

Interferência em Comunicações D2D



Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Interferência em Comunicações Device-to-Device D2D

Edvaldo de Sousa Soares Segundo

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor Catedrático,

ISCTE – Instituto Universitário de Lisboa

setembro, 2017

Interferência em Comunicações D2D

Interferência em Comunicações D2D



Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Interferência em Comunicações Device-to-Device D2D

Edvaldo de Sousa Soares Segundo

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor Catedrático,

ISCTE – Instituto Universitário de Lisboa

setembro, 2017

Interferência em Comunicações D2D

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com brilhantes apoios e incentivos, sem os quais não se tornaria uma realidade, ficarei sempre grato.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor Catedrático Américo Correia, pela sugestão do tema, pela sua orientação, disponibilidade, pelo saber que transmitiu, pelas opiniões e críticas, total colaboração nos problemas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho.

Quero agradecer aos meus pais pelas palavras de encorajamento e pelo suporte dado nos momentos em que surgiram maiores obstáculos.

Agradecer também à minha família que sempre me apoiou de forma motivadora.

Por fim, quero também agradecer aos meus amigos mais próximos pela paciência, constante motivação que transmitiram durante essa longa caminhada do curso.

Interferência em Comunicações D2D

Resumo

A constante necessidade de aumento da capacidade de rede para atender às crescentes demandas dos assinantes, leva a indústria de telecomunicações, apoiada pela comunidade científica, a criar novos paradigmas que suportem requisitos de taxa de dados binários elevados dentro da rede de acesso sem fio existente de forma eficiente e eficaz. Para responder a este desafio, a Comunicação *Device-to-Device* (D2D) em redes celulares é vista como uma solução promissora.

Deste modo, a presente dissertação consiste na exploração do modelo de comunicação D2D (*Device-to-Device*), mediante o desenvolvimento de várias rotinas de comunicação D2D dentro de uma estrutura de rede celular LTE-A, usando simuladores já existentes, nomeadamente, simuladores de sistema em JAVA e simuladores de ligação em MatLab, afim de analisar o eventual aumento de capacidade da comunicação D2D para rede celular.

Tipicamente, as comunicações em D2D permitem que os utilizadores localizados na proximidade, possam comunicar diretamente sem a intervenção da estação base (*BS - Base Station*). Essa comunicação pode permitir ritmos binários muito elevados, baixos atrasos e poupança de energia.

Nesta dissertação alterou-se o simulador de sistema celular existente para incluir as comunicações D2D e as suas interferências, sendo apresentados os resultados obtidos.

Os resultados obtidos por simulação confirmaram o que se esperava, nomeadamente, aumento dos ritmos binários nas comunicações D2D e redução do atraso.

Palavras-chaves:

Dipositivo-para-Dipositivo (D2D), Interferência em comunicações móveis, 5G.

Interferência em Comunicações D2D

Abstract

The continuing need to increase network capacity to meet growing subscriber demands leads the telecommunications industry, backed by the scientific community, to create new paradigms that support high binary data rate requirements within the existing wireless access network efficiently and effectively. To meet this challenge, Device-to-Device (D2D) Communication in cellular networks is seen as a promising solution.

Thus, the present dissertation consists of the exploitation of the D2D (Device-to-Device) communication model, by developing several D2D communication routines within a LTE-A cellular network structure, using existing simulators, namely, simulator of system in JAVA and simulator of link in MatLab, in order to analyze the possible increase of capacity of D2D communication for cellular network.

Typically, D2D communications allow users located in close proximity to communicate directly without the intervention of the base station (BS - Base Station). This communication can allow very high binary rates, low delays and energy savings.

In this dissertation, the existing cellular system simulator was modified to include D2D communications and their interference, and the results obtained were presented.

Simulation results have confirmed what was expected, namely, increasing bit rate with D2D communications and lower delays.

Keywords:

Device-to-Device (D2D), Interference in mobile communications, 5G.

Interferência em Comunicações D2D

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de tabelas	xv
Lista de Software.....	xvii
Lista de acrónimos	xix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Enquadramento	3
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Estrutura da dissertação	6
Capítulo 2	7
Comunicação D2D	7
2.1 Evolução das gerações de telecomunicações em ligação com a comunicação D2D	7
2.2 Tecnologias D2D existentes fora da banda.....	10
2.3 Comunicação Device-to-Device D2D	13
2.3.1 Classificação de Comunicações D2D	16
2.3.1.1 Comunicação D2D dentro da banda (In-band).....	16
2.3.1.2 Comunicação D2D fora da banda (Out-band).....	19
2.3.2 Descoberta do Dispositivo	21
2.3.3 Modo de seleção ideal para comunicação	22
2.3.4 Gestão de Recursos Rádio.....	23
2.3.5 Arquitetura de rede LTE-A ajustada a D2D.....	25
Capítulo 3	29

Interferência em Comunicações D2D	29
3.1 Interferência	29
3.2 Interferência em Comunicação D2D	30
3.2.1 Classificação de Interferências em D2D	31
3.2.1 Técnicas de gestão de interferência em comunicação D2D	33
3.2.1.1 Técnica de Controlo de Potência em D2D	33
3.2.1.2 Técnica de Alocação de Recursos Rádio em D2D	35
3.2.1.3 Técnica de junção de Controlo de Potência e Alocação de Recursos Rádio	36
3.2.1.4 Técnica de Divisão de Espectro.....	37
3.2.1.5 Técnica de MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)	38
Capítulo 4	41
Descrição e Especificação dos Cenários	41
4.1 Implementação em Java	41
4.1.1 Modelo de comunicação D2D	42
4.1.2 Mitigação de Interferência	42
4.1.3 Perdas de Propagação.....	43
4.1.4 Topologia D2D.....	44
4.2 Resultados das simulações	47
4.2.1 Cenário 1	49
4.2.2 Cenário 2	53
4.2.3 Cenário 3	56
4.2.4 Cenário 4	59
4.2.5 Cenário 5	62
Capítulo 5	67
Conclusões	67
5.1 Sumário dos Resultados	67
5.2 Trabalho Futuro	70
Bibliografia	71

Lista de Figuras

Figura 1 – Dados de tráfego esperados a nível global [2].	2
Figura 2 - Comunicação D2D como integrado com a rede LTE-A [1].	4
Figura 3 - Gerações de comunicação sem fio [8].	10
Figura 4 - Ilustração de uma possível comunicação D2D [5].	14
Figura 5 - Classificação de Comunicações D2D	16
Figura 6 - Múltiplas ligações celulares e D2D utilizando diferentes formas de comunicações D2D dentro da banda [1].	18
Figura 7 - Esquematização de espectro de banda de frequência da comunicação D2D em redes celulares.	20
Figura 8 - Arquitetura de rede LTE-A ajustada a D2D.	26
Figura 9– Interferência	30
Figura 10 - Classificação de Interferência em Comunicação D2D	31
Figura 11 - Técnica de controlo de potência em D2D.	34
Figura 12 - Ilustração de D2DTx nas fronteiras de eNB central.	45
Figura 13 - Ilustração dos D2DRXna proximidade dos D2DTX.	46
Figura 14 - Ilustração da topologia para o cenário 1.	50
Figura 15 – CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 1.	51
Figura 16 - CDF de Geometria em função SINR[dB]utilizando RR em D2D para o Cenário 1.	51
Figura 17 - Throughput médio utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 1.	51
Figura 18 - Throughput médio utilizando RR em D2D para o Cenário 1.	51
Figura 19 - CDF de Throughput utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 1.	52
Figura 20 - CDF de Throughput utilizando RR em D2D para o Cenário 1.	52
Figura 21- Ilustração da topologia para o cenário 2.	53
Figura 22 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 2.	54

Interferência em Comunicações D2D

Figura 23 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando RR em D2D para o Cenário 2.	54
Figura 24 - Média de Throughput utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 2.	54
Figura 25 - Média de Throughput utilizando RR em D2D para o Cenário 2.	54
Figura 26 - CDF de Throughput utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 2.	55
Figura 27 - CDF de Throughput utilizando RR em D2D para o Cenário 2.	55
Figura 28 - Ilustração da topologia para o cenário 3.	56
Figura 29 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 3.	57
Figura 30 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando RR em D2D para o Cenário 3.	57
Figura 31 - Throughput médio utilizando Max CI em D2D para o Cenário 3.	57
Figura 32 - Throughput médio utilizando RR em D2D para o Cenário 3.	57
Figura 33 - CDF de Throughput utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 3.	58
Figura 34 - CDF de Throughput utilizando RR em D2D para o Cenário 3.	58
Figura 35 - Ilustração da topologia para o cenário 4.	59
Figura 36 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 4.	60
Figura 37 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando RR em D2D para o Cenário 4.	60
Figura 38 - Throughput médio utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 4.	60
Figura 39 - Throughput médio utilizando RR em D2D para o Cenário 3.	60
Figura 40 - CDF de Throughput utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 4.	61
Figura 41- CDF de Throughput utilizando RR em D2D para o Cenário 4.	61
Figura 42 - Percentagem de CQI's Transmitidos em DL e D2D	63
Figura 43 - CDF de Geometria versus SINR para cenários 5 e 2.	64
Figura 44 - Throughput médio versus tempo para os cenários 5 e 2.	64
Figura 45 - CDF de Throughput para os cenários 5 e 2.	66

Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação de técnicas de transmissão sem fio de curto alcance.....	15
Tabela 2 - Análise comparativa dos modos de comunicação D2D	20
Tabela 3 - Comparação entre os modos de alocação de recursos.....	25
Tabela 4 - Parâmetros de simulação para o cenário 1.	49
Tabela 5 - Parâmetros de simulação para o cenário 2.	53
Tabela 6 - Parâmetros de simulação para o cenário 3.	56
Tabela 7 - Parâmetros de simulação para o cenário 4.	59
Tabela 9 - CQIs para os diferentes esquemas de modulação e codificação	62

Lista de Software

Eclipse	Ambiente de Desenvolvimento Integrado a Java
JAVA	Linguagem de programação
MATLAB	Ferramenta computacional de simulação e matemática
Microsoft Excel	Ferramenta de cálculo
Microsoft Word	Editor de texto

Interferência em Comunicações D2D

Lista de acrónimos

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
AMPS	Analog Mobile Phone Service
BDMA	Beam Division Multiple Access
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CRNs	Cognitive Radio Networks
CSI	Channel State Information
CUs	Cellular Users
D2D	Device-to-Device
DVB	Digital Video Broadcasting
EDGE	Enhanced Data Rate for GSM Evolution
eNB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
EVDO	Evolution-Data Optimized
FBMC	Filter Bank Multi Carrier
FDM	Frequency Division Multiplexing
FH-CDMA	Frequency Hopping - Code-Division Multiple Access
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile
HSDPA	Downlink Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink

Interferência em Comunicações D2D

IoT	Internet-of-Things
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
ISM	Industrial Scientific and Medical
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Messaging Service
NFC	Near Field Communication
NGNs	Next Generation Networks
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
ProSe	Proximity Services
QoS	Quality of Service
RBs	Resource Blocks
Rx	Receiver
SC-FDMA	Single Carrier Frequency-Division Multiple Access
SINR	Signal-to-Interference Plus-Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SMS	Short Message Service
TTI	Transmission Time Interval.
Tx	Transmitter
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UWB	Ultra Wide Bandwidth
VLC	Visible light communication
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WLAN	Wireless Personal Area Network
WPA	Wi-Fi Protected Access
WPA2	Wi-Fi Protected Access II

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo faz a introdução da dissertação, no qual se apresenta a motivação o enquadramento e os objetivos da dissertação com algumas questões de investigação e no fim será descrita a estrutura da dissertação.

1.1 Motivação

Com a evolução das tecnologias de comunicação móvel, especificamente os sistemas UMTS¹ e LTE-A², registou-se um crescimento drástico dos dispositivos móveis (smartphone, tablet PC, etc.) concebidas com várias aplicações móveis que fornecem numerosos serviços em multimédia, Vídeos sobre IP, jogos on-line, *Internet Protocol Television* (IPTV), etc., proporcionando um aumento de tráfego de dados. Nas redes celulares sendo um dos principais sistemas de acesso à Internet, para a maioria dos clientes, devido à sua disponibilidade generalizada, resulta um aumento do tráfego de dados em tempo real e não só. Assim, o tráfego de dados móveis de hoje consome muita largura de banda dentro da rede celular [1].

De acordo com o recente relatório [2], prevê-se que o tráfego global de dados móveis deverá crescer para 49 exabytes por mês até 2021, um aumento de sete vezes em relação a 2016. Conforme podemos ver na figura 1 o tráfego de dados móveis crescerá na ordem de 47% de 2016 a 2021.

¹*Universal Mobile Telecommunication System*, é uma tecnologia de terceira geração de rede celular.

²*Long Term Evolution Advanced*, é uma tecnologia de quarta geração de rede celular.

Interferência em Comunicações D2D

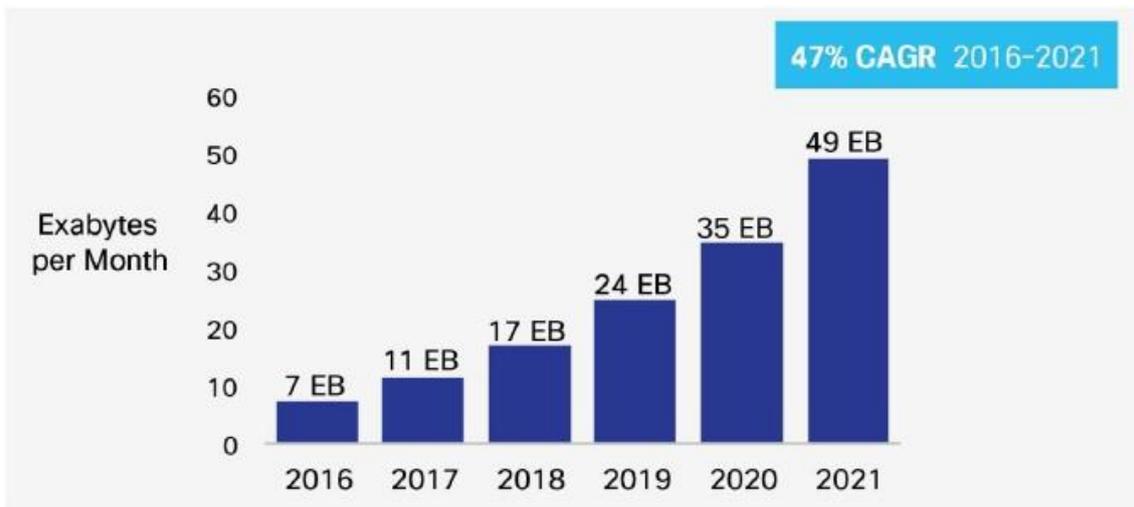


Figura 1 – Dados de tráfego esperados a nível global [2].

Assim sendo, para aliviar o tráfego incontrolável, aumentar a taxa de dados, diminuir o período de latência e melhorar a flexibilidade do serviço local, levou-se à realização de estudos sobre a rede da próxima geração (*NGNs - Next Generation Networks*), a quinta geração de comunicações celulares (5G), a qual irá diferenciar-se com a introdução de um novo modelo de comunicação entre os dispositivos, a comunicação *Device-to-Device* (D2D).

Esta nova técnica de comunicação é vista como uma solução promissora, que deverá funcionar, quer dentro da área de cobertura (dentro da banda) do eNB existente e sob o mesmo espectro celular ou espectro separado (fora de banda), podendo assim garantir um serviço uniforme fornecendo qualidade de serviço (QoS).

Contudo, a transmissão D2D irradia em todas as direções, gerando interferência indesejável para utilizadores celulares e outros utilizadores D2D que compartilham os mesmos recursos de rádio resultando na degradação de desempenho. Os esquemas eficientes de mitigação de interferências são um requisito principal para otimizar o desempenho do sistema.

