidade de Shannon,

em que a capacidade máxima de transmissão em *bits* por segundo, aqui denominada  $c$ , de um enlace é dada por

$$c = B \log_2(1 + SINR), \quad (4.1)$$

em que  $B$  representa a banda em Hz destinada ao enlace.

A Equação 4.1 expressa que a capacidade de transmissão está associada a SINR obtida no enlace. Até este ponto, a única consideração feita sobre a SINR dos usuários seria a de que o primário não poderia ter qualidade inferior a  $\beta_{uc}$  (estipulado nas simulações como 10 dB) e o secundário só obteria o reaproveitamento do recurso se sua SINR fosse igual ou superior a  $\beta_{dd}$  (5 dB no estudo apresentado).

Se os usuários de ambas as camadas utilizarem potência suficiente para transmitir apenas no limiar mínimo de qualidade, todos os usuários de uma mesma camada terão a mesma capacidade de transmissão. Por consequência, o algoritmo que oferecerá maior capacidade será aquele que conseguir alocar o maior número de usuários.

Porém, em termos práticos, usuários da rede buscarão aumentar a potência (logo, sua SINR) para melhorar a qualidade de seu enlace e obter um acréscimo na capacidade de transmissão. Por outro lado, aumento de potência de transmissão se traduz em aumento na interferência observada pela outra camada. Este fato torna importante buscar uma forma de coordenação que permita que os usuários aumentem sua SINR sem prejudicar o reaproveitamento do sistema.

A estratégia apresentada para realizar essa comunicação foi desenvolvida levando em consideração os seguintes pressupostos:

- os usuários da primeira camada terão sempre SINR mínima de 10 dB;
- os usuários da segunda camada conseguirão o recurso apenas quando atingirem SINR mínima de 5 dB;
- o limite de interferência gerado pelo secundário no primário ( $\kappa$ ) não pode exceder 3 dB;
- primeiramente, buscar-se-á o reaproveitamento do recurso com a qualidade mínima estipulada;
- após o estágio de alocação, será permitido o aumento de potência, com prioridade para o primário aumentar sua capacidade;
- o acréscimo de potência de um usuário não poderá abaixar SINR da outra camada abaixo do limiar;
- não há restrições de potência máxima permitida para o equipamento.

Além desses pressupostos, como a capacidade de transmissão possui limitações tecnológicas nas técnicas de modulação e codificação, estabeleceu-se que a SINR máxima para qualquer uma das camadas é de 20 dB, o que corresponde a uma eficiência espectral na Equação 4.1 da ordem de 6,66 *bps/Hz*.

O algoritmo 3 mostra a estratégia de aumento de potência desenvolvida. O primeiro passo é, depois de realizada a alocação de reaproveitamento, aumentar a potência de todos os primários que não compartilham recursos com a segunda camada até atingir a SINR de 20 dB (capacidade máxima), uma vez que estes usuários não geram interferência em nenhum enlace da camada secundária.

Feito isso, o próximo passo é aumentar a potência de todos os usuários que compartilham recursos com a segunda camada até  $\min(20dB, \beta_{uc}^*)$ , em  $\beta_{uc}^*$  representa a qualidade máxima que esse usuário pode atingir aumentando sua potência sem que a inequação 2.10 deixe de ser satisfeita.

Em seguida, a potência do usuário D2D é aumentada até seu máximo (interferência de 3 dB no primário), ou até o ponto em que sua SINR seja 20 dB. Se o primário estiver transmitindo com  $\beta_{uc}^*$ , isso significa que a potência máxima na segunda camada é suficiente apenas para estabelecer o enlace secundário com qualidade mínima.

Caso a  $\beta_{uc}^*$  seja superior a 20 dB, a potência do primário será reduzida para que sua SINR seja igual a 20 dB, uma potência menor que a crítica, e o usuário D2D poderá ter um enlace com qualidade maior.

---

**Algoritmo 3** Alocação de Adaptação da Taxa

---

```

1:  $n = 0$ 
2: while  $n < N_{prb}$  do
3:   if Este recurso é compartilhado com algum usuário na segunda camada then
4:     Eleva a potência do primário até que a  $\beta_{uc,n} = \min(20dB, \beta_{uc}^*)$ 
5:     Eleva a potência do secundário até o máximo. Computa-se sua SINR.
6:     Se a  $\beta_{dd}^* > 20dB$ , reduz-se a potência para que a SINR na segunda camada seja de 20 dB.
7:   else
8:     Eleva a potência do primário alocado neste recurso para 20dB
9:   end if
10:   $n = n+1$ .
11: end while

```

---

A técnica proposta, que dá prioridade inicialmente ao reaproveitamento do recurso (atendimento) e depois busca a adaptação da capacidade de transmissão ao máximo possível, sem diminuir o reaproveitamento, foi utilizada para avaliar a capacidade global do sistema com o uso das estratégias SR e PBD. Foram realizadas 50 mil simulações para  $M = 25$  e  $N_{prb} = 25$  e

computado o valor médio dos resultados obtidos.

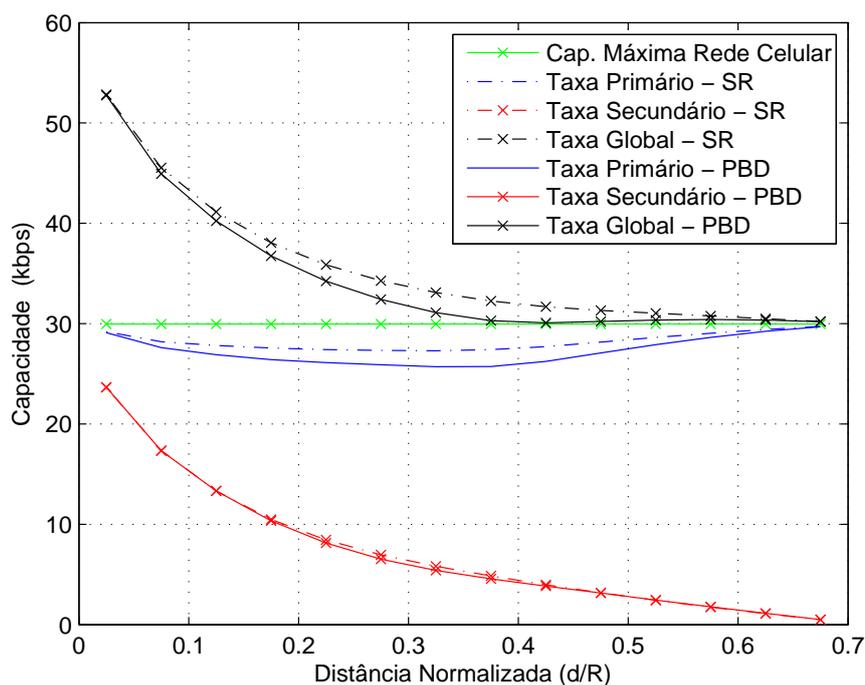


Figura 4.4: Comparação entre a capacidade da rede provida pelos sistemas SR e PBD

Na Figura 4.4, é possível observar os resultados do algoritmo de adaptação de taxa. A curva de Taxa Total representa a soma das taxas produzidas nas duas camadas (Taxas do Primário e do Secundário, na figura). A reta da capacidade máxima da rede celular representa a situação em que todos os usuários primários estariam transmitindo com capacidade máxima (SINR de 20 dB). No caso estudado, o compartilhamento de recursos impede, em alguns casos, que o transmissor celular eleve sua potência até atingir este máximo pois a coordenação impede que a qualidade do secundário seja prejudicada abaixo de um certo limiar. Por esse motivo a curva da Taxa do Primário que representa a soma da capacidade dos usuários da rede primária é inferior à capacidade máxima possível como mostra o gráfico.

A diminuição da capacidade do primário em relação ao máximo teórico é pequena se os enlaces D2D tiverem distância muito curta. Isto deve-se ao fato de que enlaces curtos apresentam poucas perdas por propagação e, por consequência, têm grande aproveitamento da potência transmitida no receptor. Assim, esses enlaces apresentam maior robustez a aumentos de potência no primário, o que permite, muitas vezes, que a camada primária eleve sua potência sem provocar queda na segunda camada. À medida que a distância do enlace D2D aumenta, essa robustez passa a ser menor e a limitação na potência do primário em reaproveitamento eleva-se, tornando a perda de capacidade na primeira camada maior.

Porém, na mesma figura, nota-se que, para  $d$  fixado em  $0,37 R$ , a perda de capacidade começa a diminuir. A explicação para esse comportamento da curva é que a  $Pr[LE]$  diminui à medida

que se aumenta a distância e, portanto, o número médio de usuários D2D contemplados diminui, diminuindo o reaproveitamento. Assim, aumenta-se o número de primários que podem aumentar sua potência sem se preocupar com a interferência intercadas. Enlaces D2D com  $d = 0,7R$  tem nível de reaproveitamento baixíssimo o que leva a capacidade da rede celular próxima a seu máximo.

Todavia, principalmente para distâncias pequenas, a perda na taxa da rede celular é pequena se comparada ao ganho produzido pelo reaproveitamento dos recursos e mostra-se compensador utilizar a comunicação D2D subjacente, do ponto de vista da rede. Se a distância dos enlaces D2D é de  $0,05R$ , por exemplo, a rede primária tem uma diminuição de capacidade de 1 Mbps em relação ao máximo possível, mas o ganho provido na taxa global supera os 20 Mbps. O reaproveitamento dos recursos eleva neste caso a capacidade total do sistema a uma taxa correspondente à eficiência espectral de 11,55 bps/Hz.

Por fim, comparando-se diretamente os algoritmos, observa-se que a seleção aleatória apresenta ganhos maiores na capacidade do sistema, especialmente pelo melhor desempenho na rede primária. O pior desempenho do algoritmo PBD em termos de capacidade era esperado, por ser um sistema que apresenta prioridade para usuários que têm disponibilidade mais baixa.

Em geral, em uma situação em que todos os enlaces têm a mesma distância, usuários com menor disponibilidade possuem um  $D_{dd,bs}$  menor que os demais, o que resulta, em muitos casos, em uma distância crítica menor, levando a indisponibilidade em algumas subportadoras. A elevada limitação de potência a que estão sujeitos esses usuários leva a uma menor qualidade na transmissão, portanto a uma diminuição na taxa máxima a que estão sujeitos e a uma menor robustez em relação à interferência dos primários, não permitindo que esses usuários aumentem muito sua potência em um sistema coordenado.

O maior número de usuários alocados também é a provável justificativa para que a capacidade do sistema secundário para os dois algoritmos tenha se mostrado semelhante, porque apesar de ter enlaces, na média, com pior qualidade, a estratégia PBD acaba alocando mais usuários havendo uma compensação na taxa total.

#### **4.3.1 Aumento na Taxa Global da rede**

A análise conduzida até aqui mostra que uma estratégia que beneficia usuários com maiores limitações de potência de transmissão acaba produzindo uma menor taxa global do sistema, uma vez que estes ocupam recursos do sistema com baixa eficiência. Além disso, tratando-se de recursos compartilhados, um usuário que observa maior nível de interferência necessita de maior potência para atender seus interesses o que significa uma interferência maior e, por conseguinte, uma diminuição de taxa na camada compartilhada.

Desta forma, se a prioridade do projeto for obter uma maior taxa de transmissão da rede a

estratégia adotada deve priorizar usuários D2D que tenham maior qualidade de transmissão na competição pelos recursos, conseqüentemente, estão aptos a desenvolver uma taxa de transmissão maior. Uma forma simplificada de buscar esse aumento de taxa é feito por meio de uma modificação na Matriz de Disponibilidade.

A alteração proposta na  $MD$ , produz uma nova matriz, que será dominada de Matriz de Disponibilidade Quantificada (MDQ). Tal matriz apresenta no elemento  $MDQ_{ij}$  o valor de  $d_{crit}/d$  para o usuário  $i$  no PRB  $j$ , se ela for maior que a distância do enlace, ou 0, caso contrário. Se esta razão for elevada, há maior tolerância para aumentos de potência no primário e maior margem para aumento de potência do próprio secundário, conseqüentemente a SINR observada será maior.

Com base nisso, foi desenvolvido um Algoritmo com Prioridade a Alta Qualidade (PAQ) que visa o aumento de taxa ao selecionar o elemento  $MDQ_{i,j}$  que produz o maior valor da MDQ e aloca o usuário  $i$  no PRB  $j$ . Esse usuário e o PRB já alocado saem da lista de disponibilidade, como mostra o algoritmo 4.

---

**Algoritmo 4** Algoritmo de Prioridade a Alta Qualidade (PAQ)

---

- 1: Calcula a Matriz de Disponibilidade Quantificada
  - 2: **while**  $k < M$  **do**
  - 3:     Índice de Disponibilidade do usuário  $k$  = número de elementos na  $k$ -ésima linha maiores que 0.
  - 4:      $k = k+1$
  - 5: **end while**
  - 6: **while** max(Índice de Prioridade)  $> 0$  **do**
  - 7:     Ache o elemento  $MDQ_{i,j}$  que produz o valor máximo da tabela.
  - 8:     Aloque o usuário  $i$  no PRB  $j$ .
  - 9:     Faça a linha  $i$  da tabela MDQ igual a 0.
  - 10:    Faça a coluna  $j$  da tabela MDQ igual a 0.
  - 11:    Atualize os índices de disponibilidade dos usuários.
  - 12: **end while**
- 

O algoritmo foi rodado em 50 mil simulações e, em cada uma delas, o algoritmo de adaptação da taxa foi realizado e as estatísticas computadas. A Figura 4.5 mostra os resultados obtidos para a capacidade do sistema, comparando-se o novo algoritmo (PAQ) com a seleção randômica. Os resultados da estratégia PBD foram omitidos para evitar uma confusão visual deste gráfico, considerando que não há prejuízo na informação pois o desempenho desta técnica já foi mostrado em casos anteriores como pior do que o da técnica SR.

É possível observar que há um aumento na taxa global do sistema entre 1 e 3 Mbps para  $D_{dd,dd}$  entre 0,1 e 0,35 R, conseguido por meio de acréscimos na taxa tanto para a rede primária como para a soma dos enlaces da segunda camada produzido pela utilização da técnica PAQ. A Fig. 4.6 mostra, entretanto, que o número médio de usuários alocados para o cenário em questão cai

de forma sensível em decorrência da utilização desse algoritmo, sendo de aproximadamente 17% para uma distância de 0,2 R.

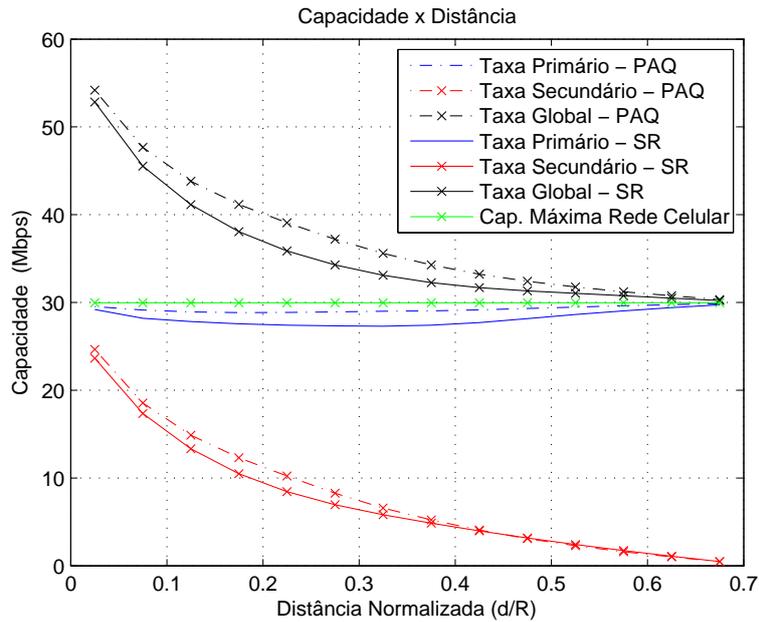


Figura 4.5: Comparação entre as taxas oferecidas pelo algoritmos SR e PAQ em função de  $D_{dd,dd}$

Esse resultado mostra que obter menos reaproveitamento dos recursos do sistema, priorizando maior qualidade do enlace, produz ganhos de capacidade, embora diminua o número de usuários atendidos.

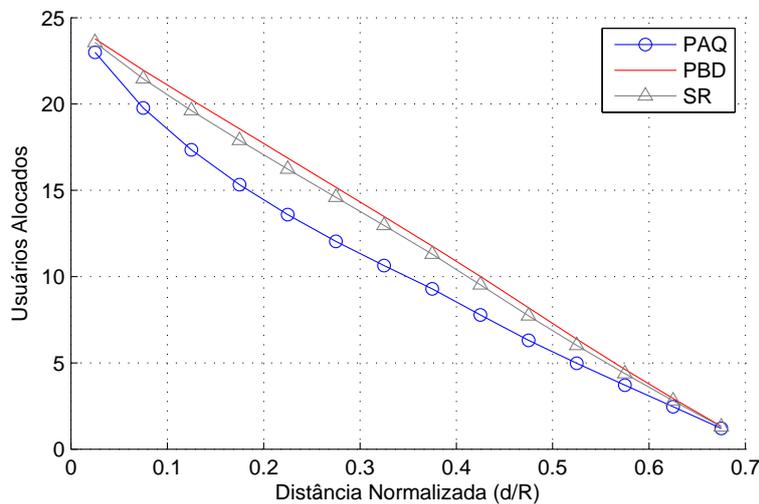


Figura 4.6: Comparação entre o número de usuários alocados pelos algoritmos PBD e PAQ

## 4.4 JUSTIÇA NA DISTRIBUIÇÃO DOS RECURSOS

Os resultados do reaproveitamento da rede por meio da alocação PAQ mostrou ganho de taxa quando comparado ao algoritmo PBD. Contudo, este ganho foi conseguido ao custo de um menor número de usuários atendidos. Na prática o que se observa é que, ao priorizar o aumento da taxa global do sistema, a rede acaba alocando alguns enlaces na segunda camada com taxas elevadas enquanto nega recursos a outros usuários.

Para a rede primária, a consequência desta decisão é que a diminuição da taxa máxima possível dos seus usuários pelo reaproveitamento é menor pela adoção dessa estratégia.

Entretanto, em alguns casos, a rede precisa conciliar os interesses de alta taxa dos usuários enquanto visa aumentar a quantidade de usuários atendidos. O ideal para o projetista, muitas vezes seria encontrar uma boa solução de compromisso entre estes dois fatores.

Avaliar apenas a capacidade do sistema não permite que conclusões efetivas sejam feitas em relação à qualidade média de atendimento observada pelos usuários. É necessário, desejando-se realizar esta análise, encontrar-se uma outra métrica que seja capaz de representar, ou ao menos aproximar, a satisfação dos usuários ou a equidade na distribuição dos recursos do sistema.

Um estudo publicado em 1984, propõe o *índice de Jain* como um índice para medida de justiça [31] na distribuição de recursos. Uma das principais motivações citadas pelos autores do estudo advém da seguinte explicação "a justiça é um importante critério de desempenho em todos os esquemas de alocação de recursos. Entretanto, geralmente é observada apenas de forma qualitativa. As medidas quantitativas propostas na literatura ou são muito específicas para aplicações particulares ou sofrem com características indesejáveis."

Segundo os autores uma boa métrica de justiça deveria apresentar algumas características desejáveis para facilitar e universalizar seu entendimento:

- *Independência da População*: a métrica de justiça deveria ser aplicável a qualquer número de usuários (finito ou infinito);
- *Escalabilidade*: o índice deve ser independente da escala da grandeza medida. A variância comumente utilizada em medidas de dispersão, por exemplo, apresenta problemas na escalabilidade. A variância em Mbps<sup>2</sup> de três usuários que recebem, respectivamente, 1 Mbps, 0,5 Mbps e 2 Mbps é de aproximadamente 0,583 Mbps<sup>2</sup>. Se as grandezas forem avaliadas em kbps, isto é, se as amostras correspondentes forem 1000 kbps, 500 kbps, e 2000 kbps a variância será da ordem de 583.000 kbps<sup>2</sup>(um milhão de vezes maior). Esta característica dificultaria a compreensão imediata e poderia levar a confusão dos resultados apresentados.
- *Limites*: o índice deveria ser limitado e oferecer resultados dentro de um intervalo fechado, por exemplo, [0,1]. Desta forma a interpretação dos resultados por parte do observador seria

facilitada. Utilizando-se novamente o exemplo da variância, observa-se que esta medida tem valores que podem variar de 0 a infinito.

- *Continuidade*: alterações leves na distribuição dos recursos deve ser refletida na medida de justiça do sistema de forma contínua. Uma métrica bastante utilizada à época que mede a razão entre o máximo e o mínimo do conjunto não apresenta essa característica e estaria sujeita a interpretações bastante afetadas na presença de amostras anômalas.

Com base nestas características, foi proposta como métrica o índice de Jain medido por:

$$J(x) = \frac{(\sum_{i=0}^n x_i)^2}{n \sum_{i=0}^n x_i^2}, \quad (4.2)$$

com  $x$  representando a grandeza cuja distribuição está sendo avaliada (taxa, por exemplo) e  $n$ , o tamanho da população de indivíduos que estão solicitando por este recurso.

Esta métrica está limitada a valores no intervalo que vai de  $\frac{1}{n}$  no pior caso (distribuição mais injusta) a 1 no melhor caso (distribuição igualitária). Outra propriedade interessante é que, se  $k$  usuários receberem uma parte igual dos recursos, enquanto os outros  $n - k$  usuários não recebem nada, então o índice de Jain corresponderá a  $k/n$ .

O índice de Jain tem sido utilizado em diversas áreas das telecomunicações para medir justiça em estratégias de escalonamento, como mostram os exemplos [32], [33], [34] e [35]. Em [36] foi feito um estudo que se encaixa em um contexto similar ao do presente trabalho, no qual o índice de Jain é utilizado para avaliar a estratégia de alocação para usuários secundários em um ambiente de rádios cognitivos. Uma estratégia de alocação é proposta visando aumentar a justiça na distribuição dos recursos.

Tomando como base esses estudos que utilizam o índice de Jain para medir a distribuição dos recursos da rede, avaliaram-se as estratégias propostas até aqui sob a ótica da justiça na distribuição de capacidade para os usuários secundários. No caso em questão o cálculo do índice será dado por

$$J(c) = \frac{(\sum_{i=0}^{n-1} c_i)^2}{n \sum_{i=0}^{n-1} c_i^2}. \quad (4.3)$$

O que se deseja medir é a justiça na distribuição da capacidade média que os usuários secundários têm no acesso ao recurso. Novamente, o cenário de simulação contém  $M = 25$  e  $N_{prbs} = 25$ . A Fig 4.7 mostra o resultado médio obtido após 50 mil simulações para cada uma das três estratégias em relação à medida de justiça. Observa-se que, apesar de oferecer maior capacidade de transmissão ao sistema, o algoritmo PAQ apresenta níveis piores de justiça no intervalo que compreende enlaces D2D de 0,1 a 0,5  $R$ , pois privilegia apenas alguns usuários D2D em detrimento dos demais.

Ao mesmo tempo, o algoritmo que apresenta maior justiça na sua distribuição é aquele que apresenta a pior eficiência no uso do espectro (PBD). A estratégia PAQ fornece uma maior ca-

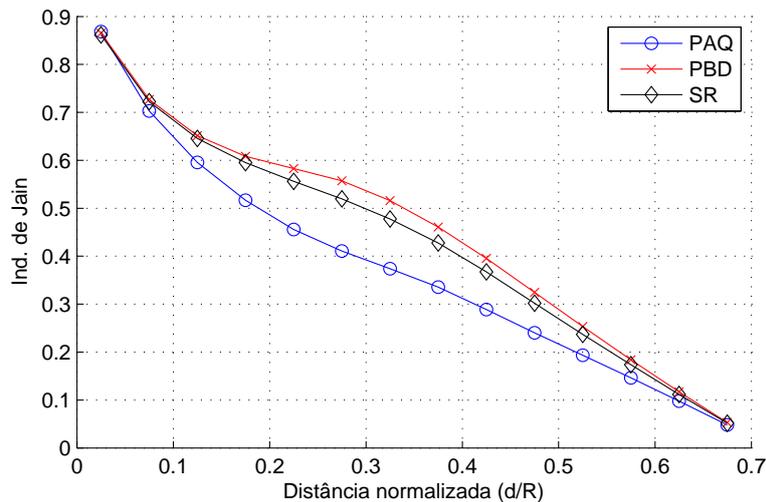


Figura 4.7: Índice de Jain x Distância do enlace D2D, para os algoritmos PAQ, PBD e SR.

pacidade total, mas uma pior distribuição dessa soma enquanto a estratégia PBD reparte melhor uma soma menor.

A partir desse resultado, novos algoritmos serão propostos nesse trabalho, buscando aumentar a soma de capacidade dos usuários da camada secundária e ao mesmo tempo proceder numa distribuição mais justa desse total.

---

**Algoritmo 5** Alocação com Prioridade a Baixa Disponibilidade Aprimorado

---

- 1:  $k = 0$
  - 2: Calcula a Matriz de Disponibilidade Quantificada (MDQ)
  - 3: **while**  $k < M$  **do**
  - 4: Índice de Disponibilidade do usuário  $k$  = número de elementos na  $k$ -ésima linha maiores que 0
  - 5:  $k = k + 1$
  - 6: **end while**
  - 7: **while**  $\max(\text{Índice de Prioridade}) > 0$  **do**
  - 8:  $U$  = usuário com menor índice de Disponibilidade acima de 0
  - 9:  $S$  = subportadora que produz o maior valor na linha  $U$  da MDQ
  - 10: Aloca o usuário  $U$  na subportadora  $S$
  - 11: Faz a linha  $U$  da tabela MDQ = 0
  - 12: Faz a linha  $S$  da tabela MDQ = 0
  - 13: Atualiza índice de disponibilidade dos usuários
  - 14: **end while**
- 

Testar todas as soluções possíveis em busca de uma solução ótima de alocação é uma tarefa complexa do ponto de vista computacional (podendo ser uma busca do melhor resultado entre 25! soluções possíveis, em alguns casos) e pode levar um tempo de processamento muito superior

ao tempo de escalonamento. Isso torna necessário que se busque atingir os objetivos da rede por meio de técnicas mais simples, minimizando o tempo de resposta.

Um novo algoritmo proposto toma como base a distribuição justa proposta pela técnica PBD. O algoritmo com Prioridade a Baixa Disponibilidade Aprimorado (PBDA) continua, como no caso do PBD, alocando primeiramente o usuário com mais baixa disponibilidade. A diferença desse algoritmo é que ele contemplará este usuário com o recurso em que ele é capaz de obter maior SINR.

O índice de disponibilidade guarda certa correlação com a qualidade média que determinado usuário D2D enxerga nos diferentes PRBs.

Este algoritmo baseia-se nesse fato para ocupar as subportadoras em que enlaces de baixa disponibilidade tenham maior qualidade, esperando que os usuários D2D com maior disponibilidade obtenham boa qualidade em qualquer um dos recursos que se mostrarem disponíveis quando chegar sua vez de receber um PRB.

O recurso tido como tendo a maior qualidade para determinado usuário  $U$  será determinado pelo maior valor encontrado na linha  $U$  na tabela  $MDQ$ , como mostra o algoritmo 5.

Outra estratégia proposta, apresentada pelo Algoritmo 6, busca melhorar o compromisso entre taxa global e justiça na camada secundária. Para tal, o Algoritmo compara a qualidade máxima que cada usuário pode obter em reaproveitamento, considerando os  $N_{prbs}$ , e seleciona aquele que possuir a pior qualidade máxima. A Figura 4.8 ilustra os primeiros passos do algoritmo de alocação. Nesta figura pode-se ver a Matriz de Disponibilidade Quantificada de um cenário hipotético. No primeiro estágio de alocação para este cenário o algoritmo computa a maior distância crítica de cada um dos enlaces (coluna à direita da matriz). O usuário D2D #4 é selecionado por produzir o menor valor máximo para a distância crítica normalizada (1,54187), recebendo o recurso que produz este valor máximo.

Com a alocação deste usuário, na segunda rodada do algoritmo, novamente são computados os máximos da MDQ para todos os usuários, excetuando-se o usuário 4, já alocado, considerando-se todos os recursos ainda disponíveis. Nessa fase o usuário 3 tem um valor máximo para a distância crítica normalizada de 2,26 contra 3,76 do usuário 1 e 2,31 do usuário 5. Portanto, na segunda fase de alocação o usuário 3 tem prioridade, recebendo o PRB 4 (aquele que produz o máximo na distância crítica, portanto a maior SINR possível).

Ainda considerando a MDQ exposta na Figura 4.8, é possível comparar o conjunto de alocação resultante deste cenário hipotético para diferentes estratégias, sendo, por exemplo,  $A_{PPQMax} = (4, 5); (3, 4); (2, 2); (1, 5)$ ,  $A_{PAQ} = (2, 4); (5, 1); (3, 2); (4, 5)$ ,  $A_{PBD} = (3, 2); (4, 1); (2, 3); (5, 4)$ .

O algoritmo busca garantir um aumento da taxa do sistema alocando nas primeiras rodadas usuários que tenham tendência a receber enlaces com menor capacidade para elevação da SINR se deixados para o final.