Por esse motivo, nesta dissertação um dos focos será a exploração da comunicação D2D no sentido de analisar as interferências causadas devido à introdução da comunicação D2D no sistema celular.

1.2 Enquadramento

Tradicionalmente na rede celular, toda a transmissão de dados atravessa a estação de base (*BS – Base Station*), ou seja, os pacotes de dados são primeiro entregues para estações de base através do percurso ascendente e depois encaminhados para os destinatários via ligação descendente. No entanto, este tráfego gera sobrecarga significativa para a BS, uma vez que fornece serviços e sinalização a vários utilizadores [1].

Com a implementação da comunicação D2D, a transmissão de dados passará a ser efetuada numa ligação direta entre dois dispositivos que estão na proximidade. Desta forma, reduz-se a sobrecarga nas BS, proporcionando-lhe mais capacidade de servir outros dispositivos que não estão em estreita proximidade, o que facilita o congestionamento da rede e o aumento da capacidade da rede.

A comunicação D2D está prevista como parte de importação de futuras aplicações em 5G e *Internet-of-Things* (IoT) [1], [3], [4].

Tipicamente, a gestão de interferências é uma questão-chave para as comunicações D2D integradas nos sistemas celulares de forma a permitir a viabilidade das comunicações. No entanto, para que os dois dispositivos funcionem em modo D2D, devem satisfazer condições necessárias. Estas condições não implicam apenas a proximidades dos dispositivos, como também uma boa condição do canal, um SINR dentro do limite pré-definido, taxa de transferência média, baixo atraso.

A comunicação D2D está atualmente especificada pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) na *Release 12* da rede LTE-A e também reconhecido como um dos componentes das futuras tecnologias de redes sem fio (5G) [5].

O grupo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) propôs o LTE-A um padrão que é uma versão melhorada do LTE, que visa suportar a taxa máxima de dados na ordem de 1Gbps/500Mbps (download/upload). Para atingir essa performance, a LTE-A foi especificada para integrar múltiplas antenas e agregação de operadoras, para fornecer maior capacidade de canal, a comunicação de Dispositivo a Dispositivo (D2D), etc.

Interferência em Comunicações D2D

Os serviços de proximidade (*ProSe - Proximity Services*) serão normalizados pelo 3GPP estando direcionados à descoberta de proximidade e comunicação direta e fazem parte da release 12 do LTE [5].

Os dispositivos LTE habilitados para comunicação D2D também poderão tornar-se competitivos para segurança na comunicação pública, no sentido em que deverão funcionarem comunicação direta entre os dispositivos mesmo quando as redes celulares estejam indisponíveis, no caso de haver desastres ou falhas da rede.

Na Figura 2 é ilustrada um exemplo simplificado da comunicação D2D inserida na tradicional comunicação celular. Neste exemplo temos como nomenclatura $D2D_{TX}$ que representa o transmissor D2D e o $D2D_{RX}$ o recetor D2D, embora ambos ($D2D_{TX}$ e $D2D_{RX}$) sejam dispositivos emissores-recetores que operam em modo half duplex, mas por simplicidade, o dispositivo que inicia a transmissão de dados é referido como $D2D_{TX}$, enquanto que o dispositivo recetor é designado por $D2D_{RX}$. Nelas podemos observar que estão na proximidade um do outro, utilizando a ligação direta entre eles, sem intervenção do eNB. Na comunicação celular, os terminais são referidos como CUE. Nesta ligação o tráfego é passado primeiramente pela eNB só depois para o terminal destinatário, não havendo a comunicação direta entre os terminais.

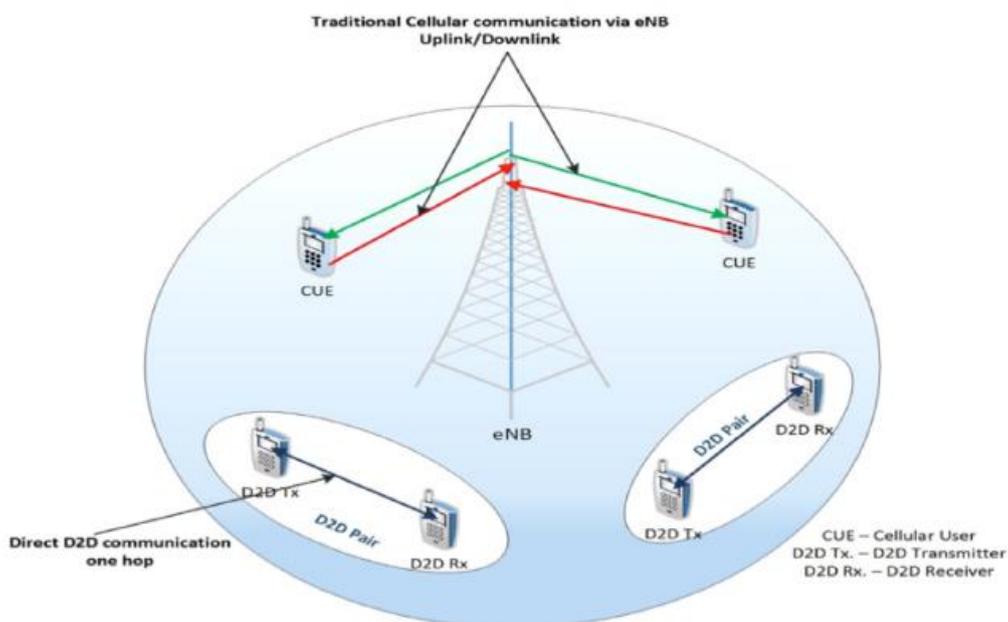


Figura 2 - Comunicação D2D integrada na rede LTE-A [1].

1.3 Objetivos

Questiona-se se a comunicação D2D deverá ser uma componente essencial na próxima geração de comunicações celulares, a Quinta Geração (5G). Porém, para que isso seja possível será necessário a realização de vários estudos, em relação aos diferentes aspectos das comunicações D2D incluindo protocolos de radio inteligentes, topologias de rede eficientes do ponto de vista de energia e estratégias de desenvolvimento.

Deste modo, o objetivo desta dissertação é não só estudar as comunicações D2D que se pensa virem a ser uma componente essencial na Quinta Geração de Comunicações Celulares (5G), como também fazer um estudo das interferências na comunicação D2D.

Do ponto de vista prático, vão ser desenvolvidas várias rotinas da comunicação D2D dentro da estrutura de rede celular LTE-A, baseando-se nos simuladores já existentes e já desenvolvidos anteriormente, nomeadamente, simuladores de sistema em JAVA e simulador de ligação em MatLab.

No final da dissertação pretende obter-se as respostas para as seguintes questões:

1. Será que com a comunicação D2D os terminais irão ter ritmos binários mais elevados e atrasos mais baixos?
2. Qual é o potencial ganho para as comunicações celulares com a comunicação D2D?
3. Com introdução da comunicação D2D na rede celular e a interferência causada pela D2D continua a ser benéfico para a rede celular?

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está composta por cinco capítulos, o primeiro capítulo é a introdução ao tema, o segundo e terceiro são a contextualização como estudo da arte, o quarto é descrito como a pormenorização de vários cenários e a respetiva avaliação. Por fim, o quinto capítulo permite retirar as eventuais conclusões.

O segundo capítulo, contem toda a contextualização da comunicação *device to device*, mas antes é apresentado de forma muito abreviada a evolução de sistema de telecomunicações móveis, desde a primeira geração até ao momento.

O capítulo seguinte é dedicado à descrição das interferências, apresentando-se todas as possíveis interferências que possam existir na comunicação D2D na integração com sistema celular tradicional, e por fim apresentam-se as possíveis técnicas de mitigar a interferência na comunicação.

Quanto o quarto capítulo, este descreve toda a implementação e avaliação desenvolvida nos simuladores com vários cenários que permitem observar o potencial da comunicação D2D dentro rede celular.

Por fim, no quinto capítulo obtém-se as eventuais conclusões com base nos estudos realizados e com os resultados obtidos na dissertação, assim como trabalhos futuros que poderão ser realizados.

Capítulo 2

Comunicação D2D

Neste capítulo começa-se por introduzir uma breve visão geral das gerações telecomunicações em conexão com a comunicação D2D e as tecnologias D2D existentes fora de banda. Por fim, são descritos todos os estudos teóricos realizados na comunicação D2D.

2.1 Evolução das gerações de telecomunicações em ligação com a comunicação D2D

As gerações de redes sem fio evoluíram da primeira geração (1G) para a quinta geração (5G) do qual se fala atualmente. Inicialmente, ocorreu apenas a transmissão analógica de dados. Em seguida, houve uma mudança para a transmissão de dados digitais.

A seguir será apresentado uma breve visão geral das gerações em ligação com a comunicação D2D.

❖ Primeira Geração (1G)

Na década de 1980 foi introduzida a primeira geração de sistemas de comunicação móvel e suportava taxas de dados até 2,8 Kbps. Estes sistemas apenas permitiam a comunicação por voz. Essa geração usou apenas a tecnologia de multiplexagem por divisão na frequência *Frequency Division Multiplexing* (FDM) e utilizava sinais analógicos. A norma mais importante era conhecida por *Analog Mobile Phone Service* (AMPS) [6].

Estas redes eram inseguras e exigiam um grande consumo de energia. Além disso, a qualidade das chamadas era muito baixa, e devido ao menor número de assinantes durante esta geração a necessidade de transmissão direta nunca foi sentida [6].

❖ Segunda Geração (2G)

Esta geração de tecnologia de comunicação móvel, distinguiu-se pela utilização de sinais digitais, ela surgiu no final da década de 1980. O primeiro sistema de (2G) foi o sistema global para comunicação móvel (*Global System for Mobile - GSM*), suportava uma taxa de dados máxima até 64kbps. Outras tecnologias incluídas são o acesso múltiplo por divisão de código (*Code Division Multiple Access - CDMA*) e IS-95. Forneceu os serviços como email e serviço de mensagens curtas (*short message service - SMS*) [6]. Essas redes são mais seguras contra a espionagem, em comparação com a rede 1G.

Esta geração não conseguiu lidar com dados mais complexos, como vídeos. Entre 2G e 3G situou-se outra evolução, a 2.5G. Esta suportava dados até 200kbps. As tecnologias incluíram o serviço geral de rádio por pacotes (*General Packet Radio Service - GPRS*) e a taxa de dados melhorada para evolução de GSM (*Enhanced Data Rate for GSM Evolution - EDGE*). Nenhuma comunicação direta foi usada na comunicação sem fio neste período [6].

❖ Terceira Geração (3G)

Este sistema chegou no final de 2000, com serviços de suporte de voz aprimorada que ajudam a manter uma melhor qualidade de serviço (*Quality of Service - QoS*). As taxas de dados suportadas pelas redes (3G) vão até 2Mbps. As tecnologias suportadas pela 3G incluem *Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)*, designada por sistema UMTS e CDMA.

Tecnologias como *Evolution-Data Optimized (EVDO)*, *High Speed Uplink/Downlink Packet Access (HSUPA/HSDPA)* fazem parte de 3.5G e fornecem taxas de dados aumentadas em comparação com 3G. Embora o 3G seja mais vantajoso do que o 2G, ele requer mais energia que as redes 2G e é mais caro do que 2G em termos dos planos que oferece.

Nesta geração, WLAN e Bluetooth ganharam popularidade e permitiram a comunicação direta entre dispositivos. Essas técnicas funcionam em bandas não licenciadas, como na banda industrial, científica e médica (ISM), não atendendo aos requisitos da qualidade de serviço (QoS) da rede de forma eficiente [6].

Interferência em Comunicações D2D

A banda licenciada é mais capaz de lidar com a questão da interferência, atendendo assim às necessidades de QoS das redes celulares. Como resultado, a gestão de interferências é possível com a ajuda de uma entidade de controlo central na rede (a estação base), com a comunicação D2D subjacente à comunicação celular.

Assim, a comunicação D2D em redes celulares foi introduzida nas próximas gerações.

❖ Quarta Geração (4G)

Esta geração fornece o incremento das taxas de dados, no sistema completamente baseado no protocolo de internet (*internet protocol – IP*).

Os aplicativos suportados pelas redes 4G incluem *Multimedia Messaging Service (MMS)*, o *Digital Video Broadcasting(DVB)*, a HDTV, video chamadas, etc. As tecnologias incluem LTE-A e *Interoperability for Microwave Access (WiMAX)*. Só com o LTE-A *release 12*, foi introduzida a comunicação D2D em redes celulares [6].

❖ Quinta Geração (5G)

A quinta geração (5G) de comunicação sem fio é a rede da próxima geração, afim de satisfazer as crescentes demandas dos assinantes para maiores taxas de dados e suportar inúmeras aplicações.

Ela inclui várias tecnologias aperfeiçoadas, como *Beam Division Multiple Access (BDMA)* ou *Filter Bank Multi Carrier(FBMC)*.5G é o resultado de uma agregação de inúmeras tecnologias como, *mmWave communication*, *Massive MIMO*, *Cognitive Radio Networks (CRNs)*, *Visible Light Communication (VLC)*.

As quatro primeiras gerações foram completamente dependentes da estação base (BS), assim denominada rede centralizada. Mas o 5G está indo em direção à abordagem centrada em dispositivos, ou seja, configuração de rede e gestão pelos próprios dispositivos [7].

A comunicação D2D está sendo considerada como um componente essencial das redes 5G [6]. Espera-se que resulte em uma capacidade aumentada do sistema, maior eficiência espectral, melhor rendimento e latência reduzida.

Na figura 3 apresenta-se uma visão geral da evolução da comunicação de redes sem fio e dos serviços por eles suportados.

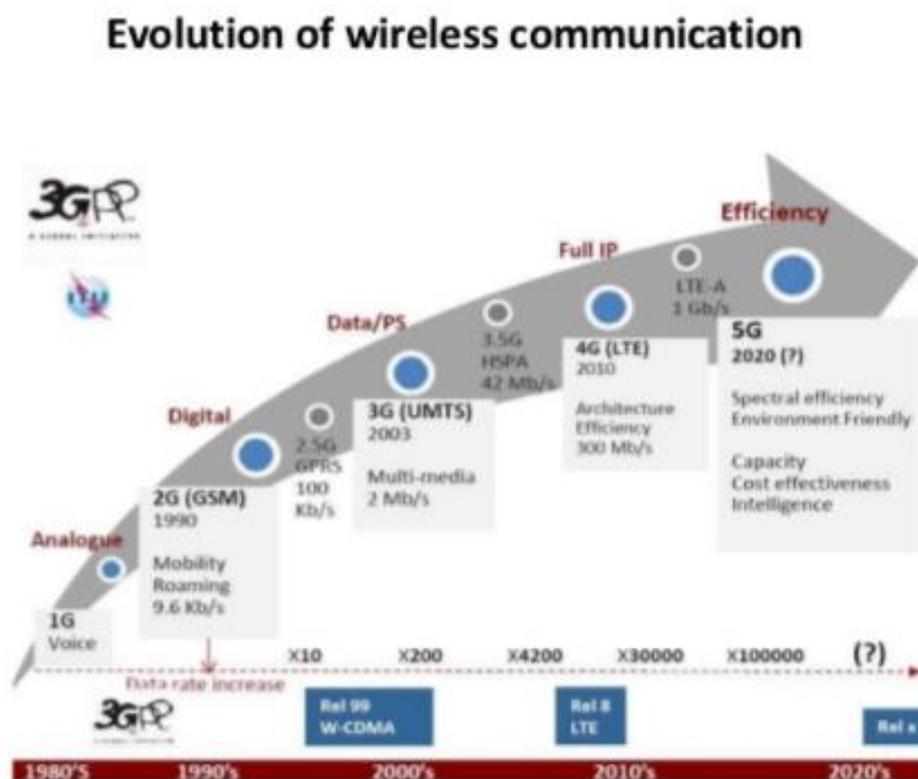


Figura 3 - Gerações de comunicação sem fio [8].

2.2 Tecnologias D2D existentes fora da banda

Com base na perspectiva de aplicações de transmissão D2D sem fio em áreas pessoais, públicas e industriais, foram desenvolvidas muitas tecnologias competitivas de D2D fora de banda. Segue abaixo uma breve descrição dos vários padrões D2D mais conhecidos nos dispositivos móveis.

❖ Bluetooth

O Bluetooth é uma tecnologia de rede sem fio na área pessoal (*Wireless Personal Area Network – WPAN*) de baixo consumo de energia que permite a transmissão de dados entre dispositivos na proximidade.

Bluetooth surgiu em meados de 1994, desenvolvida pela companhia Ericsson, no qual se estudou a viabilidade de desenvolver uma tecnologia que permitisse a comunicação entre dispositivos (telemóveis celulares, computadores, teclados, ratos, etc..) de curto alcance, em vez dos cabos de dados [9].

A transmissão de dados é feita por meio de radiofrequência, permitindo que os dispositivos comuniquem independente das suas posições, sendo apenas necessário que ambos estejam dentro do limite de proximidade, podendo variar de acordo com a classe implementada (o alcance máximo até 100m) [10].

A tecnologia Bluetooth fez a adoção de uma frequência de rádio aberta, utilizado a faixa ISM (*Industrial Scientific and Medical*) que opera numa banda de frequência não licenciada de 2,4 GHz a 2,485 GHz usando espalhamento espectral.

Deste modo é necessário garantir que o sinal Bluetooth não sofra e nem cause excessiva interferência. Utiliza FH-CDMA (*Frequency Hopping—Code-Division Multiple Access*) de forma que permite a proteção dos dados, fazendo a frequência ser dividida em vários canais. Essa mudança de canal é chamada de salto na frequência (*Frequency Hopping*) e permite que a largura de banda da frequência seja muito pequena. A comunicação via Bluetooth pode ser feita no modo *full-duplex*. [10].

❖ NFC

A NFC (*Near Field Communication*) é uma tecnologia que permite estabelecer uma comunicação sem fio entre os dispositivos num curto alcance, geralmente não mais 10cm [10]. Estes dispositivos podem ser telefones celulares, tablets, cartões de bilhetes eletrônicos e qualquer outro dispositivo que tenha a comunicação NFC.

A NFC usa indução magnética entre duas antenas localizadas na proximidade, formando efetivamente um transformador de núcleo de ar.

Interferência em Comunicações D2D

Um dispositivo com NFC pode funcionar como um documento de identidade ou ser usado para fazer um pagamento.

Embora o NFC se torne um padrão popular para a conexão D2D nos smartphones, devido ao seu curto alcance, não é adequado para a maioria das aplicações móveis D2D[10].

❖ Wi-Fi Direct

O Wi-Fi Direct é uma tecnologia que permite estabelecer uma comunicação sem fio entre os dispositivos com linha de vista e suportar tarefas que não precisam de se ligar à internet.

Vamos supor que temos um smartphone e uma impressora que possuem esse sistema e queremos imprimir um documento, podemos simplesmente enviar o documento a partir do smartphone via wireless para a impressora, sem precisar de uso da internet ou de cabo.

Wi-Fi Direct é semelhante ao Bluetooth no sentido que permitem descobrir todos os dispositivos que possuem a tecnologia nas suas proximidades, mas a diferença é que a tecnologia Wi-Fi Direct é muito mais rápida e segura, face aos níveis de encriptação de dados que são suportadas pelas interfaces wireless, como WPA (*Wi-Fi Protected Access*) e WPA2 (*Wi-Fi Protected Access II*) [11].

2.3 Comunicação Device-to-Device D2D

O conceito da comunicação entre dispositivos já existe há algum tempo, mas sendo aplicado apenas em tecnologias que utilizam espectro de bandas de frequência não licenciadas, e.g. tecnologia WiFi Direct, Bluetooth e *Ultra Wide Bandwidth (UWB)*. Porém, tratando-se de tecnologias sem licenças a taxa de interferências é elevada prejudicando o desempenho da rede.

A comunicação *Device-to-Device (D2D)* na rede celular consiste numa tecnologia de acesso por rádio que proporciona aos utilizadores na proximidade a possibilidade de comunicarem diretamente, ao invés de transmitir e receber sinais através de uma estação base celular [12].

As comunicações D2D usam o espectro dos operadores celulares e prometem vários tipos de ganhos.

1. Otimização do nível de potência, a proximidade do terminal pode permitir ritmos binários muito elevados, baixos atrasos e baixo consumo de energia, uma vez que existem uma pequena distancia entre os terminais móveis, os mesmos utilizam menos potência de transmissão quando comunicam entre si.
2. Ganho do reuso de frequência, onde os mesmos recursos são simultaneamente usados pelos sistemas celulares e pelas ligações D2D incluindo o reuso 1. Isso suporta a reutilização do espectro, melhorando assim a relação de reutilização do espectro. [6].
3. Ganho de um salto na ligação D2D, que se refere ao uso de uma só ligação em vez dos recursos de uplink e de downlink ao comunicar via ponto de acesso (BS) no modo celular [5]. Como os utilizadores comunicam diretamente uns com os outros na comunicação D2D, a latência é bastante reduzida. Estes são aspetos desejáveis na rede celular e os operadores de redes móveis são beneficiados por esses aspetos da comunicação D2D.[6].
4. Área de cobertura, a comunicação D2D é possível efetuar a retransmissão, isso permite um aumento na área de cobertura.[6].

❖ Cenários em Comunicação D2D

Na figura 4 ilustra-se o conceito de comunicação D2D. A partir da figura podemos verificar que além do padrão da comunicação de estação de base também referida como eNB (evolved NodeB), temos também a comunicação direta entre os terminais (UserEquipment - UE) na proximidade permitindo assim a comunicação D2D. Isso é possível devido a proximidade física dos equipamentos.

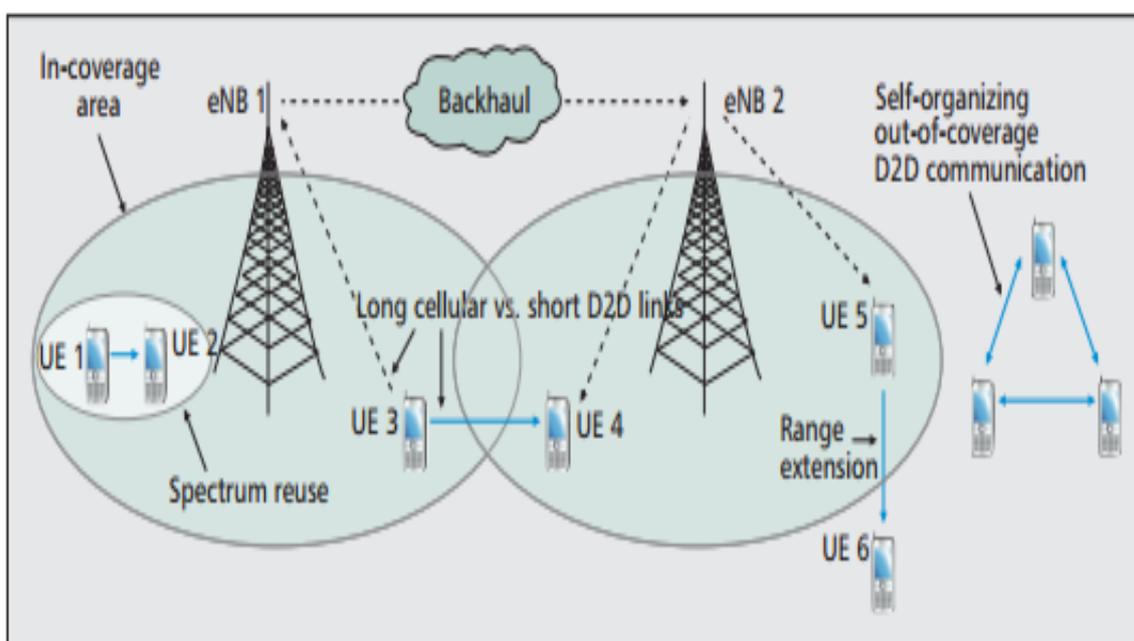


Figura 4 - Ilustração de uma possível comunicação D2D [5].

Através da figura 4, podemos visualizar vários cenários que acontecem na comunicação D2D, por exemplo:

- **Na mesma célula** - os terminais UE1 e UE2 encontram-se localizado na mesma célula, e nesta situação devido à curta distancia entre eles podem comunicar diretamente sem recorrer ao uso da estação de base, o que torna benéfico para os terminais, no sentido da redução no consumo de energia porque necessitam de transmitir menos potência, contribuindo assim para melhorar a eficiência energética.

Interferência em Comunicações D2D

- **Células diferentes** - no caso dos terminais UE3 e UE4 estão posicionados em células diferentes, mas havendo curta distancia entre os terminais, podem efetuar a comunicação direta, reduzindo o congestionamento e, assim beneficia-se outros UEs que não estejam a efetuar a comunicação D2D.
- **Fora de cobertura celular**- temos um outro cenário em que os dispositivos estão fora das coberturas de estações bases, mas, no entanto, podem efetuar a comunicação direta devido à proximidade entre eles.

Em semelhança com as técnicas de transmissão sem fio de curto alcance, já existentes (WiFi Direct, Bluetooth e *Ultra Wide Bandwidth – UWB, etc...*), as comunicações D2D também possuem atrasos de transmissão. Porém, as comunicações D2D utilizam as bandas de espectro licenciadas, garantindo a qualidade do serviço (QoS). Além disso, as comunicações D2D podem diminuir o tráfego e evitar o congestionamento na rede celular. A comunicação D2D é considerada como uma solução económica para o serviço de segurança pública no caso de falta de cobertura de rede no 3GPP LTE-Advanced [13].

Para entender melhor a diferença entre as comunicações D2D e algumas técnicas existentes de transmissão de curto alcance, as suas principais características são apresentadas na tabela1 [13][9].

Características	D2D	WiFi Direct	Bluetooth 4.0	NFC
Espectro	Licenciada & Não Licenciada	Não Licenciada	Não Licenciada	Não Licenciada
Controlo de Interferência	Sim	Não	Não	Não
QoS	Sim	Não	Não	Não
Normalização	3GPP LTE-Advanced	802.11	Bluetooth SIG	ISO 13157
Distância Máxima de Transmissão	10-1000 m	200 m	10 -100m	0.10 m
Taxa Máxima de Dados	1 Gb/s	250 Mb/s	24 Mb/s	424 Kb/s
Emparelhamento	Coordenação de BS ou Dispositivo	Requer que o utilizador define a configuração do ponto de acesso	Emparelhamento Manual	Identificação de Radio Frequência

Tabela 1 - Comparação de técnicas de transmissão sem fio de curto alcance.

2.3.1 Classificação de Comunicações D2D

Podemos considerar que existem dois tipos de comunicação D2D, nomeadamente, *In-band* (dentro da banda) e *Out-band* (fora da banda), e o que mais os diferencia é o espectro de frequência no qual a comunicação D2D está a operar [14], ou seja, dentro da banda utiliza-se o espectro licenciado e fora da banda utiliza-se espectro não licenciado [14]. Conforme podemos verificar na figura 5, o diagrama que classifica a comunicação D2D e as suas subclasses.

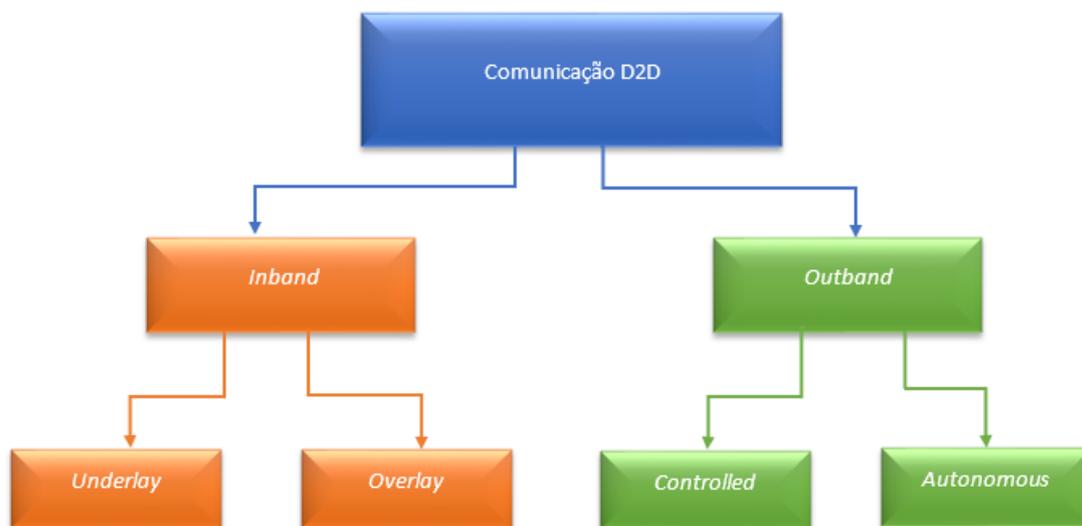


Figura 5 - Classificação de Comunicações D2D

2.3.1.1 Comunicação D2D dentro da banda (*In-band*)

Na comunicação D2D *In-band*, o espectro celular é partilhado numa banda licenciada juntamente com outros utilizadores de rede celular. A eNB é responsável pela deteção das potências de dispositivos D2D, estabelecimento de ligação baseadas em informações de estado do canal, alocação de recursos de rádio uplink ou downlink, controlo de energia baseado em algum limite pré-definido, bem como a coordenação de interferência entre os utilizadores celulares e utilizadores D2D [1].

A comunicação D2D em *In-band* é categorizada como *underlay* e *overlay*.

❖ *Underlay (non_orthogonal) in-Band*

No *underlay in-band*, os utilizadores D2D e os utilizadores celulares são alocados no mesmo recurso de rádio em simultâneo pelo eNB. O eNB reutiliza os blocos de recursos de ligação ascendente ou descendente para a comunicação D2D com base em determinadas métricas de desempenho, tais como distância mútua entre D2D e utilizadores celulares, nível de potência de transmissão, área limitada de interferência, etc. Este tipo de implementação também é conhecido como o modo de reutilização de partilha de recursos não ortogonais.

O modo de reutilização pode alcançar uma maior eficiência de espectro em comparação com a *overlay*. No entanto, introduz um grave problema de interferência entre o D2D e os utilizadores celulares, uma vez que ambos os utilizadores estão usando simultaneamente os mesmos blocos de recursos físicos [15]. Como os utilizadores celulares são os principais utilizadores da banda de espectro, a comunicação D2D *underlay* na mesma banda, implica que a QoS da comunicação celular bem como da D2D se torne um desafio [16].

❖ *Overlay (orthogonal) in-Band*

Nesta comunicação uma porção do espectro disponível é dedicada para comunicação D2D e o restante do espectro utilizado para comunicação celular. Por esta razão é eliminada a interferência mútua entre utilizadores celulares e D2D, uma vez que cada modo de comunicação ocupa um recurso físico separado e dedicado para sua comunicação individual [1].

Mas assim, existe interferência mútua entre os usuários do D2D, sendo que vários links D2D podem reutilizar os mesmos recursos para as suas transmissões, o que afeta a taxa de transferência global da rede.

Interferência em Comunicações D2D

A *Overlay* na banda tem uma grande desvantagem da reutilização de recursos de rádio em comparação com o modo *Underlay*. Isso ocorre porque quando não há nenhuma sessão D2D, os recursos dedicados são deixados de parte, o que se traduz em um uso ineficiente do espectro [5].