---

**Algoritmo 6** Alocação com Prioridade a Pior Qualidade Máxima

---

- 1:  $k = 0$
  - 2: Calcula a Matriz de Disponibilidade Quantificada(MDQ)
  - 3: **while**  $k < M$  **do**
  - 4:     Computa-se a Qualidade Máxima do Usuário  $k$  (maior valor na linha  $k$  da MDQ)
  - 5:      $k = k + 1$
  - 6: **end while**
  - 7: **while**  $\max(\text{MDQ}) > 0$  **do**
  - 8:     Escolhe-se o usuário  $U$  com menor qualidade máxima acima de 0
  - 9:     Aloca-se este usuário no recurso  $S$  que lhe produz a maior qualidade máxima.
  - 10:    Faz a linha  $U$  da tabela MDQ = 0.
  - 11:    Faz a linha  $S$  da tabela MDQ = 0.
  - 12:    Atualiza a qualidade máxima disponível para cada usuário.
  - 13: **end while**
- 

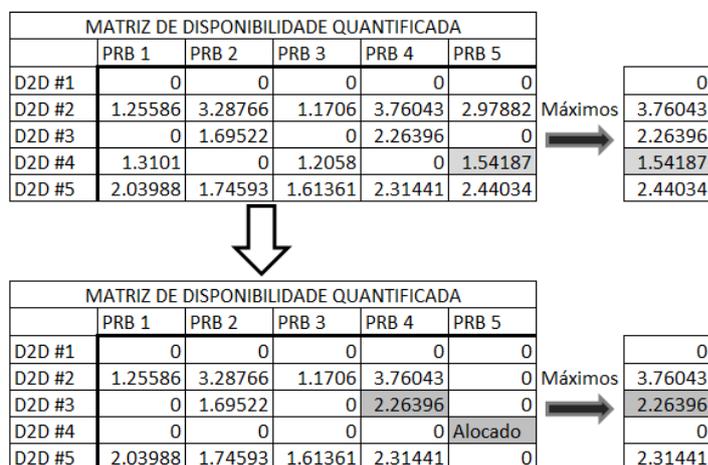


Figura 4.8: Exemplo de alocação do algoritmo PPQMax, dois primeiros passos.

O gráfico na Figura 4.9 compara a capacidade média oferecida pela rede secundária conseguida para cada uma das estratégias de alocação. O algoritmo PBDA apresenta desempenho levemente superior as demais técnicas para enlaces de curta distância. À medida que as distâncias de enlace vão aumentando o desempenho do algoritmo piora e este é superado pelos algoritmos PAQ, PPQMax. Isto ocorre porque para longas distâncias de enlace, o usuário de mais baixa disponibilidade geralmente apresenta uma qualidade ruim em praticamente todos os recursos. Alocar para este usuário o PRB no qual ele tem maior qualidade em média costuma não apresentar grandes ganhos de capacidade em relação ao PRB em que ele tem pior qualidade. Por outro lado, o PRB de maior qualidade tem grande probabilidade de ser um em que o valor de  $C_{uc,bs}$  é baixo, alocar este recurso para um usuário de baixa qualidade pode impedir que outro enlace D2D utilize este recurso no qual é capaz de obter alta qualidade, provendo ganhos maiores de taxa.

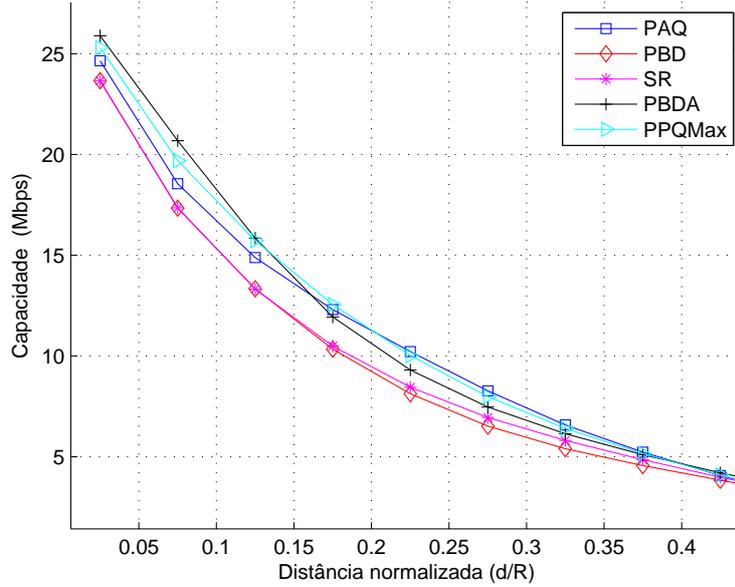


Figura 4.9: Capacidade da camada secundária para os diversos algoritmos propostos.

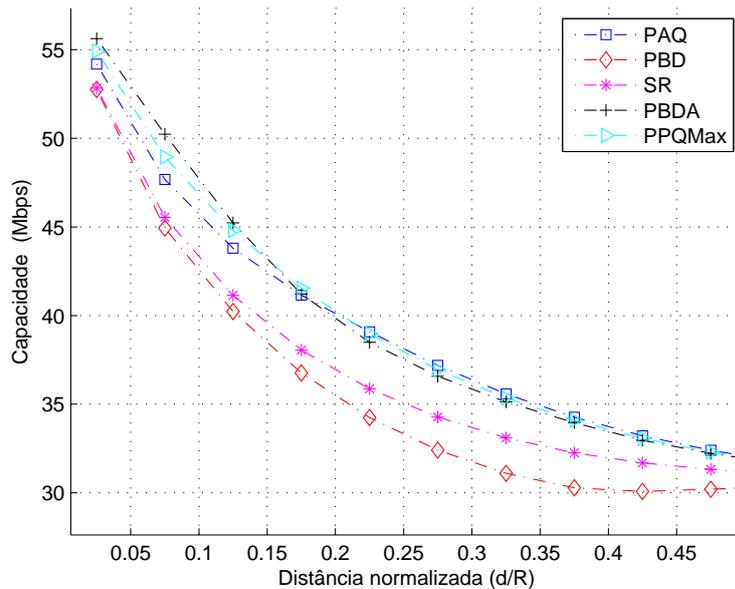


Figura 4.10: Capacidade total da rede para os diversos algoritmos propostos.

A estratégia PPQMax apresenta desempenho pouco melhor que o algoritmo PAQ para curtas distâncias, mas, à medida que a distância dos enlaces D2D aumenta, as estratégias tendem a ter desempenho semelhante. A explicação para este fenômeno é semelhante àquela dada para o exemplo anterior.

Observando a capacidade média global do sistema para cada uma das estratégias consideradas na Fig. 4.10, é possível observar que as estratégias PAQ, PBDA e PPQMax apresentam

desempenhos semelhantes e melhor que o das outras duas estratégias muito em parte pelo melhor desempenho da rede primária alcançado devido ao fato de que estas estratégias alocam usuários em canais de menor nível de interferência no compartilhamento do recurso.

Os dois novos algoritmos apresentam ganho de capacidade na camada secundária, para curtas distâncias de enlace D2D. Isto significa que um dos objetivos é parcialmente atingido, mas, considerando-se a equidade na distribuição dos recursos como um fator importante, ainda há que se considerar a justiça na distribuição dos recursos.

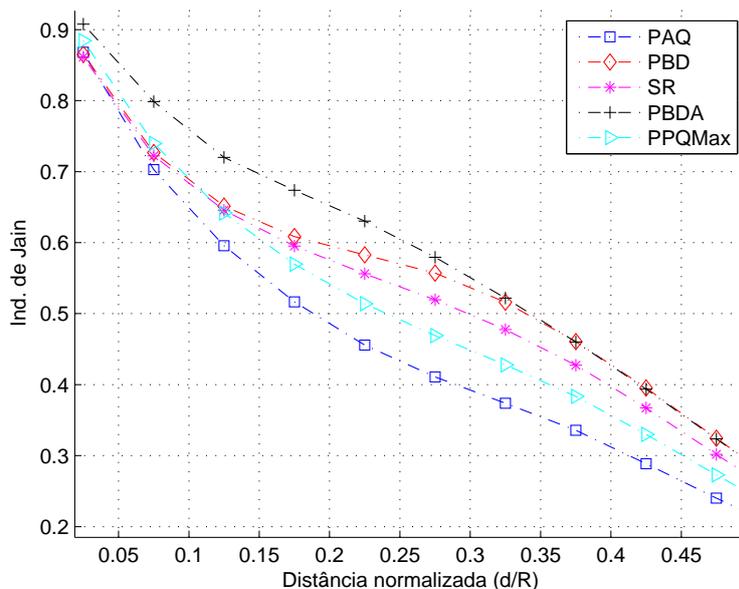


Figura 4.11: Índice de Jain na camada secundária para os diversos algoritmos propostos.

O índice de Jain obtido para cada uma das estratégias está presente na figura 4.11 onde é possível observar que há um ganho na justiça da distribuição dos recursos para a estratégia PBDA em relação às demais. Com efeito, esta estratégia se mostra como uma boa solução de compromisso entre os dois requisitos do sistema (aumento na taxa da segunda camada e distribuição justa dos recursos).

Em contrapartida, para distâncias maiores as estratégias PPQMax e PAQ têm desempenho levemente superior ao algoritmo PBDA em termos de taxa de transmissão no secundário, com a primeira apresentando um desempenho superior no que tange a distribuição dos recursos.

## 4.5 CRITÉRIO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Na Seção 4.4, foi proposto que a escolha da técnica de alocação deve ser feita por meio de critérios multiobjetivos, visando ao aumento na satisfação dos clientes com os serviços providos

pela rede.

Um dos algoritmos propostos (PBDA) mostrou melhor desempenho para distâncias de enlace menores, mas, quando essa distância aumenta, esse algoritmo oferece menor ganho de taxa do que os outros dois esquemas.

Há ainda que se considerar que existem 3 algoritmos oferecendo soluções intermediárias entre ganho de capacidade e taxa. O comportamento desses esquemas de alocação à medida que se aumenta a distância esperada dos enlaces D2D e a possível existência de outros objetivos na rede (como a distribuição de recursos para o maior número de usuários, por exemplo) leva à uma consideração sobre um método que torne possível qualificar cada uma das estratégias de forma simples ajudando o desenvolvedor do projeto a tomar uma decisão.

Uma maneira de se avaliar ao mesmo tempo todas as estratégias possíveis é por meio do conceito de *eficiência de Pareto* [37]. Este conceito, muito utilizado em abordagens econômicas e em teoria dos jogos, foi desenvolvido a partir das contribuições do economista italiano Vilfredo Pareto [38].

Em um critério de otimização multiobjetivo, uma solução pode ser representada por um vetor da forma  $x = [x_0, x_1, \dots, x_n]$ , sendo  $x_i$  o valor da solução para o  $i$ -ésimo objetivo (que no caso estudado pode ser taxa ou justiça, por exemplo). Uma solução  $X$  é dita como dominada por uma solução  $Y$ , se

$$y_i > x_i, \forall i, \quad (4.4)$$

isto é, se  $Y$  tem melhor desempenho que  $X$  em relação a todos os objetivos.

A Fig. 4.12 (a) mostra um exemplo de dominação no sentido de Pareto, onde a solução  $C$  domina as soluções  $A$  e  $B$ .

Uma solução é chamada de *Pareto-eficiente* se ela não é dominada por nenhuma outra solução. O conjunto de soluções Pareto-eficientes é denominado frente de Pareto, representado por um exemplo na Figura 4.12 (b).



Figura 4.12: Exemplos gráficos da Eficiência de Pareto.

Os resultados obtidos pelos diversos esquemas de alocação foram avaliados a partir da eficiência de Pareto para diferentes distâncias (Fig. 4.13), considerando-se dois objetivos: capacidade

de Shannon e justiça na distribuição dos recursos. Neste sentido uma estratégia é dita dominante sobre outra se tem melhor desempenho em ambos objetivos ao mesmo tempo.

A estratégia PBDA é dominante em relação a todas as outras estratégias se a distância dos enlaces D2D é fixada em 0,025 raio de célula ou 0,125 raio de célula. Se a distância desses enlaces aumenta para 0,225 R ou 0,335 R, esta estratégia deixa de oferecer uma solução dominante, embora ainda passe a figurar como uma solução Pareto-eficiente.

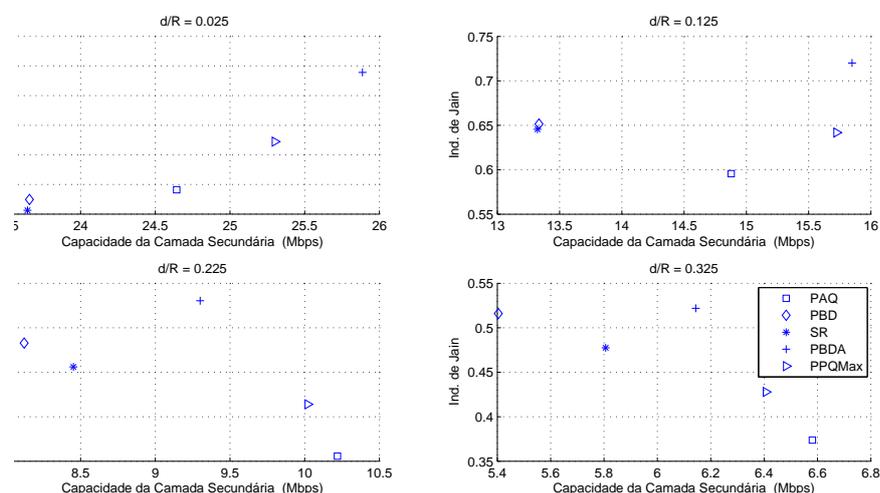


Figura 4.13: Eficiência de Pareto para as diferentes técnicas de alocação.

Para as maiores distâncias citadas, a frente de Pareto é definida pelas técnicas PBDA, PPQMax e PAQ. Nesses casos, a seleção de qualquer um destes três algoritmos para alocação dos resultados passa a depender do quanto um objetivo tem precedência sobre o outro.

Caso se deseje optar sempre por uma maior justiça, a estratégia PBDA deve ser escolhida. Se a escolha for maior capacidade oferecida, deve-se escolher a estratégia do tipo PAQ. O algoritmo PPQMax oferece uma solução intermediária embora represente na prática apenas uma leve acréscimo na justiça e um pequeno decréscimo na taxa em relação ao algoritmo PAQ.

## 4.6 MÚLTIPLO REÚSO

Até este ponto, considerou-se em todas as simulações que envolvem alocação de recursos casos em que há  $M = 25$  e  $N_{prb} = 25$ . No Cap. 2, foi apresentada uma situação em que  $M = 1$  para o número de PRBs primeiramente igual a 1 e depois sendo aumentado. Mas é possível que, devido a uma situação de tráfego elevado, além de se ter toda a camada primária carregada e alocada para alguns dispositivos celulares, exista um número de usuários buscando a comunicação D2D superior aos recursos disponíveis para reaproveitamento.

Considera-se, por hipótese, que todos os recursos da rede primária, exceto um, estão aloca-

dos para usuários que, por estarem limitados em potência, não tenham qualquer tolerância a uma eventual interferência vinda da camada secundária. Haverá apenas um único PRB com possibilidade de ser compartilhado neste caso.