Portanto, o *underlay* D2D está a ganhar mais popularidade na indústria, bem como na academia devido à sua maior eficiência espectral do que o *overlay* [1].

A Figura 6 ilustra a distribuição aleatória de D2D e utilizadores celulares num cenário de única célula, onde alguns pares de D2D reutilizam os recursos de *uplink* (UL) da (CU - CellularUsers), enquanto outros usam recursos que não possuem sobreposição, para a comunicação D2D e também em que canal é dedicado apenas a comunicação D2D.

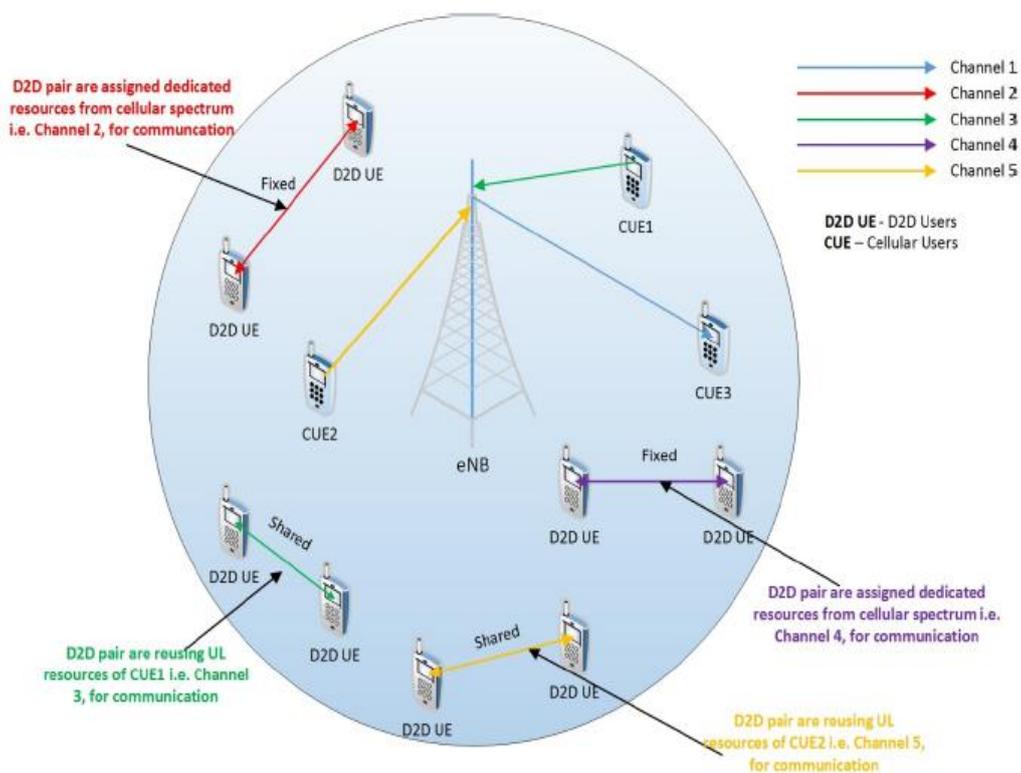


Figura 6 - Múltiplas ligações celulares e D2D utilizando diferentes formas de comunicações D2D dentro da banda [1].

2.3.1.2 Comunicação D2D fora da banda (Out-band)

A comunicação D2D em Out-band explora a banda de frequência não licenciada para efetuar a comunicação direta, sendo classificado como *controlled* (controlado) e *autonomous* (autônomo), é semelhante à banda utilizada pelas tecnologias e.g. Bluetooth, Wi-Fi Direct.

Quando controladas (*controlled*) a gestão das ligações podem ser feitas pela eNB, enquanto que em modo de autonomia (*autonomous*) são coordenadas pelos próprios equipamentos de utilizadores (UEs) [6].

A principal vantagem desta última categoria de comunicação D2D é que elimina o problema de interferência entre a ligação celular e D2D.

No entanto, a maior desvantagem é a sua incontrolável interferência entre sistemas, devido à presença de outras entidades de comunicação, como por exemplo, Wi-Fi e dispositivos Bluetooth que operam na mesma banda não licenciada.

Deste modo, a partilha de espectro na banda não licenciada pode conduzir a um ambiente não controlável, produzindo congestionamento e também afetar o *throughput* global da rede. Por estas e outras razões relacionadas, os operadores móveis (e a investigação publicada) focam-se principalmente na comunicação *In-band* [1].

A figura 7 ilustra a ocupação das bandas de frequência da comunicação D2D em redes celulares.

Interferência em Comunicações D2D



Figura 7 - Esquematização de espectro de banda de frequência da comunicação D2D em redes celulares

Critério	Comunicação D2D			
	Inband		Outband	
	Overlay	Underlay	Controlled	Autonomous
Eficiência Espectral	Médio	Muito Alto	Baixo	Baixo
Eficiência de Energia	Alta	Alta	Baixa	Baixa
Interferência entre Utilizadores Celular e D2D	Muito Baixa	Alta	Insignificante	Insignificante
Interferência entre os pares D2D	Média	Média	Alta	Alta
Controlo de Interferência	Sim	Sim	Não	Não
Sobrecarga de Sinalização Extra para Rede	Média	Alta	Alta	Muito Baixa
Controlo de Rede	Total/Híbrida	Total/Híbrida	Total	Livre

Tabela 2 - Análise comparativa dos modos de comunicação D2D

2.3.2 Descoberta do Dispositivo

Na comunicação D2D, o primeiro passo para iniciar uma comunicação direta, consiste na descoberta dos dispositivos na proximidade, no qual os dois dispositivos devem estar conscientes um do outro antes deles poderem comunicar diretamente.

Segundo [17] o processo do descobrimento dos dispositivos tem duas perspetivas, a do utilizador e a da rede.

❖ Perspetiva do utilizador

Na perspetiva do utilizador, pode ser classificada de forma restrita ou aberta.

Na descoberta restrita, a deteção do terminal (UE) só é permitida com a sua autorização, o que significa que o utilizador não será confrontado com o serviço ou pessoas desconhecidas, o que permite ao utilizador obter maior privacidade. É adequado para aplicações de redes sociais, e.g. quando uma aplicação questiona se determinado conteúdo pode ser só partilhado com amigos ou também com o público em geral.

Para a descoberta aberta, o UE pode ser detetado enquanto estiver na proximidade de outro dispositivo, reduzindo assim a complexidade de deteção. É adequada para redes de segurança pública, no sentido em que se houver uma catástrofe natural, a cobertura das redes tradicionais pode não estar disponível e com uso da descoberta aberta poderá ser possível efetuar a comunicação.

❖ Perspetiva da rede

Na perspetiva da rede, a descoberta de outro dispositivo na proximidade, pode ser dividida em maior ou menor controlo da estação de base [18]. No caso de maior controlo da estação de base, a BS primeiramente solicita ao utilizador se pretende transmitir a sua sinalização inicial, como, sincronização e a identidade, e em seguida procura o dispositivo próximo. Desta forma, a descoberta de outro utilizador torna-se

rápida e determinada, mas, entretanto, ao mesmo tempo origina uma sobrecarga de sinalização na BS. E para o caso de menor controlo da estação de base, esta transmite apenas periodicamente um conjunto de recursos que podem ser usados para enviar ou receber a sinalização inicial. Os utilizadores que pretendem participar na comunicação D2D, podem enviar ou acolher o sinal inicial dentro desses recursos.

Esta abordagem contribui para uma baixa sobrecarga de sinalização. No entanto, não é tão eficiente como a anterior, sendo que, os dispositivos precisam de aguardar pelos recursos para enviar a sinalização inicial, bem como as respostas dos dispositivos interessados.

2.3.3 Modo de seleção ideal para comunicação

Para que a comunicação D2D seja utilizada em situações apropriadas é necessário haver o modo de seleção ideal para transmissão (i.e., modo celular ou D2D). O modo de seleção significa que a eNB ou os utilizadores D2D optam por operar em modo de comunicação D2D (ligação direta) ou celular (através de eNB), dependendo de algumas métricas de seleção, tais como, perdas de propagação no trajeto, distância entre utilizadores D2D e os celulares, condição de qualidade do canal, interferência entre pares D2D, eficiência energética [1].

Portanto, mesmo havendo proximidade entre os pares D2D, poderá não ser ótimo para operarem em modo D2D, com base nas métricas de seleção.

As métricas mais comuns propostas nas literaturas são as CSI³ e SINR⁴, porque condiciona menos despesas gerais de sinalização, como também menor complexidade de implementação.

O critério de modo seleção é utilizado para determinar qual é o fluxo selecionável que a ligação D2D irá utilizar, baseado no limite predefinido de SINR, com o objetivo de maximizar a taxa de transferência e melhorar a capacidade do sistema.

³*Channel State Information*, Informação sobre a qualidade do canal.

⁴*Signal-to-Interference Plus-Noise Ratio*, indicador da relação sinal/interferência + ruído.

Interferência em Comunicações D2D

Quando o D2D é controlado pela rede, a eNB é responsável por selecionar o modo D2D ou celular, com base no relatório de CSI e SINR dos utilizadores. A eNB mantém o controlo da ligação D2D quando ela é selecionada, e transfere-as para o modo celular no caso das condições de proximidade D2D não serem mais válidas, ou se houver uma queda na ligação D2D.

Também temos a situação em que D2D é autónomo, ou seja, os próprios utilizadores D2D também podem optar pelos modos. E utilizam modo celular quando não há recursos disponíveis para reutilização, devido aos problemas de interferência ou quando os pares D2D estão a uma distância que não é viável para a comunicação D2D.

Em suma, a seleção de modo apropriado regista um papel importante na determinação do desempenho da comunicação D2D na rede celular. Isso ocorre porque, quando o modo D2D é adequadamente escolhido, o fator de reutilização aumenta, ao passo que a seleção inadequada do modo resulta na geração de interferência prejudicial dentro do sistema.

2.3.4 Gestão de Recursos Rádio

Do ponto de vista da gestão de recursos rádio, uma vez que na transmissão é selecionado o modelo apropriado, o controlo de acesso ao meio de comunicação (*MAC - Media Access Control*), determina quais RBs são definidos para o fluxo em cada intervalo de tempo de transmissão (*TTI - Transmission Time Interval*) [1]. Contrariamente à rede LTE tradicional, os recursos de rádio são alocados em simultâneo nas ligações D2D e Celulares. Desse modo o objetivo final é atribuir os RBs idealmente para ambas comunicações (D2D e Celular), baseado nas ligações que podem efetivamente realizar a sua transmissão, sem causar interferências indesejáveis.

Os RBs são atribuídos utilizando o modo de alocação centralizada ou modo de alocação distribuída.

❖ Alocação Centralizada

Neste modo de alocação de recursos a eNB é responsável pela alocação dos RBs, enquanto os utilizadores em modo distribuído podem seleccionar os recursos pré-configurados estaticamente e semi-estaticamente pela eNB.

Porém, a participação de eNB nesta tomada de decisão, incorre em mais sinalização e sobrecarga computacional, especialmente em áreas de alta densidade.

❖ Alocação Distribuída

No caso de modo de alocação de recursos distribuídos, este origina menor sobrecarga na atribuição de recursos e baixa complexidade, no entanto, é necessário haver especial atenção na comunicação D2D devido à sua escalabilidade.

As transmissões D2D podem reutilizar as ligações *uplink*, *downlink* ou ambos os recursos, para comunicação direta utilizado espectro celular licenciado. A abordagem mais comum na literatura atual é utilizar os recursos *uplink* das redes celulares [19]. Os mesmos consideram como sendo os candidatos de reutilização eficazes para a transmissão D2D porque são menos utilizados do que *downlink*, já que a maioria dos utilizadores preferem baixar dados da rede. Além disso, o equipamento de utilizador tem menos potência de transmissão em comparação com a eNB e neste caso a vítima de interferência D2D é principalmente o eNB a partir da perspectiva da comunicação celular. Dessa forma, a interferência pode ser facilmente coordenada e controlada.

No entanto, a reutilização de recursos *uplink* exige que os terminais móveis sejam equipados com recetor de acesso múltiplo por divisão de frequência (SC-FDMA), o que resulta em maior complexidade do sistema para equipar os terminais móveis, e no caso de partilha de recursos *downlink*, os terminais móveis devem estar equipados com transmissor de acesso múltiplo de divisão de frequência ortogonal (OFDMA) [1].

Outro aspecto importante é que os mesmos RBs podem ser reutilizados para diferentes pares D2D. Esta opção melhora a utilização de espectro, uma vez que os UEs distantes podem ser atendidos em simultâneo com os mesmos RBs. Porém, essa forma de

Interferência em Comunicações D2D

alocação, gera interferências entre os DUEs (D2D) e os CUEs (Celular), assim como entre os pares D2D.

Em suma, a alocação inteligente e fiável dos RBs partilhados para comunicações D2D e celulares resultaria em uma melhor utilização do espectro e minimizaria interferências prejudiciais na rede.

Na tabela 3, podemos visualizar a comparação entre os modos de alocação de recursos em termos da sua eficiência espectral. Nota-se que quando o modo é partilhado podemos ter uma maior eficiência espectral.

Modo de Comunicação	Partilha de Recursos	Eficiência Espectral
Modo Partilhado em D2D	Não-Ortogonal	Alta
Modo dedicado em D2D	Ortogonal	Baixa
Modo celular	Convencional Alocação de Recursos Celular	Nenhuma

Tabela 3 - Comparação entre os modos de alocação de recursos.

2.3.5 Arquitetura de rede LTE-A ajustada a D2D

A comunicação D2D é destinada às futuras redes móveis [19]. Para que atualmente seja possível a exploração da comunicação D2D na rede celular, a arquitetura de rede LTE-A terá de ser modificada, e os novos recursos e funcionalidades devem ser implementados para acomodar os procedimentos D2D, tais como, a descoberta de dispositivo, modo seleção, configuração de gestão de sessão D2D, alocação dos recursos, etc. [20].

A figura 8, [19] descreve o projeto arquitetónico e as modificações de protocolo que precisam ser integradas no padrão celular existente para suportar a comunicação D2D.

Interferência em Comunicações D2D

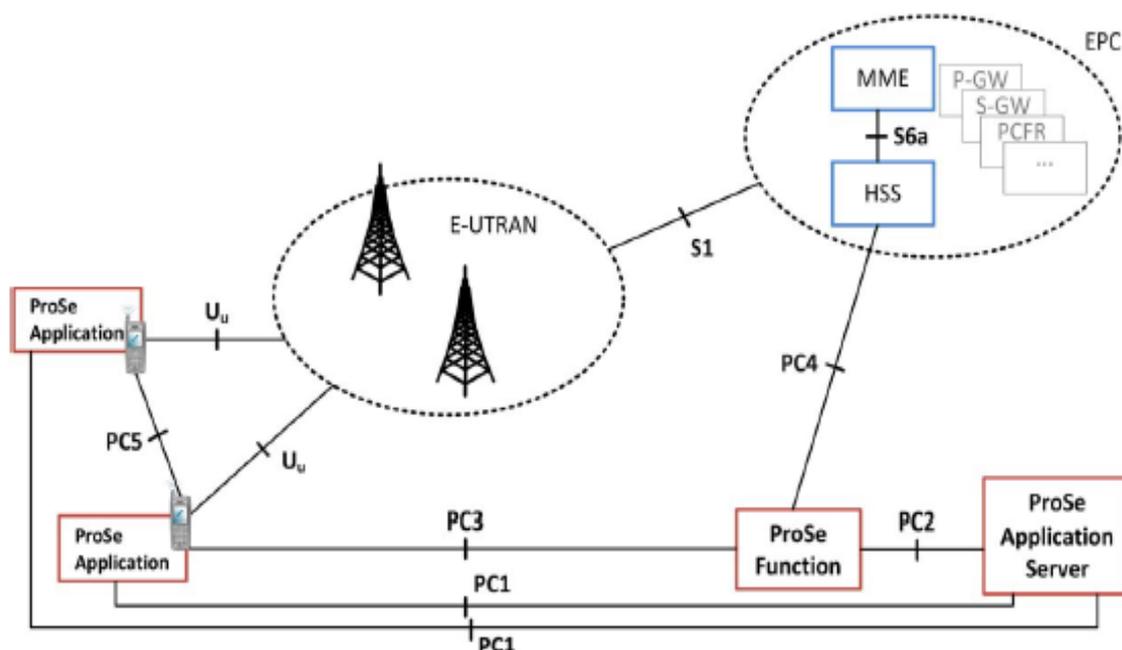


Figura 8 - Arquitetura de rede LTE-A ajustada a D2D.

A arquitetura LTE-A ajustada a D2D é composta pelo EPC⁵ e E-UTRAN⁶ que conectam aos nós *ProSe Function*, *ProSe Application Server* e a *ProSe Application*, (Função de ProSe, Servidor de Aplicação ProSe e Aplicação ProSe) tal como se ilustra na (figura 8).

A *ProSe Function* e *ProSe Application Server*, as duas entidades novas são responsáveis por auxiliar as operações de D2D, como a descoberta D2D, identificação para alocação de dispositivo, procedimentos de estabelecimento de chamadas, identificação de serviços, política de autorização (i.e. se o UE está autorizado a realizar a descoberta D2D e/ou a comunicação D2D), e outros serviços de suporte [1].

E no caso *ProSe Application* é adicionada no lado do utilizador D2D e conectada logicamente aos nós *ProSe Application Server* e *ProSe Function* para fins de sinalização e outras trocas de mensagens de procedimento D2D [1].

⁵Evolved Packet Core é uma estrutura para fornecer voz e dados convergentes em uma rede de LTE-A.

⁶Evolved UTRAN é a arquitetura de rede definida para a interface de rádio como parte da especificação da camada física 3GPP LTE-A.

Interferência em Comunicações D2D

Conforme podemos verificar na Figura 8, existem vários nós que são interligados através de várias interfaces, tendo cada uma delas a sua função, tal como podemos descrever a seguir:

- Interface PC1 – A *ProSe Application* no UE comunica-se com o *ProSe Application Server* através desta interface para definir os recursos e os parâmetros de sinalização da camada da aplicação. E a *ProSe Application Server* fornece funcionalidades de *ProSe Application* e mapas de utilizadores com funções individuais, e também armazena informações sobre todas as funções disponíveis.
- Interface PC2 - *ProSe Application Server* conecta-se com a *ProSe Function* por esta interface, que define a interação entre ambas as entidades para descoberta do ProSe (*ProximityServices*).
- Interface PC3 – A política de autorização para descoberta e comunicação D2D é tratada através desta interface.
- Interface PC4 – Está definido entre *ProSe Function* e o HSS para permitir a troca de informação para obter os utilizadores com a autorização de ProSe.
- Interface PC5 - A comunicação direta entre utilizadores D2D é realizada através dessa interface. Ela está integrada no projeto de camada física existente de LTE-A e será utilizada para trocar todos os sinais de controlo e dados D2D, e.g. descoberta de pares, sincronização transferência de dados de utilizadores, etc. [5].
- Interface S6a -Permitir troca de informações entre o MME⁷ e o HSS⁸ relacionadas com a informação de inscrição do ProSe.

⁷ MME é responsável pela gestão de mobilidade do UE.

⁸ HSS é base de dados central, contém informações relativas aos utilizadores e subscrições.

Interferência em Comunicações D2D

No entanto, todas as três novas entidades (*ProSe Function*, *ProSe Application Server* e a *ProSe Application*) introduzem ameaças de segurança e riscos relacionados da comunicação D2D. Segundo as informações [19], os autores primeiramente analisam a nova arquitetura do ponto de vista da segurança e propõem a gestão de chaves entre as entidades LTE-A comuns e as novas entidades introduzidas, afim de evitar potenciais riscos de segurança.

Além das novas entidades, os nós MME, HSS existentes devem ser aperfeiçoados para fornecer informações sobre o usuário para autorização e outras funcionalidades D2D.

Contudo, para que sejam possíveis essas ligações os terminais devem ser modificados para permitir a comunicação D2D. Isso pressupõe a extensão do terminal com suporte à descoberta e comunicação D2D pela *ProSe Application*. Além disso, para o cenário de retransmissão, também as funcionalidades de retransmissão dos terminais devem ser suportadas.

Capítulo 3

Interferência em Comunicações D2D

Neste capítulo começa-se por expor uma breve definição de interferência numa descrição mais genérica, com intuito de assimilar com facilidade o significado da palavra interferência. De seguida, passa-se para a interferência em comunicação D2D identificando-se os tipos de interferências existentes. Por fim, serão apresentadas as técnicas de gestão de interferência na comunicação D2D.

3.1 Interferência

Quando se fala de comunicação, é comum falar-se da sua qualidade. Uma das coisas que se associa frequentemente, é falarmos de interferência na comunicação.

No que toca à rede de comunicação celular, este assunto surge devido à constituição do próprio sistema celular que cria interferência devido ao reuso da frequência nas diferentes células. Outro aspeto é a existência de desvanecimentos que faz com que a potência do sinal recebido flutue rapidamente no tempo e no espaço. Por isso, quando a qualidade da chamada não é boa pedimos ao nosso interlocutor para que possa repetir o que disse ou também para procurar um lugar onde possa ter melhor cobertura de rede, de forma que não haja tantas interferências/desvanecimento.

Em suma, podemos dizer que a interferência consiste na alteração de algumas das características do sinal recebido por efeito de um outro sinal existente no sistema de transmissão (Figura 9). Dito isto, percebemos muito facilmente o impacto de interferência na comunicação.

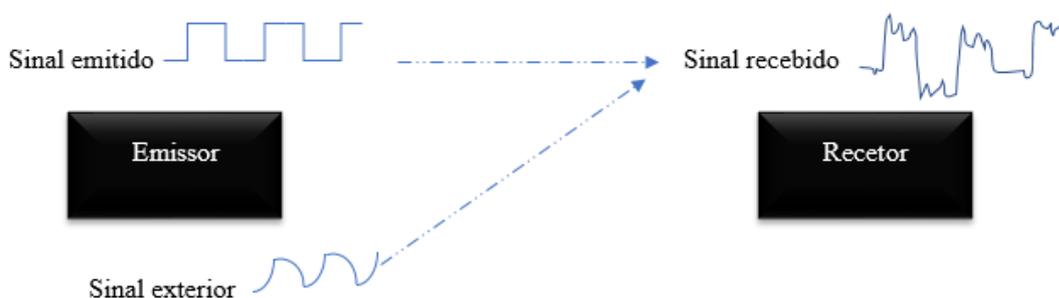


Figura 9– Interferência

3.2 Interferência em Comunicação D2D

A interferência é um problema muito crítico na comunicação D2D englobada na rede celular, pelo que idealmente a rede celular não deve ser afetada com a introdução da comunicação D2D. O mesmo acontece se a comunicação D2D for significativamente interferida pela comunicação celular, a sua eficiência será reduzida.

A comunicação D2D e a rede celular devem funcionar dentro da mesma área de cobertura de uma célula existente e partilhar o mesmo espectro celular. Dessa forma, ao reutilizar os mesmos blocos de recursos (*Resource Blocks – RBs*) tanto para utilizadores D2D como utilizadores de rede celular, introduz-se interferência inevitável, (conhecida como interferência entre camadas cruzadas) [1].

Ao reutilizar os RBs na ligação de *downlink* os utilizadores de D2D sofrem interferência do eNB, devido à alta potência de transmissão do eNB, o que torna difícil garantir a qualidade de comunicação D2D, resultando desempenho reduzido em D2D.

No caso de reutilização de RBs na ligação de *uplink*, gera-se menos interferência indesejável para os utilizadores de D2D, uma vez que a sobrecarga de tráfego da ligação *uplink* é menor do que da ligação *downlink* nas redes celulares [1].

Portanto, pode-se concluir que o nível de interferência total no espectro de ligação *uplink* é menor do que no espectro de ligação *downlink*.

Interferência em Comunicações D2D

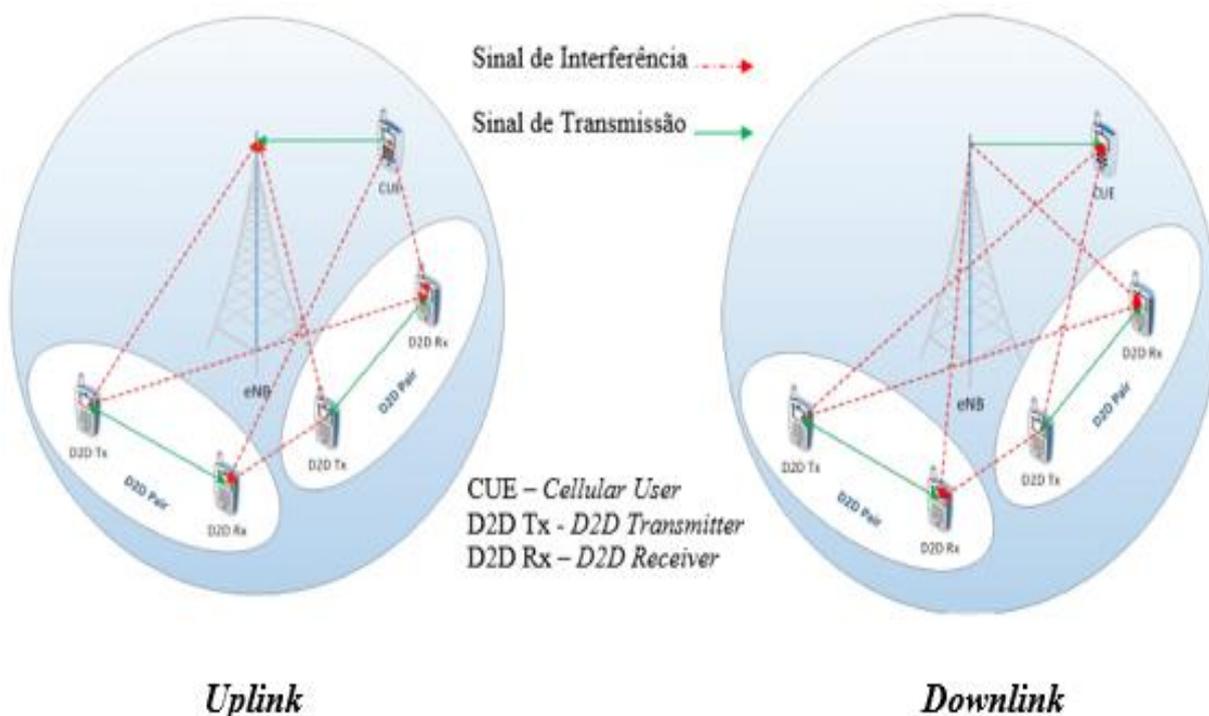


Figura 10 - Classificação de Interferência em Comunicação D2D

3.2.1 Classificação de Interferências em D2D

Segundo [19] a classificação de interferências em D2D pode ser dividida em três casos, no ponto de vista de quem proporciona a interferência e de quem é perturbado pela interferência.

❖ Caso 1 – Interferência na rede celular causada pela ligação D2D

- Ligação *uplink* – tal como ilustra na figura 10 (*uplink*), os transmissores D2D (D2D_{TX}) causam interferência indesejável na eNB que recebe dados dos seus CUEs.
- Ligação *downlink* – por outro lado na figura 10 (*downlink*), pode-se verificar que os CUEs são afetados pelas interferências caudas pelos transmissores

Interferência em Comunicações D2D

D2D, isto porque os CUEs estão a receber dados do eNB ao mesmo tempo que os D2D estão a transmitir dados.

❖ Caso 2 - Interferência em D2D causada pela rede celular

- A. Ligação *uplink*– a interferência em D2D é originada pelos CUEs que transmitem dados para eNB. Como pode-se observar na figura 10 (*uplink*), quando o CUE transmite dados para eNB os D2DRxs são afetados pelas interferências indesejadas causadas pelos CUEs.
- B. Ligação *downlink*– O mesmo efeito acontece no sentido descendente, mas neste caso a interferência que afeta os D2DRxs é originado pela eNB. Tal como se ilustra na figura 10 (*downlink*), sempre que a eNB transmite dados para os CUEs os D2DRxs sofrem interferência e o seu desempenho pode ser degradado.

❖ Caso 3 - Interferência entre pares D2D

Existem interferências mútuas entre os pares D2D que utilizam simultaneamente os mesmos recursos de rádio, independentemente da direção de transmissão (*uplink ou downlink*), a interferência é sempre causada pelos D2DTxs que afetam outros D2DRxs. Na figura 10, é possível verificar que os D2DTxs causam interferência aos outros D2DRxs.

Em geral, a interferência entre a rede celular e a comunicação D2D é agravada se a distância entre pares D2D e a eNB for curta (no caso de *uplink*) ou for maior para o CUE (no caso de *downlink*). Noutra perspetiva, se a comunicação D2D for realizada próxima um do outro, significa que potência de transmissão é menor, isso proporciona redução na interferência para rede celular. Além disso para o caso de D2D, a interferência entre dois pares D2D também diminui se a distância aumentar.

Em suma, interferência representa um risco significativo para a comunicação celular e a D2D. Dessa forma, as interferências devem ser mitigadas de forma eficiente, para garantir a QoS de rede celular, cumprindo os requisitos de serviço prioritizados na rede celular e melhorar a fiabilidade da comunicação D2D.

3.2.1 Técnicas de gestão de interferência em comunicação D2D

A integração da comunicação D2D na rede celular apresenta enormes desafios. E um dos maiores desafios na comunicação D2D é evitar interferências entre os utilizadores D2D (DUE) e utilizadores celulares (CUE), principalmente quando os mesmos utilizam recursos de rádio partilhados. Entretanto, esse problema poderia ser facilmente resolvido, caso a eNB dedicasse um recurso de rádio adicional específico para uso exclusivo D2D, e dessa forma resolveria esse enorme desafio que é a interferência entre DUEs e CUEs.

Porém, esta solução acabaria por introduzir a ineficiência no espectro, o que não seria benéfico para a rede celular. Ademais, na própria comunicação entre os pares D2D por si só também pode ocorrer interferência se as transmissões se sobreporem no tempo e ou na frequência.

Deste modo, será necessário aperfeiçoar técnicas de gestão de interferências, de forma a mitigar a interferência em comunicação D2D.

3.2.1.1 Técnica de Controlo de Potência em D2D

Uma das técnicas de prevenção de interferência mais convencional é o controlo de potência [21]. Esta técnica permite um ajuste de potência máxima de transmissão D2D ($D2D_{TX}$) de forma a não ultrapassar o limite de SINR predefinido na comunicação celular [1], ou seja, a eNB pode estabelecer restrições ao nível de potência de transmissão de $D2D_{TX}$, de forma a limitar a interferência que se possa causar aos recetores celulares. Além disso, a eNB também pode controlar os acessos de recursos partilhados de comunicações celulares e dos pares D2D, o que representa maior eficiência na utilização de espectro.

Porém, essa técnica é simples, mas não é eficiente, no sentido em que ao colocar a restrição no nível da potência D2D, isso implica que poderá afetar a comunicação D2D, ou seja, resulta que a comunicação D2D nem sempre poderá ser viável.

Dessa forma, a técnica de Controlo de Potência em D2D não é a solução ideal para gestão de interferência em comunicação D2D.