Uma possível primeira escolha em um caso assim é decidir entre todos os enlaces D2D que podem fazer reaproveitamento do recurso aquele que é capaz de fazê-lo provendo maior taxa de transmissão (ou que obedeça qualquer outro critério de prioridade).

Por outro lado, é possível imaginar que um enlace D2D localizado distante do centro da célula e de curta distância entre transmissor e receptor poderá obter boa qualidade sem que isso se traduza em uma interferência elevada vista pelo primário. Isto representaria que a margem de 3 dB disponível para a interferência vinda da comunicação sobreposta não esteja sendo utilizada no seu limiar máximo.

Nessa situação, é possível que se questione a hipótese de que mais um secundário atue no reaproveitamento da rede, aproveitando a sobra da margem de interferência disponível. Entretanto, é preciso levar em consideração que deve se realizar um controle do nível de interferência também entre os dois usuários secundários que venham a tentar acesso ao mesmo canal.

Para investigar essa possibilidade, propõe-se, nesse trabalho, um novo equacionamento do problema, obtido por um novo arranjo das equações do Cap. 2 com as devidas adaptações.

Considera-se novamente que há apenas um recurso disponível para reaproveitamento na segunda camada e que ele já está alocado para um cliente celular na direção do enlace reverso (UC  $\rightarrow$  BS). Leva-se em conta, ainda, que  $M = 2$ , e os usuários D2D passam a ser identificados como  $DD_1$  e  $DD_2$ .

A SNR do usuário primário, computada na ausência de interferidores, não pode ser menor que a sua SINR mínima mais o limite de interferência oferecido para a rede, como mostra a Equação 2.4, repetida aqui por conveniência:

$$SNR_{UC} = \frac{P_{uc}C_{uc,bs}^{-\alpha}}{N} \geq (1 + \kappa)\beta_{uc}. \quad (4.5)$$

Logo, no pior caso (em que a sua SINR é a mínima possível):

$$P_{uc,min} = (1 + \kappa)\beta_{uc}NC_{uc,bs}^{\alpha}. \quad (4.6)$$

Na presença de interferência a SINR do primário deve ser corroída em apenas  $\kappa$  vezes e ser pelo menos igual a  $\beta_{uc}$ . Há contudo a presença de dois interferidores ( $DD_1$  e  $DD_2$ ) e, nesse caso,

$$SINR_{UC} = \frac{P_{uc}C_{uc,bs}^{-\alpha}}{N + P_{dd1}D_{dd1,bs}^{-\alpha} + P_{dd2}D_{dd2,bs}^{-\alpha}} = \beta_{uc}. \quad (4.7)$$

Como feito no Cap. 2, substitui-se o valor mínimo de  $P_{uc}$  na Equação 4.6 para achar o limite

mínimo de interferência que a segunda camada pode gerar no primário com seus dois usuários, o que resulta na seguinte restrição:

$$\kappa N \geq P_{dd_1} D_{dd_1,bs}^{-\alpha} + P_{dd_2} D_{dd_2,bs}^{-\alpha}. \quad (4.8)$$

Com efeito, passam a existir, deste ponto em diante, duas variáveis a serem consideradas  $P_{dd_1}$  e  $P_{dd_2}$ . Seguir o equacionamento anterior levando em conta estas duas variáveis, e a restrição da eq. 4.8, pode levar a cálculos bastante complicados do ponto de vista analítico, em especial quando se tiver tratando da generalização para  $M > 2$ .

Para facilitar os cálculos, uma simplificação matemática foi empregada, desconsiderando, *a priori*, a restrição de dependência entre as potências dos dois usuários, ou seja, considerou-se cada usuário de forma desacoplada. Os cálculos visam descobrir a potência mínima requerida para que ambos os usuários consigam o reaproveitamento do recurso com qualidade mínima considerando a interferência co-camada.

Apenas depois desse cálculo será avaliado se a interferência na primeira camada está dentro da margem oferecida pela rede. Caso não esteja, os enlaces secundários não serão capazes de realizar a comunicação ao mesmo, em compartilhamento com o primário que recebe aquele recurso.

Na Equação 4.8, cada um dos termos  $P_{dd_i} D_{dd_i,bs}^{-\alpha}$  representa uma fração da interferência vista na camada primária. Cada um deles pode ocupar uma porcentagem da interferência ( $\lambda$ ), porém a soma de ambos não pode ultrapassar 100%. Dito de outra forma, tem-se

$$P_{dd_i} D_{dd_i,bs}^{-\alpha} = \lambda_i \kappa N \quad (4.9)$$

em que  $\lambda$  indica a fração da interferência ocupada por este usuário que, devido ao que se expressa nas equações 4.8 e 4.9, deve satisfazer

$$\begin{cases} 0 < \lambda_i < 1, \forall i \\ \sum_i \lambda_i \leq 1. \end{cases} \quad (4.10)$$

Assim é possível inferir que a potência máxima de cada usuário D2D é dada por

$$P_{dd_i} = \lambda_i \kappa N D_{dd_i,bs}^{\alpha}. \quad (4.11)$$

Depois de equacionar a potência de transmissão de um enlace D2D em função de outros termos conhecidos e da variável  $\lambda$ , deve-se verificar se este nível de potência é suficiente para garantir a SINR mínima requerida para se estabelecer um enlace na camada secundária,  $\beta_{dd}$ . Ou seja, é preciso garantir pelo menos as seguintes igualdades:

$$\begin{cases} \frac{P_{dd_1} D_{dd_1}^{-\alpha}}{N + P_{uc} C_{uc,dd_1}^{-\alpha} + P_{dd_2} D_{dd_2,dd_1}^{-\alpha}} = \beta_{mu} \\ \frac{P_{dd_2} D_{dd_2}^{-\alpha}}{N + P_{uc} C_{uc,dd_2}^{-\alpha} + P_{dd_1} D_{dd_1,dd_2}^{-\alpha}} = \beta_{mu}, \end{cases} \quad (4.12)$$

com a distância  $D_{dd_i,dd_j}$  sendo medida entre o transmissor D2D  $i$  e o receptor D2D  $j$ .

É possível rearranjar os termos desse sistema de equações multiplicando ambos os lados da equações pelo denominador do membro à esquerda. Ao realizar esta operação, substituindo os resultados das equações 4.11 e 4.6, tem-se

$$\begin{cases} \lambda_1 \kappa \left( \frac{D_{dd_1,bs}}{D_{dd_1}} \right)^\alpha - \beta_{mu} \kappa \lambda_2 \left( \frac{D_{dd_2,bs}}{D_{dd_2,dd_1}} \right)^\alpha = \beta_{mu} \left[ 1 + (1 + \kappa) \beta_{uc} \left( \frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd_1}} \right)^\alpha \right] \\ \lambda_2 \kappa \left( \frac{D_{dd_2,bs}}{D_{dd_2}} \right)^\alpha - \beta_{mu} \kappa \lambda_1 \left( \frac{D_{dd_1,bs}}{D_{dd_1,dd_2}} \right)^\alpha = \beta_{mu} \left[ 1 + (1 + \kappa) \beta_{uc} \left( \frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd_2}} \right)^\alpha \right] \end{cases} \quad (4.13)$$

O conjunto de equações 4.13 apresenta um sistema linear do tipo  $Ax = b$  para ser resolvido em  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ . A matriz  $A$  nesse caso tem seus elementos  $a_{ij}$  definidos por

$$a_{ij} = \begin{cases} \kappa \left( \frac{D_{dd_i,bs}}{D_{dd_i}} \right)^\alpha, \text{ se } i=j; \\ -\beta_{mu} \kappa \left( \frac{D_{dd_j,bs}}{D_{dd_j,dd_i}} \right)^\alpha, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (4.14)$$

enquanto o vetor  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2]^T$  e o vetor resposta  $b = [b_1 b_2]^T$ , em que

$$b_i = \beta_{mu} \left[ 1 + (1 + \kappa) \beta_{uc} \left( \frac{C_{uc,bs}}{C_{uc,dd_i}} \right)^\alpha \right] \quad (4.15)$$

Para achar os valores da fração de interferência que compõem o vetor  $\lambda$  é preciso resolver o sistema linear tomando-se  $\lambda = A^{-1}b$ . Tendo em vista que, fixado  $\beta_{dd}$  para todos os secundários, quanto maior for  $\lambda_i$ , maior será a margem de interferência no primário utilizada pelo  $i$ -ésimo usuário para atingir o limiar de SINR.

Contudo, a resolução matemática do sistema proposto não garante que os dois usuários podem utilizar em reaproveitamento o recurso de forma conjunta com o primário ao mesmo tempo. O resultado para o vetor  $\lambda$  obtido pela resolução do sistema de equações deve ser analisado à luz das condições impostas no conjunto de inequações 4.10. Apenas se estas restrições forem atendidas  $\lambda$  será considerado um vetor de alocação válido.

Dessa forma, após a resolução do sistema linear, um teste de condição no vetor  $\lambda$  deve ser realizado e, se todas as restrições forem satisfeitas, os dois usuários estão aptos a compartilhar este recurso de forma coordenada realizando reaproveitamento. Neste caso, permite-se que o mesmo recurso seja alocado para três usuários distintos ao mesmo tempo (um primário e dois secundários).

Caso o vetor  $\lambda$  não seja válido é possível seguir normalmente a alocação para um único usuário, adotando um algoritmo para resolver a situação de competição por recursos na camada secundária.

As equações propostas para  $M = 2$  podem ser generalizadas para um maior número de concorrentes D2D preservando as fórmulas dos termos gerais, aumentando apenas a ordem das matrizes e vetores presentes. Devendo-se atentar, no entanto, para o protocolo a ser seguido caso o teste de condições falhe.

A estratégia adotada define que só estarão aptos a tentar o múltiplo compartilhamento os usuários D2D que estiverem aptos a transmitir naquele recurso na ausência de concorrentes. Isto, é, aqueles usuários que possuem valor 1 na Matriz de Disponibilidade para o recurso em questão. Além disso, para valores de  $M > 2$ , caso o teste de condições falhe, a lista de procedimentos define uma *fase de ajuste* em que um usuário seja eliminado da fila pelo compartilhamento múltiplo, de acordo com a seguinte regra: 1) observa-se se há valores negativos para  $\lambda_i$ , uma vez que esses indicariam uma potência recebida negativa, o que é impossível do ponto de vista físico; 2)havendo-os elimina-se entre esses usuários aquele que possui o menor valor para  $d_{crit}$  antes da tentativa de múltiplo compartilhamento (aquele que exige maior potência para atingir  $\beta_{dd}$ ); 3) Não havendo valores negativos, mas a soma dos elementos do vetor  $\lambda$  sendo superior a 1, elimina-se o usuário que produz o maior  $\lambda_i$ , por ser aquele que requer maior fração da margem de interferência da rede para si, ou seja, aquele que mais carrega a rede.

Após essa eliminação, um novo teste é feito com os  $M - 1$  usuários restantes. O algoritmo continua até que se encontre um vetor  $\lambda$  que atenda aos usuários com qualidade mínima, mas preserve a margem máxima de interferência no primário.

Esta técnica foi simulada em um cenário contendo  $M = 10$  usuários, em que para cada simulação os  $M$  enlaces D2D estavam todos fixados a uma distância de  $D_{dd,dd}$ . Após 50.000 simulações os resultados médios foram colhidos. Os resultados para a estratégia de múltiplo reaproveitamento (MR) são mostrados na Fig. 4.14, apontando o número médio de enlaces conseguidos na camada secundária com um  $\beta_{dd}$  mínimo (5 dB, para o caso simulado, seguindo os parâmetros da tabela 3.1).

O número médio de usuários alocados para enlaces de  $0,025 R$  é próximo a 8,5 o que significa o reaproveitamento do recurso acima de 8 vezes em média. Como  $M = 10$  no caso simulado, significa um atendimento de 85% na camada secundária, o que passa a ser representativo quando se tem em vista que sem o múltiplo reaproveitamento no melhor caso o atendimento seria da ordem de 10 %. Para enlaces D2D cuja distância representem 10% do raio da célula, obtém-se 40 % de atendimento com apenas um recurso para o caso proposto.

O índice de atendimento cai com a distância mas ainda é da ordem de 20% (o dobro oferecido pelo algoritmo anterior) para distâncias de enlace igual a 0,2 raio da célula, o que representaria enlaces de 200m em uma célula de 1km.

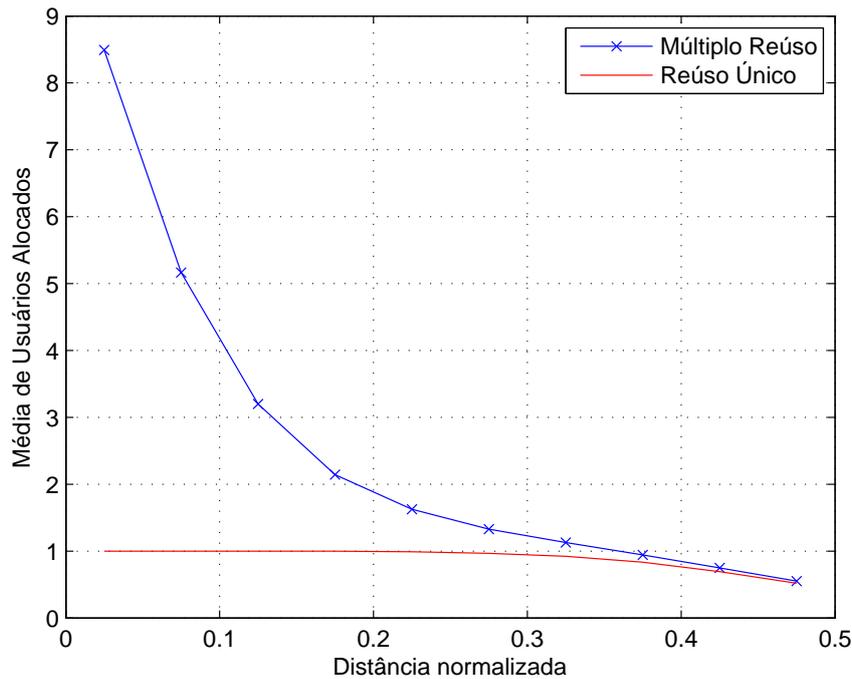


Figura 4.14: Média de Usuários Alocados com múltiplo Reuso,  $M = 10$ ,  $N_{prb} = 1$ .

O algoritmo anterior de único reaproveitamento por recurso também é mostrado neste gráfico. Para quase todas as distâncias, a média de usuários atendidos é muito próxima a 1. Isto porque, como há 10 possíveis clientes na segunda camada a probabilidade de que pelo menos um deles tenha qualidade suficiente para ser atendido pela rede é expressiva.

Para distâncias de enlace superiores a  $0,35 R$  os dois esquemas de atendimento apresentam curvas muito próximas. O que significa que enlaces dessa magnitude geram maior interferência na rede e, pois, praticamente não permitem múltiplo reaproveitamento por enlaces de mesmo tamanho, utilizando quase toda a margem de interferência fornecida pela rede.