3.2.1.2 Técnica de Alocação de Recursos Rádio em D2D

A alocação de Recursos Rádio é uma técnica que permite a gestão de interferência na comunicação D2D através de utilização de algoritmos de alocação de recursos rádio, ou seja, esta técnica atribui de uma forma otimizada os recursos de rádio aos pares D2D de forma eficiente, e ao mesmo tempo garante que não haja interferência entre utilizadores do canal [1].

Este conceito difere da Técnica de Controlo de Potência, sendo que a sua principal vantagem, está relacionada como facto da potência de transmissão de $D2D_{TX}$ não ser limitada [19].

Segundo [22], esta solução permite atenuar a interferência com uma fórmula inteligente de seleccionar espectro na banda (*UL – uplink* ou *DL - downlink*) para a reutilização na ligação D2D, baseado no cálculo de potência recebida como também na métrica de distancia rádio. A eNB calcula um nível de interferência aceitável a partir da transmissão $D2D_{TX}$ para cada RB (*Resource Block*) no UL e transmite essa informação para os DUEs. Em concordância com essa informação, os DUEs apenas utilizam os recursos em que não existe interferência prejudicial.

Deste modo, os sinais de interferência da comunicação D2D para os utilizadores celulares são reduzidos e o ganho global é melhorado.

Porém, este método envolve mais sinalizações para a eNB e dessa forma causa atrasos, uma vez que a decisão de seleção de banda é realizada em cada TTI (*Transmission Time Interval*) [1].

3.2.1.3 Técnica de junção de Controlo de Potência e Alocação de Recursos Rádio

A técnica de controlo de potência em conjunto com as várias técnicas de alocação de recursos rádio, é uma ideia mais avançada para amenizar a interferência em comunicação D2D com a comunicação celular, a fim de permitir que a comunicação D2D utilize todo o seu potencial, sem pôr em causa o desempenho da rede celular.

Para este problema de otimização conjunta, vários trabalhos de investigação foram efetuados, focalizando na gestão e controlo de interferências entre a ligação celular e a D2D, com intuito de aperfeiçoar o desempenho geral numa só técnica.

Baseado nos estudos efetuados pelos investigadores [23] eles apresentaram os resultados da combinação do controlo de potência dinâmica e alocação de recursos de rádio para reduzir a interferência em D2D na rede celular. Na sua abordagem ela é realizada da seguinte forma; primeiramente a eNB atribui os recursos aos CUEs e os restantes são alocados aos DUEs. Se as demandas dos DUEs não forem atendidas por esta alocação, a eNB identifica outros recursos que podem ser partilhados tanto pelos DUEs como pelos CUEs. Posteriormente a eNB atenua a interferência através do controlo de potência dinâmica dos transmissores $D2D_{TX}$, determinando o ganho de canal entre os terminais individuais, a fim de evitar interferência prejudiciais quando DUEs e CUEs ocupam os mesmos recursos.

O desempenho deste estudo foi calculado com base no nível SINR alcançado em ambos os sistemas de transmissão. No entanto, sendo a eNB o controlador da potência dinâmica isso gera despesas significativas por parte da eNB.

Outro estudo realizado em [22] descreve-se um mecanismo de controlo de potência e de alocação de recursos à distância para atenuar a interferência entre os DUEs e CUEs que partilham os mesmos recursos. Defendem que para evitar a interferência de CUEs na comunicação D2D, os DUEs apenas reutilizam os RBs de CUEs que não estão na proximidade. Esse cálculo é baseado no ajuste de potência de transmissão dos $D2D_{TX}$ da maneira que a interferência da comunicação D2D para a eNB esteja dentro do limite

aceitável. Baseado neste mecanismo, os seus resultados revelam que o *throughput* global do sistema pode ser aumentando em 41%.

Em [24] os autores apresentam um esquema de controlo de potência e alocação de recursos baseado em QoS, levando em consideração a diferença nos requisitos de QoS dos CUEs e dos DUEs. Portanto, os DUEs utilizam o mecanismo do controlo de potência normal, ou seja, que limita a potência máxima de transmissão D2D de forma a não interferir com CUEs, o que significa que se os DUEs e os CUEs utilizam os mesmos RBs. A SINR dos CUEs não deve estar abaixo do limite considerado. Porém, esse algoritmo permite que os DUEs utilizem os RBs mais adequados para sua QoS ao invés dos preferidos pelos CUEs.

A complexidade do esquema baseado em QoS depende principalmente da divisão do canal e poder ser expressa em função de K , onde K se refere ao número de RBs no sistema. Os resultados obtidos são comparados com um esquema de referência em que cada par D2D pode reutilizar RB de apenas um CUE. O resultado demonstra que a QoS dos DUEs poderá ser mais adequada na maioria dos casos. No entanto, a QoS dos CUEs é colocada de parte nessa avaliação.

3.2.1.4 Técnica de Divisão de Espectro

A divisão de espectro é a maneira mais fácil de evitar interferências na rede celular com a comunicação D2D. Conforme sugerido [25] a tecnologia de multiplexação por divisão de tempo (TDM) deve ser adotada para separar transmissões celulares e D2D, o que poderia efetivamente reduzir o nível de interferência na rede celular com a comunicação D2D.

No entanto, este método levaria a uma utilização ineficiente do espectro disponível. Além disso, o mesmo conta apenas as interferências entre CUEs e DUEs. Portanto, é necessário um mecanismo adicional para mitigar a interferência entre utilizadores de D2D, que compartilham o mesmo conjunto de recursos.

3.2.1.5 Técnica de MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

A técnica de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) é uma componente importante nos padrões atuais da rede celular sem fio para melhorar o desempenho geral do sistema [26]. As técnicas anteriores referidas para mitigação de interferência em comunicação D2D para redes celulares assumem apenas SISO (*Single Input Single Output*) [19]. Estes métodos de transmissão MIMO, podem ser utilizados na comunicação D2D, sem prejudicar a comunicação celular, evitando ainda interferências entre ligações celulares e ligação D2D, com conhecimento prévio dos canais interferentes, CSI (*Channel State Information*).

Esta técnica utiliza múltiplas antenas com múltiplas transmissões e recepção para gerar um padrão de feixe de antena direcional. É dito em [1] que o feixe gerado (sinal desejado) é orientado na direção ao destinatário pretendido, ao mesmo tempo em que cancela as interferências indesejáveis na direção de outros utilizador, ou seja, a potência de transmissão é maximizada na direção do ângulo do recetor, minimizando o sinal no espaço nulo, permitindo assim, o aumento de SINR do utilizador pretendido, e reduzindo o desperdício de potência transmitida na direção indesejada. Além disso, aumenta a capacidade de reutilização de espectro. Portanto, a utilização desta técnica, de antenas múltiplas na transmissão na ligação *downlink* ou *uplink* podem mitigar os níveis de interferência entre a transmissão celular e a D2D, melhorando a capacidade do sistema e garantindo ainda mais a viabilidade da transmissão D2D.

As investigações realizadas, segundo [1] foi feito um estudo da técnica MIMO, para mitigar a interferência dos utilizadores de eNB e D2D em cenário de reutilização de recursos *downlink*. Nesse esquema, a eNB estava equipada com antenas MIMO e executa a formatação de feixe para evitar a interferência esperada pelos recetores D2D, enquanto que os terminais de utilizadores possuem antenas SISO. A eNB calcula a matriz de formação de feixes com base no conhecimento da informação de CSI obtida dos utilizadores D2D e dos utilizadores celulares. A eNB então determina as potências de transmissão com base nos limiares SINR das ligações celular e D2D.

Interferência em Comunicações D2D

Os resultados apresentados mostram que a formatação de feixe melhora o desempenho da comunicação D2D de modo que os critérios de SINR limitam a interferência entendida pelos recetores D2D do eNB. Além disso, o controlo da potência de transmissão do D2D_{TX} aumenta o desempenho da comunicação celular, pois reduz a interferência entendida pelos utilizadores celulares. No entanto, esse esquema é baseado na partilha de recursos de downlink, no qual o eNB possui alta potência de transmissão pelo que os D2D_{RX} estão sujeitos a sinais de interferência mais excessivos. Além disso, a sua análise é baseada na implantação de uma única célula, sem levar em consideração a interferência de células vizinhas.

Interferência em Comunicações D2D

Capítulo 4

Especificação e simulação dos cenários

O presente capítulo faz a descrição de vários cenários de comunicação D2D criados no simulador em Java dentro de uma estrutura de rede celular LTE-A, onde as apresentações gráficas foram desenvolvidas no simulador de ligação em MatLab.

Os cenários são diferenciados nomeadamente, pelo número de utilizadores, distância entre os utilizadores, tipos de algoritmos e avaliados diferentes KPIs⁹.

4.1 Implementação em Java

Inicialmente a estrutura tradicional de rede celular LTE-A já se encontrava desenvolvida num simulador de sistema em Java. Partido deste ponto, desenvolveu-se a integração de comunicação D2D na rede celular LTE-A. Para tal, foram necessários implementar várias funcionalidades, para que o mesmo se assemelhasse ao esperado procedimento da comunicação D2D. De seguida, serão apresentadas algumas implementações desenvolvidas no simulador de sistema com base nos conhecimentos adquiridos.

⁹são métricas que fornecem visibilidade sobre o desempenho.

4.1.1 Modelo de comunicação D2D

Com a base nos estudos efetuados, tal como foi expresso no capítulo 2 (ponto 2.3.1), existem vários tipos de comunicação D2D, sendo elas dentro e fora de banda.

Na presente dissertação foi implementado comunicação D2D dentro banda com a categoria *underlay*, em que os utilizadores D2D e os utentes celulares são alocados os mesmos recursos de rádio em simultâneo pela eNB. Este tipo de implementação também é conhecido como o modo de reutilização de partilha recursos não ortogonais.

A eNB reutiliza os blocos de recursos da ligação ascendente ou descendente, (mas nesta dissertação em causa foi implementada apenas a ligação descendente já desenvolvida no simulador java) para a comunicação D2D com base em determinadas métricas de desempenho, tais como distância entre utilizadores D2D, sua localização dentro da célula, nível de potência de transmissão, área limitada pela interferência.

4.1.2 Mitigação de Interferência

Para prevenção de interferência tal como foi visto no capítulo 3 (ponto 3.2.1), existem várias técnicas para mitigar as interferências. Para a implementação em causa, foi utilizada a técnica de junção de Controlo de Potência e Alocação de Recursos Rádio, está é uma ideia mais avançada para amenizar a interferência em comunicação D2D com a comunicação celular, a fim de permitir que a comunicação D2D utilize todo o seu potencial, sem pôr em causa o desempenho da rede celular.

4.1.3 Perdas de Propagação

Na escolha do modelo de propagação, foi levado em consideração o modelo de propagação do 3GPP implementado em [27] tendo-se considerado a seguinte equação para as perdas de propagação no modo D2D:

$$L_b = P_{los} * (28 + 40 * \log_{10}(d)) \quad (4.1)$$

Onde:

$P_{los} = 1$ é a probabilidade de existir linha de vista entre dispositivos D2D.

d é a distância em metros. E a distância entre dispositivos D2D é calculada em relação a um dispositivo D2D central.

Na comunicação celular, foi levado em consideração o modelo de propagação do 3GPP que já se encontrava implementado no simulador, tendo a seguinte equação de perdas de propagação:

$$P_{nlos} = -40.45 + 39.09 \log(d) [dB]$$

$$P_{los} = 34.04 + 22 \log(d) [dB] \quad (4.2)$$

$$Pr(los) = 18 * (1 - \exp(-d/63))/d + \exp(-d/63) \text{ se } d > 18m$$

$$L_b = Pr(los) * P_{los} + (1 - Pr(los)) * P_{nlos} [dB]$$

Onde:

P_{nlos} é a perda de propagação quando não há linha de vista entre emissor e recetor.

P_{los} é a perda de propagação se há linha de vista e $Pr(los)$ é a probabilidade de haver linha de vista entre os terminais. L_b são as perdas de propagação efetivas.

4.1.4 Topologia D2D

Normalmente nas fronteiras das células é onde os UEs têm menos qualidade de comunicação, devido à grande distância entre UEs e eNB, e também é onde existe mais interferências devido à proximidade das outras células vizinhas e existências de outros UEs. Portanto nesta dissertação, para criação da topologia D2D, primeiramente pensou-se na área onde se deveria efetuar a comunicação D2D dentro da topologia celular, de forma que esses UEs que estão nas fronteiras possam ter melhor qualidade de comunicação. No entanto, nessas zonas efetua-se a comunicação direta entre UEs sem recorrer a utilização de eNB para transmissão de dados desde que os mesmos estejam na proximidade. Para tal, foram efetuados alguns cálculos.

As posições centrais dos D2D_{TX} são calculadas de seguinte forma:

$$(X, Y) = (R * \cos(j * Ang + \alpha), R * \sin(j * Ang + \alpha)) \quad (4.3)$$

Onde:

(X, Y) corresponde as posições onde estão os centros das zonas D2D_{TX} a transmitirem informações.

Ang é o valor do ângulo, do qual depende quantas zonas D2D_{TX} pretendemos ter.

R é o valor de raio das macrocélulas.

J vai de 0 até 11 se houver 12 D2D_{TX}. $\alpha = 0$ ou $\alpha = \frac{\pi}{6}$

Na figura 12, ilustra-se o exemplo de topologia D2D integrada na rede celular. Nesta rede celular podemos verificar que existem 19 eNB de cor preta e na fronteira da célula central existem 12 zonas D2D_{TX} de cor azul afastadas de 30°, isto porque como temos 12 zonas D2D_{TX} $Ang = 360^\circ/12 = 30^\circ$. O afastamento entre os centros das D2D_{TX} é dado por $Ang * R$ com Ang expresso em radianos. Neste caso de 12 D2D_{TX} é $(\pi/6) * R$.

Interferência em Comunicações D2D

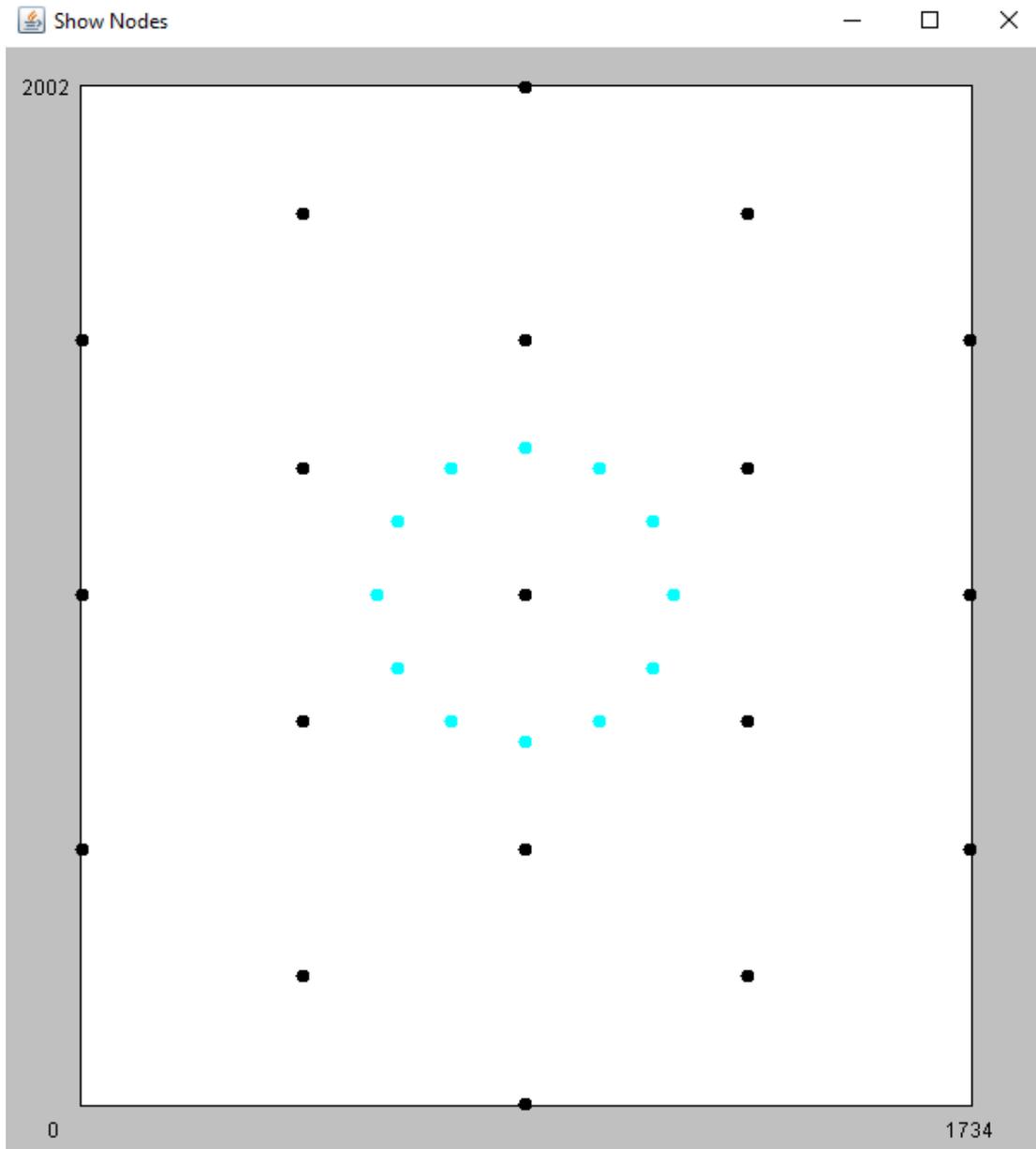


Figura 12 - Ilustração de D2DTx nas fronteiras de eNB central.