#### 4.6.1 Adaptação da Capacidade

O algoritmo apresentado para múltiplo reaproveitamento em 1 PRB não fez considerações sobre a adaptação da SINR dos usuários do primário ou do secundário. Os resultados obtidos são apresentados para uma SINR mínima equivalente a 10 dB na primeira camada e 5 dB na segunda camada.

Assim, utilizando-se a fórmula 4.1, o aumento da capacidade provido pelo reaproveitamento no secundário será proporcional a  $\log_2(1 + 10^{0.5}) = 2,057$  bps/Hz, que representa a capacidade de um usuário secundário alocado com qualidade mínima.

Se um usuário D2D tem condições de obter a SINR que oferece a maior capacidade realizável

(6,66 bps/Hz), mas deixa de fazê-lo para alocar um número superior a 4 usuários com qualidade mínima, há um aumento na taxa global oferecida na segunda camada e, certamente, um maior índice de justiça na distribuição da taxa que saltará de  $1/M$  para  $4/M$ .

Contudo, em alguns casos é possível aumentar a potência de transmissão dos usuários envolvidos preservando a margem de interferência no primário, desconsiderando, novamente, limitações de potência nos transmissores.

O primeiro passo para a estratégia de adaptação da capacidade é realizar a alocação dos usuários utilizando o múltiplo reaproveitamento. Feito isso e definindo-se aqui  $\beta_{uc}^*$  como a SINR máxima obtida pelo primário que não torne impossível a comunicação para nenhum enlace secundário já alocado, aumenta-se a potência do primário até que sua SINR seja de 20 dB ou igual a  $\beta_{uc}^*$  (aqui sendo definida como a potência máxima do primário que não leva nenhum usuário D2D previamente alocado em reaproveitamento neste PRB a deixar de obter abaixo da mínima, considerando-se as restrições da eq. 4.10). Para cada acréscimo na potência do secundário, a solução do sistema linear e o teste de condições do vetor  $\lambda$  deve ser refeito, o que se traduz em um aumento considerável na complexidade do sistema linear (associado principalmente ao cálculo de matrizes inversas para a resolução do conjunto de equações).

Uma forma de se encontrar heurísticamente o valor para a SINR crítica, diminuindo o esforço computacional, é pelo método da bissecção do intervalo de SINR a ser investigado. Sabe-se que, para os parâmetros apresentados, a SINR mínima é de 10 dB para a rede celular. Aumentando  $\beta_{uc}$  para 20 dB e procedendo na resolução do sistema linear são possíveis duas conclusões:

1. O vetor solução  $\lambda$  não satisfaz às restrições e pelo menos algum usuário D2D deixou de ser atendido, mesmo considerando sua potência máxima de transmissão;
2. O vetor solução  $\lambda$  satisfaz às restrições e nenhum usuário D2D deixou de ser atendido.

A conclusão sendo a primeira, sabe-se que 20 dB está acima da  $\beta_{uc}^*$  e 10 dB está abaixo. O próximo passo é repetir o processo para o meio do intervalo (em escala logarítmica): 15 dB. Se novamente a alocação dos transmissores D2D não for satisfeita, então a  $\beta_{uc}^*$  encontra-se entre 10 e 15 dB, caso contrário estará entre 15 e 20 dB. Novamente, tenta-se resolver o sistema para a metade do intervalo: 12,5 dB ou 17,5 dB, respectivamente. O processo é interrompido quando o tamanho do intervalo que contém a  $\beta_{uc}^*$  for inferior a um mínimo definido pelo projeto, por exemplo, 1 dB.

Se a conclusão inicial for a segunda, então  $\beta_{uc}^* \geq 20dB$  e pode ser possível aumentar a potência e a SINR do secundários. Contudo, existem diversos usuários que podem aumentar sua potência e é preciso considerar que o aumento de potência de cada um deles implica em mais interferência vista em todos os outros.

Um algoritmo que permite realizar esse aumento é proposto para atuar da seguinte forma: substitui-se em toda a matriz  $A$   $\beta_{dd}$  por  $\beta_{dd}^* = 20dB$ . Isto é, a primeira tentativa é feita com todos

usuários D2D alocados nesse recurso com qualidade máxima.

Antes de resolver o sistema, encontra-se o usuário  $U$  tal que  $\lambda_U \geq \lambda_i, \forall i$ . E então toma-se  $b_U = 1$  e na matriz  $A$

$$a_{Uj} = 1, \forall j. \quad (4.16)$$

A substituição dessa linha garante que  $\sum_i \lambda_i = 1$ . Esse sistema restringe que todos os usuários poderão usar a parcela da margem de interferência necessária para atingir uma SINR de 20 dB, exceto pelo pior usuário que ficará com o que sobrar do total dessa margem.

Ao final da resolução do sistema linear, se o valor de  $\lambda_U$  for capaz de prover ao menos a qualidade mínima requerida e não houver nenhum  $\lambda_i < 0$ , o algoritmo atinge seu critério de parada e chega ao fim.

Caso contrário, fixa-se a SINR do usuário  $U$  em seu mínimo possível ( $\beta_{dd}$ ), eleva a SINR de todos os outros usuários a  $\beta_{dd}^* = 20dB$ . Seleciona-se como novo usuário  $U$  aquele que produz na alocação inicial o segundo maior valor para  $\lambda_i$ . Isto é, este usuário poderá utilizar da margem de interferência tudo o que restar, depois que o usuário alocado de pior qualidade tiver ao menos a qualidade mínima atendida e todos os outros tiverem SINR de 20 dB. Repetem-se esses passos até que o critério de parada seja atingido.

## 4.7 AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS COM MÚLTIPLO REÚSO

Voltando ao caso em que há diversos recursos disponíveis  $N_{prb} = 25$  e vários enlaces D2D competindo por recursos em situação onde o tráfego da rede celular está com carga plena, é possível observar os ganhos que podem ser obtidos por meio de algoritmos que explorem a possibilidade de se fazer múltiplo reaproveitamento. Em especial, considerar-se-á o caso em que  $M = 50$ , em que o número de competidores supera em 2 vezes o número de elementos da rede distribuídos.

As estratégias PAQ, PBDA e PPQMax, apresentadas na Seção 4.3.1, que apresentaram bons desempenhos em relação a taxa e índice de Jain, serão avaliadas nesse cenário, onde serão propostas ainda outras 5 estratégias de alocação (estas últimas explorando a possibilidade de múltiplo reaproveitamento).

Três das novas estratégias propostas são modificações simples das estratégias vencedoras para o caso de reaproveitamento único aqui repetida. Nestas estratégias, os usuários são alocados de acordo com uma das estratégias anteriores (PAQ, PBDA ou PPQMax), limitando apenas um reaproveitamento por PRB. Ao final deste processo define-se o conjunto  $E$  composto por todos os usuários D2D que no início do processo de alocação estavam aptos a acessar um ou mais recursos, mas finda a alocação não foram contemplados com nenhum recurso.

A partir desse ponto, para cada usuário  $e_m$  que pertence ao conjunto  $E$ , será realizada uma tentativa de alocá-lo em múltiplo reaproveitamento com algum dos recursos outrora distribuídos para um (ou mais) secundário(s) diferente(s).

Neste caso, se o teste de condição para  $\lambda$  após a resolução do sistema linear de múltiplo reaproveitamento não for satisfeita, não há fase de ajuste (eliminando-se um concorrente), o recurso é negado ao usuário  $e_m$  que tentará fazer o reaproveitamento em outra subportadora de acordo com sua matriz de disponibilidade até que consiga recurso, ou suas possibilidades estejam esgotadas. Estas estratégias, variações das primeiras, são denominadas PAQ-MR, PBDA-MR e PPQMax-MR.

Uma outra estratégia, mostrada no algoritmo 7 e chamada de (PMR - prioridade para Maior Reúso) inicia o processo selecionando o usuário de mais baixa disponibilidade. A partir de então, busca-se PRB a PRB todos os usuários que estão aptos a competir por aquele recurso (a partir da MD). Após essa seleção, tenta-se realizar o múltiplo reaproveitamento com fases de ajuste (mas impedindo que o usuário que possui prioridade seja eliminado do processo) até que cada PRB indique o número máximo de usuários que podem reutilizar aquele recurso conjuntamente. O PRB que oferece o maior índice de reaproveitamento é escolhido e os usuários alocados. O processo repete-se para os usuários ainda não alocados, até que todos os usuários com disponibilidade maior que 0 tenham recebido recurso ou que não haja mais possibilidade de alocação.

A última estratégia, variante da PMR, seleciona o usuário de baixa disponibilidade (U) e repete o algoritmo acima, com a condição que o maior número de usuários por PRB será igual a 2 (o usuário U e outro, X, em compartilhamento). Empates em número de usuários alocados são decididos em favor daqueles que produzem o menor valor de  $\sum_i \lambda_i$ . Este algoritmo será chamado, para efeito de comparação como PMR-L2 (Prioridade ao múltiplo reaproveitamento limitado em 2).

O desempenho destes algoritmos estão mostrados de acordo com a eficiência de Pareto nos gráficos da Fig. 4.15. A primeira análise é feita sobre as estratégias anteriores (que não apresentam a possibilidade de múltiplo reaproveitamento).

Conceitualmente, como cada uma dessas estratégias pode alocar no máximo 25 usuários secundários (1 por PRB), o índice de Jain máximo que podem atingir é igual a 0,5 (usuários Alocados/Total de Usuários). Para distâncias curtas as estratégias apresentaram desempenhos semelhantes, com dominação do algoritmo PPQMax.

À medida que se aumentou a distância dos enlaces o desempenho das estratégias começou a se afastar, tendendo para uma estratégia mais justa e com menos taxa para o algoritmo PBDA e menos justa mas com taxa superior para o algoritmo PPQMax, com o algoritmo PAQ ocupando uma posição intermediária no que tange os dois objetivos.

As estratégias que apresentam possibilidade de múltiplo reaproveitamento ofereceram um índice de justiça superior a 0,7 em todos os casos, para uma distância de enlace da ordem de

---

**Algoritmo 7** Alocação com Prioridade ao Maior Reúso

---

```
1:  $k = 0$ 
2: Calcula a Matriz de Disponibilidade (MD)
3: while  $k < M$  do
4:   Índice de Disponibilidade do usuário  $k$  = soma da  $k$ -ésima linha
5:    $k=k+1$ 
6: end while
7: while  $\max(\text{Índice de Prioridade}) > 0$  do
8:   U = usuário com menor índice de Disponibilidade acima de 0.
9:    $n=0$ 
10:  reaproveitamento = 0
11:  while  $n < N_{prb}$  do
12:    if U está apto a concorrer por este recurso then
13:      Faz  $Q$  = todos os usuários aptos a concorrer por este recurso
14:      tamanhoConjunto =  $\#Q$ 
15:      while tamanhoConjunto  $> 1$  do
16:        Resolve o sistema linear para múltiplo reaproveitamento
17:        Realiza o teste de condição para o vetor  $\lambda$ 
18:        if O vetor  $\lambda$  falhar no teste then
19:          Elimina um usuário do conjunto de compartilhamento  $Q$  que não seja o
usuário U
20:        else
21:          Break
22:        end if
23:        tamanhoConjunto = tamanhoConjunto-1
24:      end while
25:      if tamanhoConjunto  $>$  reaproveitamento then
26:        reaproveitamento = tamanhoConjunto
27:        UsuariosAlocados =  $Q$ .
28:        PrbAlocado =  $N_{prb}$ 
29:      end if
30:    end if
31:     $n = n+1$ 
32:  end while
33:  Aloca os UsuariosAlocados no PrbAlocado
34:  Faz as linhas UsuariosAlocados da tabela MD = 0 e a coluna PrbAlocado da tabela MD
= 0
35:  Atualiza índice de disponibilidade dos usuários
36: end while
```

---

0,025 R. Isso indica um limite inferior para o índice de atendimento médio superior a 70% (35 dos 50 usuários recebendo recurso) ou uma taxa média de usuários alocados por PRB pelo menos igual a 1,4 o que é uma bom índice de reaproveitamento dos recursos.

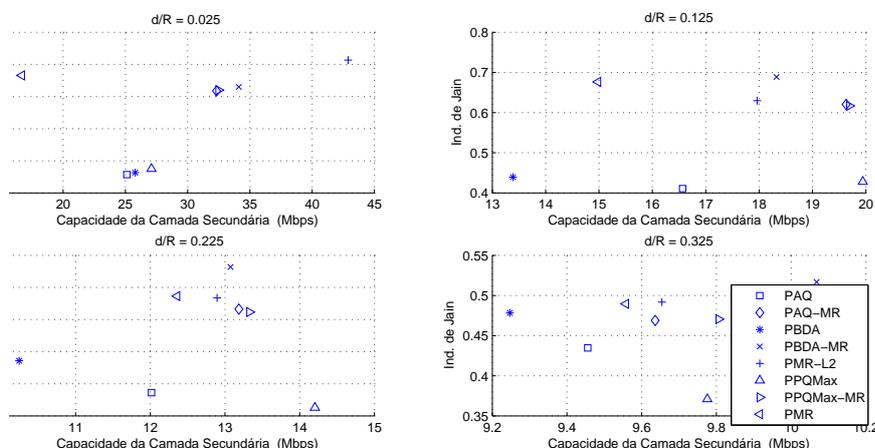


Figura 4.15: Eficiência de Pareto para diferentes técnicas, com múltiplo reaproveitamento,  $M = 10$ ,  $N_{prb} = 1$ .

A estratégia PMR-L2 tem um índice de justiça médio superior a 0,8, o que indica um índice de atendimento superior a 80% (taxa média de usuários alocados por PRB igual a 1,6). Em termos de taxa, três dos algoritmos tiveram desempenho consideravelmente superior àqueles sem MR, a exceção ficou por conta do algoritmo PMR. Por tentar alocar o maior número de usuários secundários por recurso, esta estratégia fraciona a margem de interferência por muitos usuários. Além disso a alocação em um dado PRB só é interrompida quando o número de secundários alocados em múltiplo reaproveitamento é tão elevado que o excedente da margem de interferência é tão pouco que não chega a ser suficiente para acomodar um novo usuário.

Neste caso, uma vez alocados com a qualidade mínima permitida, poucos ganhos em capacidade poderão ser observados por meio de um aumento de potência destes usuários. Assim, embora apresente um índice de justiça elevado (perto de 0,8) por atender muitos usuários, seu desempenho em termos de capacidade é inferior ao das estratégias sem MR, pois praticamente todos os usuários alocados estarão transmitindo com capacidade mínima.

Ainda considerando essa distância de enlace, a estratégia PMR-L2 ofereceu melhor resultado em termos de capacidade (cerca de 8,8 bps/Hz somando todos os usuários em reaproveitamento), sendo a estratégia dominante no critério de Pareto.

Para distâncias maiores, essa estratégia, entretanto, é dominada por outras. Para uma distância de enlace normalizada de 0,125 R chama a atenção a capacidade oferecida pelo algoritmo PPQ-Max. Mesmo alocando menos usuários que estratégias que permitem MR, este algoritmo atinge condição de Pareto-eficiente para essa distância. Isto representa que a qualidade oferecida aos poucos usuários alocados é elevada, a ponto de estratégias que possuem mais usuários alocados

com menor qualidade não serem capazes de atingir uma capacidade global na segunda camada tão elevada. Todavia, o índice de justiça para esse algoritmo é bastante pequeno pelo fato de muitos usuários ficarem de fora do compartilhamento da rede.

A modificação deste algoritmo (PPQMax-MR) também é considerada Pareto-Eficiente para estas distâncias. Partindo do mesmo princípio da estratégia anterior este algoritmo permite múltiplo reaproveitamento em alguns recursos da rede, diminuindo a potência máxima que usuários nesses recursos podem transmitir devido a interferência. O fato destes usuários transmitirem com capacidade limitada e inferior a máxima em alguns casos acabou não sendo compensado pelo aumento do número de enlaces D2D alocados. Contudo, se há pequena perda de capacidade, há aumento no índice de justiça, o que conduz o desempenho do algoritmo à frente de Pareto.

O algoritmo PBDA-MR também faz parte da frente de Pareto para estas distâncias e passa a ser dominante para uma distância de  $0,325 R$ . O fato de dar prioridade a usuários de baixa disponibilidade e, alocados esses, buscar o reaproveitamento dos recursos permite que os usuários com maior dificuldade para estabelecer o enlace recebam os primeiros recursos no primeiro estágio de alocação com alta qualidade.

Esta vantagem de permitir aos usuários com menor disponibilidade que obtenham os recursos onde podem produzir maior qualidade é fundamental para o sucesso da estratégia para enlaces de longa distância. Para pequenas distâncias existem muitos usuários aptos a competirem pelos recursos. Alocar um recurso, que pode ser enxergado como bom para a maioria deles, para usuários que necessitem utilizar uma porção considerável da margem de ruído (como geralmente ocorre com os usuários que tentam enlaces mais longos), impede que outros usuários extraiam vantagem desse PRB.

Para distâncias maiores, poucos são os candidatos aptos a compartilhar os recursos (muitas vezes inferior a um candidato por recurso disponível) e, contando ainda com o apoio do MR, o número médio de usuários alocados tende a ser praticamente o mesmo para as diversas estratégias, mudando apenas o arranjo da alocação destes usuários na competição pelos recursos.

Assim, sendo o número de concorrentes maior que o número de PRBs que podem ser distribuídos, aumentar a qualidade do enlace que tende a ser o pior, prejudica poucos (ou nenhum) concorrentes, que, em muitas vezes podem acessar outros recursos que não esse com qualidade próxima ou igual a fornecida neste PRB.

## **4.8 MÚLTIPLO REÚSO COM CDMA NA SEGUNDA CAMADA**

No Cap. 3, viu-se que a adoção da comunicação CDMA na segunda camada oferecia a vantagem de ser capaz de prover enlaces D2D com maior probabilidade, principalmente para grandes distâncias. Ao mesmo tempo, contudo, o CDMA utiliza toda a banda disponível para realizar a

transmissão.

Assim, se houver  $M > 1$  usuários D2D competindo por recursos, a estratégia CDMA como apresentada no Cap. 3 pode não ser a melhor estratégia a ser adotada. Como mostrou-se nas seções anteriores o OFDMA na segunda camada é capaz de alocar diversos usuários D2D ao longo da banda de transmissão, embora alguns dos  $M$  usuários tenham acesso negado, devido ao nível de interferência e a competição com outros usuários pelo recurso.

Devido a estes fatos, para justa comparação, foi desenvolvido nesse estudo a adaptação do modelo para múltiplo reúso da comunicação CDMA na segunda camada. Nesse modelo adaptado, cada usuário CDMA recebe um código diferente, explorando a capacidade dessa técnica de diminuir a interferência entre dois usuários CDMA por um fator igual ao ganho de processamento,  $G$ .

Nesse caso, adaptando a fórmula para a SINR para o usuário primário que ocupa a  $n$ -ésima subportadora, presente na Equação 3.68, para o caso em que há  $W$  enlaces D2D conectados a partir de uma conexão CDMA, tem-se:

$$SINR_{uc_n} = \frac{|s_{n,mu}|^2 C_{uc_n,bs}^{-\alpha}}{\frac{N_0}{2T_{ofdm}} + \sum_{w=0}^{W-1} \frac{|s_{dd,w}|^2 |S(n/T_{ofdm})| D_{dd_w,bs}^{-\alpha}}{T_{ofdm}}} \geq \beta_{uc}. \quad (4.17)$$

Considerando-se que a margem para interferência no primário é de  $\kappa$ , a partir do mesmo raciocínio adotado no Cap. 3, é possível generalizar a Equação 3.69:

$$\sum_{w=0}^{W-1} |s_{dd_w}|^2 D_{dd_w,bs}^{-\alpha} \leq \frac{N_0 \kappa}{2 |S_h(n/T_{ofdm})|}. \quad (4.18)$$

Como o valor de  $|S_h(n/T_{ofdm})|$  varia apenas em função da subportadora  $n$ , é possível afirmar que cada subportadora permite uma potência máxima diferente para  $|s_{dd}|^2$ , preservando sua SINR. Porém, é preciso que o valor da potência do secundário preserve a margem de interferência para todas as subportadoras concomitantemente, logo, deve estar abaixo do valor mínimo possível na Equação 4.18:

$$\sum_{w=0}^{W-1} |s_{dd_w}|^2 D_{dd_w,bs}^{-\alpha} \leq \frac{N_0 \kappa}{2 \max_n |S_h(n/T_{ofdm})|}. \quad (4.19)$$

Assim, supondo-se que cada um dos  $W$  usuários D2D ocupa apenas uma fração  $\lambda_w$  da interferência na camada primária, tem-se o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{cases} |s_{dd_w}|^2 = \lambda_w \frac{N_0 \kappa}{2 \max_n |S_h(n/T_{ofdm})|} \\ 0 \leq \sum_{w=0}^{W-1} \lambda_w \leq 1 \end{cases} \quad (4.20)$$

O valor de  $|s_{dd_w}|^2$  na Equação 4.20 representa a potência de transmissão máxima permitida para o  $w$ -ésimo transmissor D2D. Essa potência deve ser suficiente para que o enlace D2D tenha uma SINR pelo menos igual a  $\beta_{dd}$ , que é a qualidade mínima requerida para estabelecimento desse enlace.

A SINR do  $w$ -ésimo enlace da camada secundária,  $SINR_{dd,w}$ , pode ser escrita, utilizando-se os resultados das equações 3.57, 3.61 e 3.71, de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{|s_{dd_w}|^2 D_{dd_w, dd_w}^{-\alpha}}{\frac{N_0}{2T_{cdma}} + \frac{\sum_{n=0}^{N_{sc}-1} |s_{mu,n}|^2 C_{ucn, dd}^{-\alpha} |S_h(n/T_{ofdm})|}{T_{ofdm}}} + \sum_{j=0, j \neq w}^{W-1} \frac{|s_{dd,j}|^2 D_{dd_j, dd_w}}{G} \geq \beta_{dd} \quad (4.21)$$

em que, sem perda de generalidade, o ganho de processamento foi considerado o mesmo para todos os enlaces CDMA.

Portanto, utilizando os resultados das equações 3.79, 4.17, 4.20 e 4.21, um conjunto de  $W$  enlaces D2D só podem existir ao mesmo tempo em um determinado cenário se existe um vetor  $\lambda = [\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{W-1}]^T$ , tal que  $\sum_{w=0}^{W-1} \lambda_w \leq 1$ , capaz de satisfazer o conjunto de equações cujo o termo genérico para a  $w$ -ésima linha é:

$$\begin{aligned} \lambda_w \kappa G D_{dd_w, bs}^{\alpha} D_{dd_w, dd_w}^{-\alpha} - \beta_{dd} \sum_{j=0, j \neq w}^{W-1} \lambda_j D_{dd_j, bs}^{\alpha} D_{dd_j, dd_w}^{-\alpha} \kappa &= \\ &= \beta_{dd} \left\{ 1 + \frac{\sum_{n=0}^{N_{sc}-1} C_{uc, bs}^{\alpha} (\kappa + 1) C_{uc, dd_w}^{-\alpha} |S(n/T_{ofdm})|}{L} \right\}. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Dito de outra forma, deve existir um vetor  $\lambda$  que satisfaça  $0 \leq \sum_{w=0}^{W-1} \lambda_w \leq 1$  e seja solução para o sistema linear  $A\lambda = B$ , onde a matriz  $A$  tem seu termo geral para o elemento  $a_{ij}$  dado por:

$$a_{ij} = \begin{cases} \kappa G D_{dd_i, bs}^{\alpha} D_{dd_i, dd_i}^{-\alpha}, & \text{se } i = j; \\ -\beta_{dd} \kappa D_{dd_j, bs}^{\alpha} D_{dd_j, dd_i}^{-\alpha}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.23)$$

e o vetor  $B$  por sua vez é construído a partir do seguinte termo, para seu  $i$ -ésimo elemento:

$$b_i = 1 + \frac{\sum_{n=0}^{N_{sc}-1} C_{uc, bs}^{\alpha} (\kappa + 1) C_{uc, dd_i}^{-\alpha} |S(n/T_{ofdm})|}{L}. \quad (4.24)$$

#### 4.8.1 Resultados de Simulação

O algoritmo para a adaptação de múltiplos usuários CDMA na segunda camada foi simulado levando em consideração, sem perda de generalidade, que o ganho de processamento,  $G$ , era o mesmo para todos os usuários, e que o número de usuários D2D acessando os recursos ao mesmo tempo não pode exceder o valor de  $G$ , devido ao número de códigos disponíveis no sistema.

Primeiramente, o sistema foi simulado desconsiderando-se a coordenação para reposicionamento das frequências alocadas para os usuários primários, que teria como objetivo mitigar a interferência. Os recursos foram distribuídos para os usuários primários em uma ordem aleatória no começo de cada rodada de simulação.

Assume-se, para o caso simulado que  $M = 6$  e  $N_{prb} = 25$ , sendo o número de usuários D2D escolhido para ser inferior ao menor ganho de processamento simulado ( $G=8$ ). Os resultados de simulação estão presentes na Figura 4.16. É possível observar nesse gráfico que o algoritmo de alocação PBDA-MR utilizado para o acesso OFDM na segunda camada consegue alocar um maior número de usuários em média do que o sistema CDMA, considerando-se diferentes ganhos de processamento. O melhor desempenho do sistema OFDM decorre do fato de que cada usuário D2D compete por um número maior de recursos e não sofre interferência dos demais secundários a menos que estejam compartilhando o mesmo bloco de recurso. Por outro lado, o acesso CDMA disponibiliza apenas uma banda de frequência para que todos os usuários D2D acessem o meio, o que ocasiona interferência mútua entre eles.

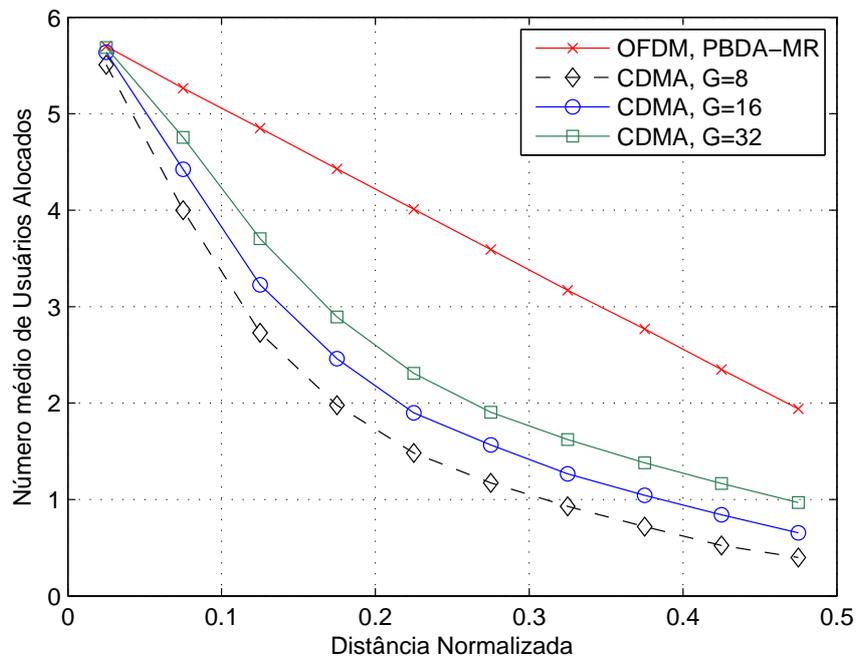


Figura 4.16: Resultado de alocação para o CDMA na segunda camada considerando-se diversos ganhos de processamento.

Além disso, a posição em frequência aleatória dos primários, não tem qualquer efeito sob os enlaces D2D do tipo OFDM, mas têm forte relação com os enlaces CDMA, conforme visto no cap 3. Assim, uma estratégia que pode apresentar melhoras no desempenho do sistema CDMA é a de realizar a reorganização dos usuários primários na banda alocada. Contudo, há que se levar em consideração que o interesse de diversos usuários secundários estão envolvidos em cada mudança na posição dos primários e que nem sempre o UC que causa maior interferência no enlace D2D

#1 será o mesmo que causa maior interferência no enlace D2D # 2.

Nesse estudo, propõe-se um algoritmo para reposicionamento dos usuários primários, realizado da seguinte forma: os blocos de recursos são numerados de 1 a 25, sendo 1 o bloco de recurso que causa menos interferência em usuários CDMA (mais próximo de uma das borda da banda alocada) e 25 o bloco de recurso mais central; na  $l$ -ésima fase calcula-se qual usuário secundário sofre maior interferência dos usuários primários, ou, dito de outra forma, qual usuário  $u$  apresenta o maior valor para  $\sum_{n=0}^{N_{sc}-1} \left( \frac{C_{ucn,bs}}{C_{ucn,ddu}} \right)^\alpha |S_h(n/T_o f d m)|$ . Após esse cômputo, descobre-se qual usuário primário produz a maior interferência individualmente nesse enlace, em outras palavras, o maior valor de  $\left( \frac{C_{ucn,bs}}{C_{ucn,ddu}} \right)^\alpha$ , e desloca-se esse primário para o recurso  $l$  bloco de recurso segundo a numeração adotada.

O objetivo do algoritmo, adotando esses passos é minimizar o valor máximo da interferência considerando-se todos os usuários CDMA ao mesmo tempo. Esse algoritmo deve ser executado sempre que um novo competidor D2D entrar ou sair da lista de alocação.