Do ponto de vista dos $D2D_{RX}$, estes movem-se em cada instante de tempo e estão associados a cada zona $D2D_{TX}$, o que significa que os $D2D_{TX}$ conhecem os seus $D2D_{RX}$ que estão na proximidade e transmitem as informações diretamente entre os pares, sem ter de passar os dados pelas eNBs.

Essa comunicação é concretizada nas fronteiras das células de forma a minimizar interferências indesejadas entre potências de transmissão de $D2D_{TX}$ e das eNBs. Deste modo se aplica a técnica de junção de controlo de potência e alocação de recursos rádio,

Interferência em Comunicações D2D

sendo que a potência de transmissão de $D2D_{TX}$ é baixa, o que permite não interferir grandemente com os UEs das células CUEs a receber dados das eNBs.

Conforme se ilustra na figura 13 em que há 6 zonas D2D, de forma a diferenciar os utentes D2D e os CUEs (celulares), podemos ver que os $D2D_{RX}$ são verdes e estão próximos dos seus $D2D_{TX}$ e os CUEs são vermelhos.

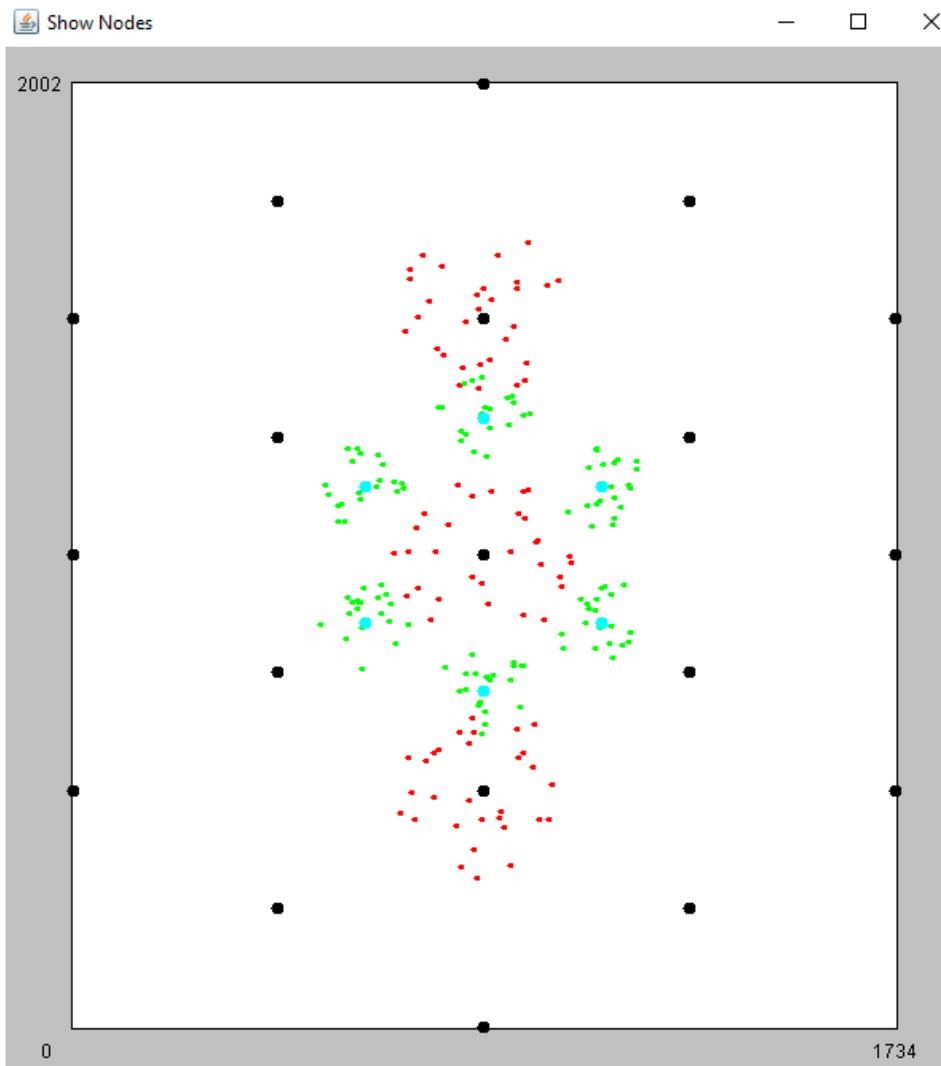


Figura 13 - Ilustração dos $D2D_{RX}$ na proximidade dos $D2D_{TX}$.

4.2 Resultados das simulações

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos de todo desenvolvimento efetuado com o conhecimento adquirido. Para tal, foram criados vários cenários que permitissem explorar a comunicação D2D inserida num ambiente de macro células.

Em cada cenário foram utilizados dois *schedulers* diferentes que possibilitassem entender melhor o funcionamento da comunicação D2D dentro de uma rede celular.

O *scheduler* Max C/I (*Maximum carrier-interference*) usa um algoritmo que beneficia a troca de informação entre os utilizadores com máxima relação C/I o que resulta no aproveitamento do melhor canal proporcionando um throughput elevado, ou seja, favorece utilizadores com melhor relação sinal/ruído (SINR - *Signal-to-Interferenceplus Noise Ratio*). Em termos de comunicações D2D isto significa dar prioridade à comunicação entre os dispositivos D2D que estão mais próximos uns dos outros.

A medição de SINR é realizada periodicamente através do indicador de qualidade do canal (CQI) por cada utilizador. O *scheduler* Max C/I não é justo, isto porque, dá menos oportunidades aos utilizadores com pior relação sinal/ruído de transmitir os seus dados. Os utilizadores com menor potência recebida, ou que se localizem na fronteira da sua fonte de transmissão ficam desfavorecidos.

Neste contexto, avaliou-se também um *scheduler* justo. O *scheduler Round Robin (RR)* usa um algoritmo justo, trata todos os utilizadores com a mesma prioridade independentemente da sua localização. O que significa também que os utilizadores D2D com SINR mais baixa vão transmitir os seus dados ainda que estejam bastante afastados uns dos outros com a mesma duração e com a mesma prioridade de qualquer outro utente.

Nas estações de base eNB usou-se apenas o *scheduler Proportional Fairness* que sendo justo considera o SINR do canal de comunicação de cada utente antes de dar prioridade ao utente com melhor relação entre o máximo throughput instantâneo e o throughput médio transmitido até esse instante.

Interferência em Comunicações D2D

A fonte de tráfego utilizada quer na eNB como na comunicação D2D foi a CBR (*Constant Bit Rate*) este gera sempre a mesma quantidade de dados, com exatamente os mesmos intervalos de tempo entre dados consecutivos.

Foram utilizados diferentes indicadores de performance, tais como:

- ❖ *Throughput* a quantidade de dados transferidos, ou processados, num determinado espaço de tempo.

- ❖ Geometria ou SINR que corresponde à relação entre a potência do sinal recebido na própria célula (I_{own}) e a soma da interferência total de todas as outras células vizinhas (I_{others}) mais a potência do ruído branco gaussiano (P_N).

$$G = SINR = \frac{I_{own}}{I_{others} + P_N} \quad (4.4)$$

- ❖ *CDF - Cumulative Distribution Function*, consiste na distribuição de probabilidade de uma variável aleatória.

4.2.1 Cenário 1

Este cenário contém 6 D2D_{TX} a transmitir com um raio máximo de 100m e em cada zona D2D_{TX} existem 20 D2D_{RX} a receberem os dados. A Tabela 4, mostra todas as informações associadas a este cenário.

Características	Parâmetros	Valores
Global	Tempo de Simulação (s)	500
	TTI (ms)	0,5
	Tipo de Mobilidade	Dentro de Sector
	CQI	15
	PRB	50
	Modelo de Propagação	Hata 3GPP
	Reuso de Frequência	1
	Modelo de Tráfego	CBR
D2D	Scheduler	MaxCI & RR
	Número D2D _{TX}	6
	Número de D2D _{RX} por D2D _{TX}	20
	Raio (m) de D2D _{TX}	100
	Velocidade (Km/h)	3
	Potência de Transmissão	24 dBm
Celular	Scheduler	Proportional Fairness
	Número de Setores	9
	Número de CUEs por Setor	10
	Raio (m) de Célula de eNB	289
	Velocidade (Km/h)	30
	Potência de Transmissão	46 dBm

Tabela 4 - Parâmetros de simulação para o cenário 1.

Na figura seguinte podemos visualizar a topologia para este cenário. Mediante as explicações que foram dadas no ponto 4.1.2, facilmente conseguimos perceber a existência de 6 zonas D2D_{TX} situadas nas fronteiras do eNB central, em que cada zona D2D_{TX} contém 20 D2D_{RX}. A comunicação direta entre os dispositivos é realizada nos seus intervalos de tempo. Para o caso da comunicação celular, cada célula associada a

Interferência em Comunicações D2D

um eNB é composta por três setores (uma antena por setor), em que cada setor contém 10 UEs, o que significa que existem no total 30 UEs por eNB.

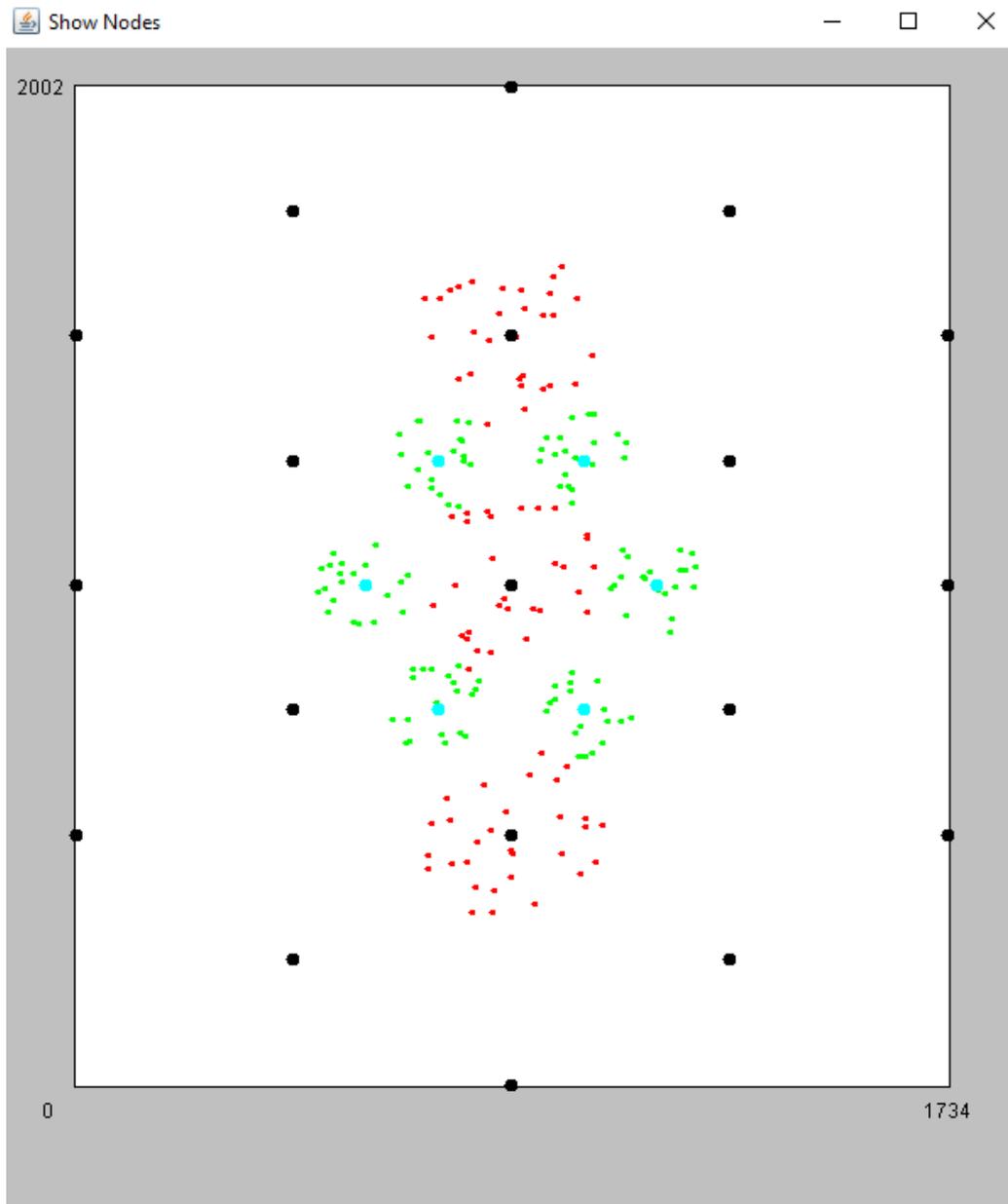


Figura 14 - Ilustração da topologia para o cenário 1.

Interferência em Comunicações D2D

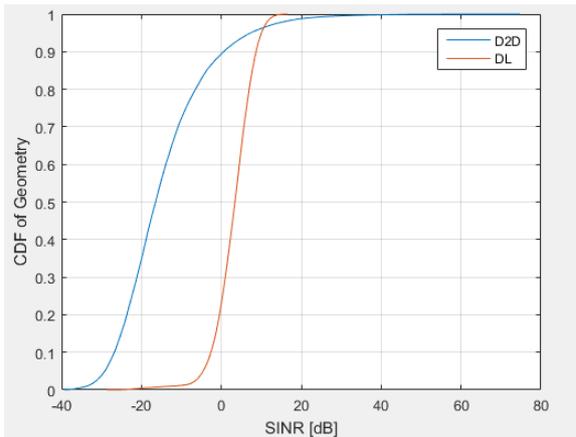


Figura 15 – CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 1.