Esse fato representa que, em caso de não se encontrar um vetor  $\lambda$  que satisfaça o nível de interferência para todos os secundários, deve-se eliminar um usuário D2D da competição, o que leva a necessidade de um novo cálculo para a melhor alocação para os usuários primários. O algoritmo de eliminação realizado em situações como essa é o mesmo adotado para o caso do reuso com sistema OFDM: elimina-se o usuário  $i$  que produz o maior valor de  $\lambda_i$ .

O resultado do sistema proposto com realocação do primário sistema de alocação encontra-se na Figura 4.17. É possível observar que o desempenho do sistema melhora sensivelmente e se aproxima do desempenho obtido com o sistema PBDA-MR. Para  $G=32$ , obteve-se um desempenho semelhante pelas duas técnicas de múltiplo acesso para distâncias de enlace de até 400 m. A partir desse ponto, o sistema CDMA passa a ter melhor desempenho em termos de número médio de usuários alocados. Para  $G=16$  e  $G=8$  o sistema tem desempenho inferior, mas à medida que a distância do enlace D2D aumenta, a diferença entre os sistemas diminui, passando a ser superior para o caso CDMA quando  $D_{dd,dd} = 0,5R$ , para  $G=16$  e  $D_{dd,dd} = 0,6$ , para  $G=8$ .

A adoção de  $G=32$ , mesmo para grandes distâncias de enlace, se justifica quando os tipos de serviços requeridos pelos usuários D2D não requerem altas taxas, caso contrário, em alguns casos, pode ser mais satisfatório servir um menor número de usuários com menor probabilidade de acesso do que servir mais usuários sem que estes consigam desempenhar seus serviços com a taxa esperada.

Nas seções anteriores o sistema OFDM mostrou-se capaz de alocar uma grande quantidade de usuários nas seções anteriores, enquanto que o sistema CDMA, além de estar limitado pelo ganho de processamento dos usuários, aparenta uma menor capacidade em suportar múltiplos enlaces D2D.

Para realizar a comparação entre as duas técnicas de acesso, na situação em que mais usuários buscam acessar os recursos da rede, simulou-se um cenário onde  $M = 25$  (1 usuário D2D por

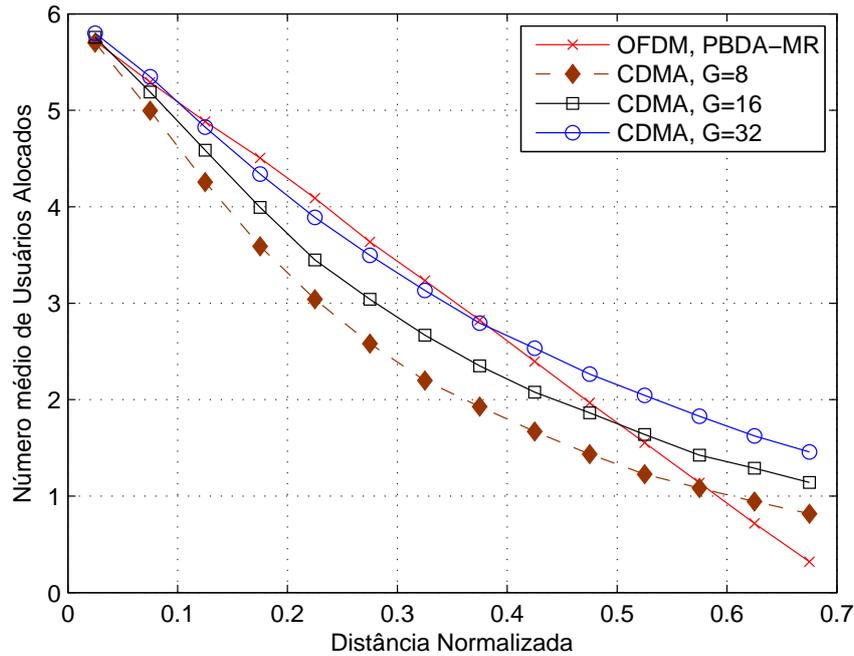


Figura 4.17: Resultado de alocação para o CDMA na segunda camada com realocação do primário considerando-se diversos ganhos de processamento.

bloco de recurso) e  $G=32$ . O resultado, presente na Figura 4.18, mostra que nessa situação, mesmo para um ganho de processamento elevado e, conseqüentemente, uma taxa de transmissão baixa para os usuários CDMA, o acesso OFDM apresentou melhor resultado em termos de usuários alocados em quase todas as situações simuladas. Apenas quando  $D_{dd,dd} > 0,65R$ , o sistema CDMA passou a oferecer melhor desempenho. Esse resultado corrobora aqueles obtidos no Cap. 3 que indicam que o sistema CDMA na segunda camada é mais robusto a variações na distância do enlace, tendo melhor desempenho para enlaces D2D de grandes distâncias.

A maior robustez provido pelo sistema CDMA em relação à distância do enlace D2D fica evidente na Figura 4.19, onde  $M = 25$  enlaces D2D disputam por recursos estando todos localizados a uma distância de  $0,3 R$  da BS. Nesta figura é possível ver, que para o caso OFDM nenhum usuário D2D foi capaz de acessar recursos da rede quando  $D_{dd_i,dd_i} > 0,21R$ , pois para os parâmetros simulados, como visto no Cap. 2, se  $D_{dd_i,dd_i} > 0,72D_{dd_i,bs}$  o enlace D2D não é viável. Para o sistema CDMA, no entanto, esse limite é maior, sendo de aproximadamente  $1,93D_{dd_i,bs}$ , para  $G=32$ , e  $1,30D_{dd_i,bs}$ , para  $G=8$ .

É possível observar, ainda na Figura 4.19 que, embora consiga um menor número de usuários alocados quando as condições são favoráveis, por exemplo na faixa em que  $D_{dd_i,dd_i} < 0,5D_{dd_i,bs}$ , o sistema CDMA consegue ter melhor desempenho para enlaces mais longos, sendo capaz de alocar mais usuários secundários.

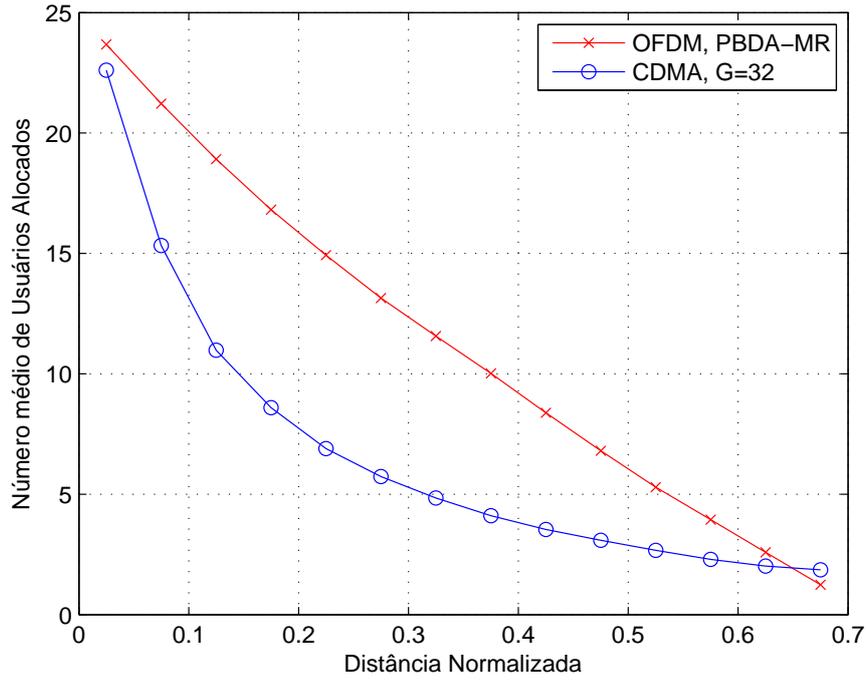


Figura 4.18: Resultado de alocação para o CDMA na segunda camada com realocação do primário considerando-se diversos ganhos de processamento.

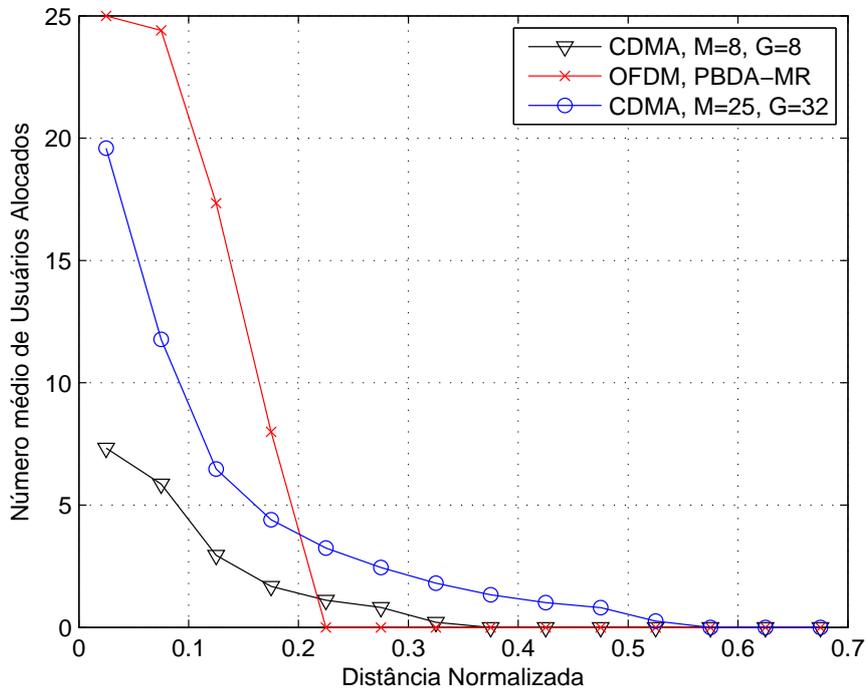


Figura 4.19: Resultado de alocação para o CDMA na segunda camada com realocação do primário considerando-se diversos ganhos de processamento, para  $D_{dd_i,bs}$  fixo em  $0, 3R$ .

## 4.9 CONCLUSÕES

A estratégia de alocação de recursos em uma rede celular tem importância considerável na satisfação dos clientes de determinada rede, pois define quais usuários são atendidos e com que qualidade de transmissão.

Uma vez que a comunicação D2D tem sido vista por novas gerações de redes sem-fio como uma alternativa interessante para o problema de tráfego, a alocação de recursos para enlaces D2D se torna relevante no sentido de oferecer o maior ganho possível para o sistema.

Neste capítulo, avaliou-se um protocolo de alocação de recursos que dá preferência ao primário e não considera limitações de potência nos equipamentos. Embora este cenário seja bastante simplificado, serve como abordagem inicial no estudo da comunicação D2D subjacente, mostrando quais ganhos essa técnica pode oferecer ao sistema como um todo.

Foram avaliadas estratégias distintas, onde observou que os maiores ganhos de capacidade foram oferecidos por algoritmos que privilegiam usuários que possuem maior qualidade de transmissão. Como é de se esperar, usuários com alta qualidade no enlace são capazes de explorar de forma mais eficiente os recursos, podendo aumentar a taxa de transmissão sem que isso se configure em uma taxa de erro de símbolos elevada no receptor.

Porém, privilegiar usuários que possuem alta capacidade, apesar de oferecer maiores capacidades, mostra-se como uma estratégia injusta do ponto de vista dos usuários D2D que concorrem pelos recursos na camada secundária. Isto porque alguns usuários dessa camada terão seu acesso negado e podem ser considerados clientes insatisfeitos. O índice de Jain foi utilizado para medir a justiça na distribuição dos recursos da camada secundária e observou-se que algumas estratégias apesar de oferecerem ganhos de capacidade, tornam a distribuição dos recursos injusta.

Nesse sentido, o algoritmo que prioriza a maior qualidade possível para usuários de baixa disponibilidade (PBDA) mostrou-se melhor que as outras estratégias propostas, nos dois critérios de otimização (capacidade e justiça) para enlaces D2D de curta distância, na situação onde existe um enlace D2D concorrendo por recursos para cada PRB da rede primária. Para enlaces maiores este critério deixa de prover ganhos maiores em taxa, embora fosse a estratégia mais justa do ponto de vista dos usuários, o que coloca este algoritmo na frente de Pareto para distâncias maiores.

Visando uma situação de tráfego intenso e múltiplos enlaces D2D buscando recursos, foi proposta uma solução para o múltiplo reaproveitamento dos recursos. Desta forma permitiu-se que, em dadas condições, mais de um usuário secundário utilizasse o mesmo PRB, aumentando consideravelmente o índice de atendimento.

Estratégias que contemplam o múltiplo reaproveitamento mostraram-se capazes de atingir um índice de justiça maior e um maior atendimento na camada secundária. Em alguns casos, contudo, apesar de alocar mais recursos, essas estratégias significaram em leve perda na capacidade global

da camada secundária. Isto decorre que usuários que acessam o mesmo PRB enfrentam maiores limitações de potência do que usuários que não realizam o compartilhamento, assim aqueles são menos capazes de atingir qualidades de enlace que permitam altas taxas de transmissão.

Para pequenas distâncias de enlace (25% do raio de célula) a estratégia PMR-L2, que contempla a utilização do múltiplo reaproveitamento apresentou uma capacidade superior a qualquer outra estratégia e uma eficiência espectral próxima a 10 bps/Hz apenas na camada secundária. Este resultado evidencia que a adoção da comunicação subjacente, por meio de um reaproveitamento dos recursos permite que a rede observe ganhos reais na taxa de transmissão do sistema, variáveis a partir da técnica de alocação escolhida.

O sistema CDMA mostrou-se uma técnica de alocação que apresenta características diferentes quando comparadas àquelas oferecidas pela rede secundária OFDM. Caso estime-se que se tem uma rede com poucas tentativas de acesso via enlaces D2D sobrepostos à camada primária, o OFDM se configura como uma estratégia interessante, especialmente para serviços que requerem baixa taxa de transmissão. Quando se tem diversos enlaces D2D buscando compartilhar os recursos, as estratégias propostas para o acesso OFDM mostraram-se capazes de conseguir uma grande quantidade de usuários alocados. Nesse caso, o acesso CDMA mostra-se como uma alternativa interessante para situações em que se tem muitos enlaces em que  $D_{dd_i,dd_i} > 0,72D_{dd_i,bs}$ .

# 5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foram feitos estudos sobre diversos aspectos da comunicação D2D subjacente a uma rede celular. Este tipo de comunicação tem como principal vantagem a capacidade de oferecer reaproveitamento do sistema, aumentando a eficiência espectral por meio de mais usuários alocados na rede.

Além do estudo da influência dos parâmetros envolvidos na probabilidade de se obter o reaproveitamento dos recursos, foram apresentadas estratégias de alocação com o objetivo de maximizar a capacidade oferecida pelo sistema, mantendo uma distribuição justa dos recursos da rede para os enlaces D2D.

Foram propostas ainda duas outras estratégias de coordenação para maximizar a probabilidade de acesso de enlaces na camada secundária. Na primeira delas, propõe-se o múltiplo reaproveitamento do mesmo recurso por mais de um enlace D2D, aumentando ainda mais a eficiência espectral. O segundo propõe que o usuário secundário busque estabelecer seu enlace por meio de um acesso CDMA, observando a mitigação de interferência oferecida por essa técnica de múltiplo acesso, capazes de prover comunicação em situações mais críticas.

## 5.1 SUMÁRIO DOS RESULTADOS

No Cap. 2 os parâmetros que compõem o modelo de coordenação estudado foram analisados. Os cenários foram observados sob a ótica da  $Pr[LE]$ . Foi observado que alguns destes parâmetros podem influir fortemente nesta probabilidade, tornam maiores a chance de usuários da camada secundária obterem seus recursos.

Uma primeira análise mostrou que o modelo proposto consegue servir com probabilidade elevada enlaces de curta ou curtíssima distância. Contudo, se a distância de interesse para o transmissor D2D for maior do que determinada fração da distância de interferência o enlace não é capaz de ser atendido, devido a limitação de interferência na camada primária.

A análise do coeficiente de propagação  $\alpha$  mostrou que ambientes mais severos tem uma probabilidade maior de obter a comunicação na camada secundária. Este comportamento decorre de que quando a distância de interesse é menor do que a distância de interferência para o transmissor do enlace D2D, acréscimos de potência sofrerão perdas consideravelmente maiores na direção da BS onde é vista como interferência do que sofrerá o sinal na entrada do receptor D2D. Com isto é possível aumentar consideravelmente a potência no secundário sem ultrapassar a margem de interferência no primário. Ao saltar de um coeficiente de propagação de 3,5 para 5, no caso

em questão por exemplo, o limite máximo para distância de enlaces D2D passou de  $0,72$  da distância de interferência para  $0,79$ , o que representa um raio de cobertura  $20,3\%$  maior. Contudo o desempenho dos enlaces deve piorar quando observado individualmente, devido ao coeficiente de propagação mais severo.

Uma margem de interferência  $\kappa$ , por sua vez, também é capaz de aumentar a probabilidade de existência do enlace, como era esperado. Contudo, não é possível aumentar essa margem indefinidamente, primeiro porque este ganho na  $Pr[LE]$  passa a ser menor para grandes valores de  $\kappa$ ; em segundo lugar este fato poderia levar a exigência de valores enormes de  $\kappa$  para um aumento significativo na probabilidade em certos cenários, o que acarretaria em dispêndio de potência proibitivo para o usuário celular e em segundo

Observou-se ainda que acréscimos, tanto no primário como no secundário, no limiar de SINR mínima acarretam diminuição na probabilidade média de existência do enlace. É de se esperar que uma alteração em um limiar de rejeição de enlaces acarrete uma perda no número de usuários atendidos.

No Cap. 3, abordou-se o problema de enlaces D2D cuja distância são superiores a  $0,7D_{dd,bs}$ . Neste caso, ofereceu-se uma alternativa por meio da tecnologia CDMA, que busca mitigar a interferência por meio do espalhamento espectral. Como desvantagem, um usuário D2D transmitindo por essa tecnologia sofrerá interferência de todas as subportadoras, embora mitigadas.

Observou-se que a adaptação de taxa, que se obtém facilmente para um sistema CDMA alterando-se o ganho de processamento, tem forte influência no enlace D2D. Este fato é interessante pois faz com que o sistema CDMA ofereça um bom compromisso entre probabilidade de atendimento ao usuário D2D e taxa oferecida, podendo-se adaptar para oferecer recursos a um enlace na camada secundária, embora o faça com taxa de transmissão menor.

Uma vantagem considerável apresentado pelo sistema CDMA é permitir enlaces D2D, em alguns casos, até mesmo para  $D_{dd,dd} > D_{dd,bs}$ , o que é impossível no caso anterior. Este fator representa o principal argumento em favor da adoção dessa estratégia de transmissão, caso não deseje limitar a comunicação na segunda camada a enlaces muito curtos.

Por outro lado, este sistema apresenta a desvantagem de ocupar todas as subportadoras, limitando o acesso para novas comunicações D2D que desejem explorar outros recursos da rede. Esta desvantagem torna este sistema menos útil em alguns casos, devendo ser levada em conta no momento da adoção desta técnica.

Por fim no Capítulo 4, estudou-se estratégias de alocação para múltiplos enlaces D2D concorrendo por múltiplos recursos, estabelecendo critérios de capacidade e justiça na distribuição dos recursos. Entre os algoritmos inicialmente propostos, observou-se que o PAQ era capaz de fornecer o maior ganho de capacidade ao sistema, mas para fazê-lo acabava negando recursos para muitos usuários na rede.

Este fato levou ao desenvolvimento de novos algoritmos buscando uma distribuição mais

igualitária dos recursos, avaliados sob o índice de Jain. Neste sentido foi desenvolvido um algoritmo PPQMax que permite uma distribuição justa dos recursos enquanto aumenta a capacidade global na camada secundária. Este algoritmo mostrou-se dominante sobre os demais segundo o critério de Pareto, sendo apontado como a melhor entre as possíveis soluções apontadas.

Em seguida, neste mesmo capítulo, propôs-se um novo equacionamento para atender a questão do múltiplo reaproveitamento, isto é para que mais de um enlace secundário fosse capaz de acessar o mesmo recurso. Os algoritmos que implementaram esta estratégia apresentaram ganhos de atendimento em relação àqueles que não contemplavam essa técnica. Contudo, a capacidade global na camada secundária caiu em alguns casos, pois muitos usuários alocados no mesmo recurso levavam a uma restrição forte de potência sobre todos eles, impedindo que atingissem individualmente uma qualidade elevada, prejudicando a soma de capacidades da camada como um todo.

Para curtas distâncias o algoritmo PMR-L2 que limita em dois o número de usuários no mesmo recurso na segunda camada sobressaiu-se diante os demais. Contudo, para enlaces maiores que um determinado limiar, a estratégia PBDA-MR, que contempla o uso do múltiplo reaproveitamento, teve desempenho que não foi dominado por nenhum outro algoritmo, estando sempre sobre a fronteira de Pareto.

Outras estratégias que oferecem soluções interessantes do ponto de vista da capacidade para médias distâncias foram oferecidas pelos algoritmos PPQMax e sua variação PPQMax-MR.

O múltiplo reuso para usuários CDMA mostrou-se capaz de alocar menos usuários quando existem muitos enlaces D2D competindo por recursos. Por outro lado, essa técnica mostrou-se vantajosa em situações onde se tem distâncias longas para os enlaces secundários. A adoção do sistema CDMA justifica-se em situações onde não se espera uma grande quantidade de secundários competindo por recursos e os serviços requeridos para a camada secundária permitem uma transmissão com taxa mais baixa, ou a distância do enlace D2D é grande.

Em suma, foram analisadas diversas formas de se realizar alocação de usuários na segunda camada de comunicação e foram feitas diversas propostas atendendo a requisitos diferentes a serem atendidos pela comunicação D2D, apontando o potencial dessa técnica em termos de ganhos de taxa e atendimento nas tecnologias modernas, propiciando uma maior eficiência espectral.

## **5.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS**

Seguindo o escopo deste trabalho algumas sugestões de investigações futuras são apresentadas. O objetivo destas sugestões é oferecer temas que levem adiante a investigação da comunicação D2D como uma solução alternativa e interessante para as redes de comunicação moderna.

As propostas aqui sugeridas englobam:

- modificações no cenário de simulação, permitindo-se um arranjo dos usuários D2D em *clusters* dentro da célula, observando como se comportam os algoritmos propostos para situações onde a concentração de tráfego é localizada;
- alocação de recursos em redes D2D quando os usuários podem receber mais de um PRB por vez e a alocação não seja necessariamente simétrica (1 recurso para cada usuário), levando-se em conta a justiça na distribuição dos recursos quando os usuários requisitam diferentes taxas de transmissão (de acordo com a aplicação desejada) e possuem diferentes qualidades de enlace;
- adaptação dos modelos CDMA e OFDM aqui apresentados, constituindo um modelo híbrido onde pode haver secundários compartilhando recursos por técnicas de múltiplo acesso diferentes;
- alterações no modelo, constituído uma modelagem de canal mais realista e investigando o comportamento das técnicas propostas nessa situação;
- utilização do acesso MC-CDMA na camada secundária, permitindo maior flexibilidade na transmissão e adaptação à situação de interferência;
- modificações no modelo de simulação, levando a um sistema dinâmico, onde há deslocamento dos móveis;
- realizar o estudo da interferência em um ambiente multicelular;
- realizar estudos sobre o sincronismo e a sinalização, tentando mensurar os possíveis impactos destes em um modelo de comunicação D2D em redes reais;

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANATEL. *Relatório de Acompanhamento 2011 - SMP*. [S.l.], 2011. Disponível em <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalInternet.do> .
- [2] CISCO. Visual networking index: Forecast and methodology, 2008-2013. In: *White Paper, 2009*. [S.l.: s.n.], 2009.
- [3] LABATON, S. Wireless spectrum auction raises \$ 19 billion. *New York Times*, 13 de Março de 2008. Disponível em [http://www.nytimes.com/2008/03/19/technology/19fcc.html?\\_r=1.1](http://www.nytimes.com/2008/03/19/technology/19fcc.html?_r=1.1).
- [4] HAYKIN, S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal Sel. Areas Commun.*, v. 23, n. 2, p. 201–220, Fevereiro 2005.
- [5] HSIEH, H.-Y.; SIVAKUMAR, R. On using peer-to-peer communication in cellular wireless data networks. *IEEE Journal Sel. Areas Commun.*, v. 3, n. 1, p. 57–72, Janeiro 2005.
- [6] ZULHASNINE, M.; HUANG, C.; SRINIVASAN, A. Efficient resource allocation for device-to-device communication underlaying LTE network. In: *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2010 IEEE 6th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 368 –375.
- [7] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description*. [S.l.], 2008.
- [8] 3GPP. *LTE-Advanced*. [S.l.], 2008.
- [9] JANIS, P. et al. Interference-aware resource allocation for device-to-device radio underlaying cellular networks. In: *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1 –5. ISSN 1550-2252.
- [10] YU, C.-H. et al. Resource sharing optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 10, n. 8, p. 2752 –2763, august 2011. ISSN 1536-1276.
- [11] KAUFMAN, B.; AAZHANG, B. Cellular networks with an overlaid device to device network. In: *42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1537–1541.
- [12] WANG, B. et al. Resource allocation optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks. In: *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1 –6. ISSN 1550-2252.

- [13] DOPPLER, K. et al. Device-to-device communication as an underlay to lte-advanced networks. *Communications Magazine, IEEE*, v. 47, n. 12, p. 42 –49, dec. 2009. ISSN 0163-6804.
- [14] KAUFMAN, B. *On spectrum sharing techniques for next generation cellular networks*. Dissertação (Mestrado) — Rice University, 2009.
- [15] RAPPAPORT, T. *Wireless communications: principles and practice*. IEEE, 1996. (Wireless Communications Series). ISBN 9780780311671. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=5weyKAAACAAJ>>.
- [16] FRANK, P. *Introduction to system sensitivity theory*. Academic Press, 1978. ISBN 9780122656507. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=xe1QAAAAMAAJ>>.
- [17] PAPOULIS, A.; PILLAI, S. *Probability, random variables, and stochastic processes*. McGraw-Hill, 2002. (McGraw-Hill electrical and electronic engineering series). ISBN 9780073660110. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=YYwQAQAIAAJ>>.
- [18] SHARMA, G. V. V.; SRINIVASAN, S. H. Symbol detection in CDMA-OFDM coexistence. In: *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 2531–2534.
- [19] SMITH, C.; MEYER, J. *wireless with Wimax and Wi-Fi : 802.16 and 802.11*. [S.l.]: Prentice Hall, 2005.
- [20] NUAYMI, L. *Wimax: technology for broadband wireless access*. [S.l.]: John Wiley, 2007.
- [21] HOLMA, H.; TOSKALA, A. *WCDMA for UMTS: HSDPA evolution and LTE*. [S.l.]: John Wiley, 2007.
- [22] JANG, J.; LEE, K. B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 21, n. 2, p. 171 – 178, feb 2003. ISSN 0733-8716.
- [23] WILLINK, T.; WITTKE, P. Optimization and performance evaluation of multicarrier transmission. *Information Theory, IEEE Transactions on*, v. 43, n. 2, p. 426 –440, mar 1997. ISSN 0018-9448.
- [24] WEINSTEIN, S.; EBERT, P. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete fourier transform. *Communication Technology, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 5, p. 628 –634, october 1971. ISSN 0018-9332.
- [25] EKSTROM, H. et al. Technical solutions for the 3g long-term evolution. *Communications Magazine, IEEE*, v. 44, n. 3, p. 38 – 45, march 2006. ISSN 0163-6804.
- [26] RAPPAPORT, T. S. *Wireless communications principles and practice*. [S.l.]: Prentice Hall, 2001.

- [27] TORRIERI, D. *Principles of Spread-Spectrum Communication Systems*. [S.l.]: Springer, 2005.
- [28] LATHI, B. P. *Modern Digital and Analog Communications*. 3rd. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 1998.
- [29] VITERBI, A. J. *CDMA Principles of Spread Spectrum Communications*. [S.l.]: Addison Wesley, 1995.
- [30] 3GPP. *TS36.321 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation*. [S.l.], 2009.
- [31] JAIN, R. K.; DAH-MING, W. C.; HAWE, W. R. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. *ACM Transaction on Computer Systems*, 1984.
- [32] ALMATARNEH, R.; AHMED, M.; DOBRE, O. Frequency-time scheduling algorithm for OFDMA systems. In: *Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE '09. Canadian Conference on*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 766 –771. ISSN 0840-7789.
- [33] LAN, T. et al. An axiomatic theory of fairness in network resource allocation. In: *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1 –9. ISSN 0743-166X.
- [34] KAO, D.-H.; SABHARWAL, A. Impact of network topology knowledge on fairness: A geometric approach. In: *INFOCOM 2009, IEEE*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 2601 –2605. ISSN 0743-166X.
- [35] MANOJ, B.; NUGGEHALLI, P.; RAO, R. On the use of information sharing in wireless networks. In: *Consumer Communications and Networking Conference, 2008. CCNC 2008. 5th IEEE*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 776 –780. ISSN 0197-2618.
- [36] AKTER, L.; NATARAJAN, B. Modeling fairness in resource allocation for secondary users in a competitive cognitive radio network. In: *Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1 –6. ISSN 1934-5070.
- [37] OSBORNE, M.; RUBINSTEIN, A. *A course in game theory*. MIT Press, 1994. ISBN 9780262650403. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=5ntdaYX4LPkC>>.
- [38] PARETO, V. *Manual de Economia Política*. [S.l.]: Editora Nova Cultural Ltda., 1996.