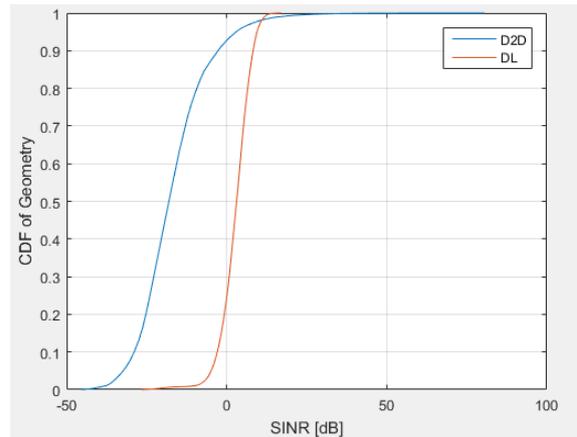


Figura 16 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando RR em D2D para o Cenário 1.

Para este primeiro cenário, podemos observar através das figuras 15 e 16 que o CDF da Geometria, i.e., SINR da comunicação D2D é muito menor do que o da comunicação celular (legenda DL) para mais de 95% de todos os utentes. Com $\text{SINR} \leq 0$ dB, existem 20% de utentes celulares ao passo que utentes D2D há mais de 92% nesta situação. Na comparação entre os *schedulers* usados em D2D observa-se que a SINR do RR é menor que a do MaxCI para este cenário. A SINR média correspondente a 50% de todos os utentes, é de -16 dB para MaxCI e -21 dB para RR. A SINR média dos utentes celulares é de cerca de 5dB.

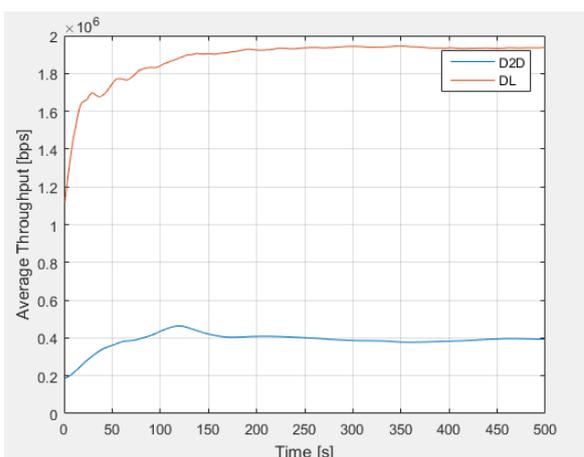


Figura 17 - Throughput médio utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 1.

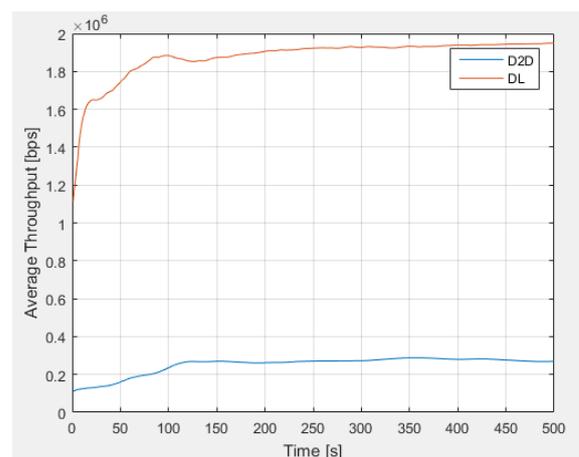


Figura 18 - Throughput médio utilizando RR em D2D para o Cenário 1.

Na análise dos resultados associados à média de *Throughput* em função do tempo de simulação para este primeiro cenário, observa-se que na comunicação D2D a sua taxa

Interferência em Comunicações D2D

de transmissão ronda os 0.4Mbps com MaxCI, obtendo-se um pior resultado quando se utiliza RR com o valor à volta de 0.3Mbps. No caso da comunicação celular, obtém-se uma média de *throughput* mais elevada de 1.9Mbps. Estes resultados estão de acordo com o CDF de SINR ilustrados nas figuras 15 e 16.

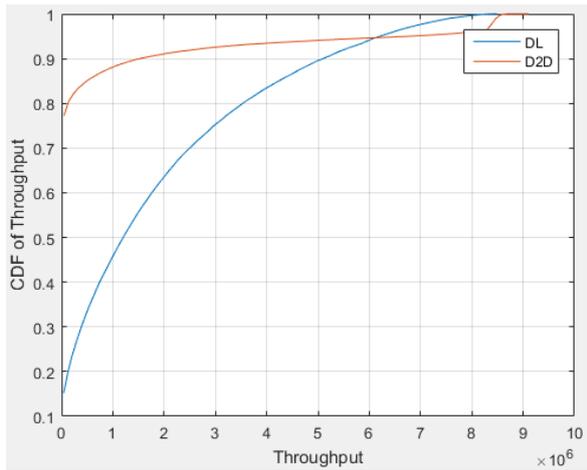


Figura 19 - CDF de Throughput utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 1.

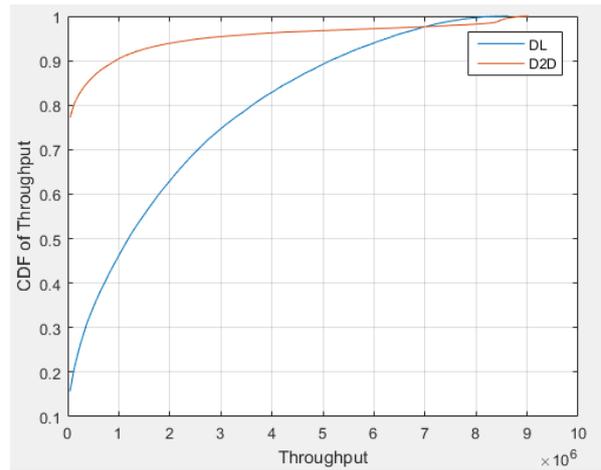


Figura 20 - CDF de Throughput utilizando RR em D2D para o Cenário 1.

Observa-se nas figuras 19 e 20, o CDF de Throughput para a comunicação D2D e celular (DL). Na comunicação D2D há cerca de 78% aproximadamente de utentes com taxa de transmissão próxima de 0Mbps. Apenas 22% dos utentes têm suficiente SINR para obter sucesso na transmissão ($\text{SINR} \geq -10\text{dB}$). Em comparação com a comunicação celular, onde se obtém taxas de transmissão baixas para apenas 10% dos utentes. De realçar que há um número reduzido de utentes D2D (5% com MaxCI e 2% com RR) que consegue transmitir a ritmos binários superiores aos ritmos binários dos utentes celulares. Trata-se dos utentes D2D que estão muito próximos uns dos outros.

Para este primeiro cenário, os resultados são conforme o esperado, uma vez que a potência de transmissão de D2D_{TX} é baixa, para este raio de 100m que se utilizou sendo uma distância muito elevada além de existir interferência das comunicações celulares. Era espectável que o *throughput* das comunicações celulares fosse superior ao das ligações D2D.

4.2.2 Cenário 2

O cenário 2 contém 12 D2D_{TX} a transmitir com um raio máximo de 50m e em cada D2D_{TX} existem 10 D2D_{RX} a receberem dados. Na Tabela 5 e na figura 21 estão as informações associadas a este cenário. Os outros dados são os mesmos do cenário 1

Características	Parâmetros	Valores
D2D	Scheduler	MaxCI& RR
	Número D2D _{TX}	12
	Número de D2D _{RX} por D2D _{TX}	10
	Raio (m) de D2D _{TX}	50
	Velocidade (Km/h)	3
	Potência de Transmissão	24 dBm

Tabela 5 - Parâmetros de simulação para o cenário 2.

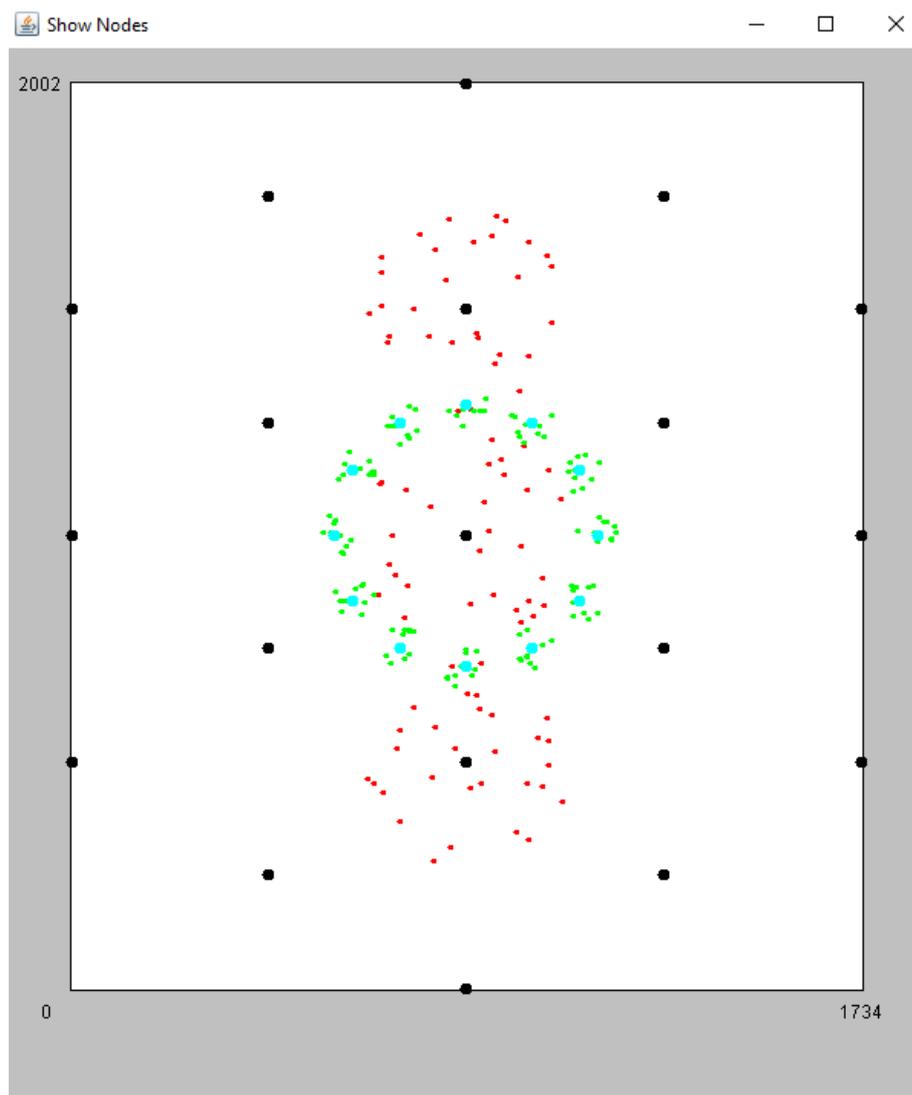


Figura 21- Ilustração da topologia para o cenário 2.

Interferência em Comunicações D2D

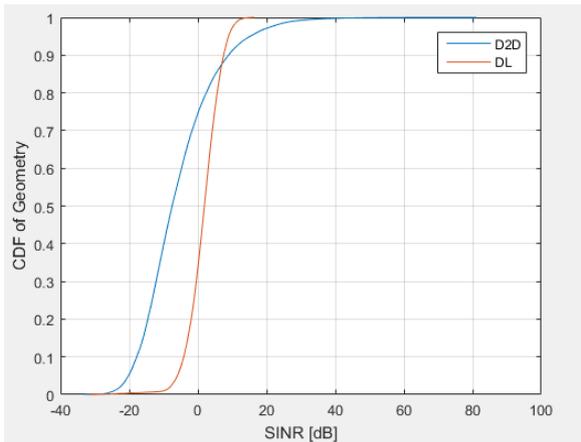


Figura 22 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 2.

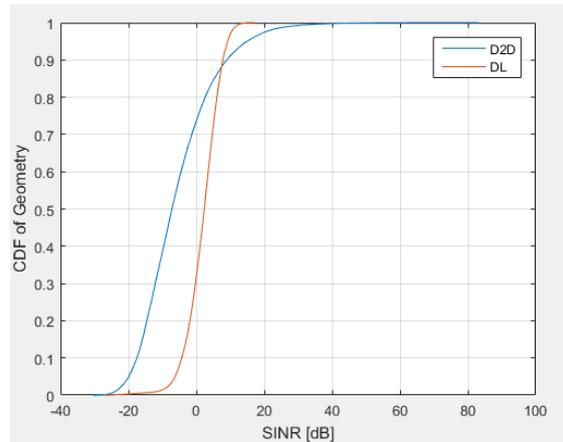


Figura 23 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando RR em D2D para o Cenário 2.

No cenário 2, a partir das figuras 22 e 23 podemos observar os gráficos de CDF da Geometria (i.e. SINR) em função de SINR: Neles os resultados de comunicação D2D são inferiores à comunicação celular para mais de 88% dos dispositivos. Interpretando os resultados podemos dizer que 72% de utentes D2D não obtêm uma SINR ≥ 0 dBm, enquanto na ligação celular apenas 29% dos utentes não conseguem obter esse valor de SINR. Na comparação dos *schedulers* utilizados na ligação D2D, ambos (MaxCI e RR) apresentam valores muito semelhantes, a SINR média correspondente a 50% de todos os utentes, é de -7.62 dB para MaxCI e -7.44 dB para RR. A SINR média dos utentes celulares é de cerca de 2 dB.

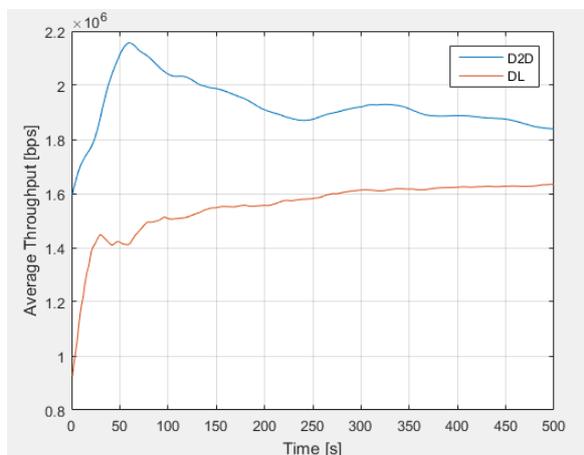


Figura 24 - Média de Throughput utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 2.

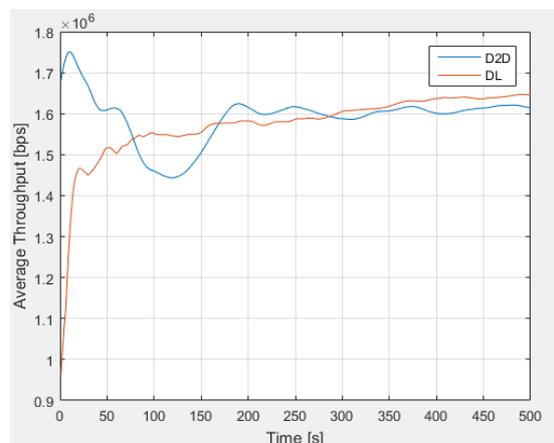


Figura 25 - Média de Throughput utilizando RR em D2D para o Cenário 2.

Interferência em Comunicações D2D

Em relação à média de Throughput em função de tempo para este cenário, ilustrada na figura 24, podemos dizer que a ligação D2D utilizando o *scheduler* MaxCI, os seus utentes têm uma média de Throughput um pouco superior à dos utentes celulares, tendo os utentes D2D a média de Throughput 1.85Mbps, enquanto que para os utentes celulares a média de Throughput é de aproximadamente 1.62Mbps. Entretanto, ao utilizar o *scheduler* RR na comunicação D2D, como é indicado na figura 25, os utentes celulares conseguem obter uma média de Throughput sensivelmente igual à dos utentes D2D cerca de 1.62Mbps

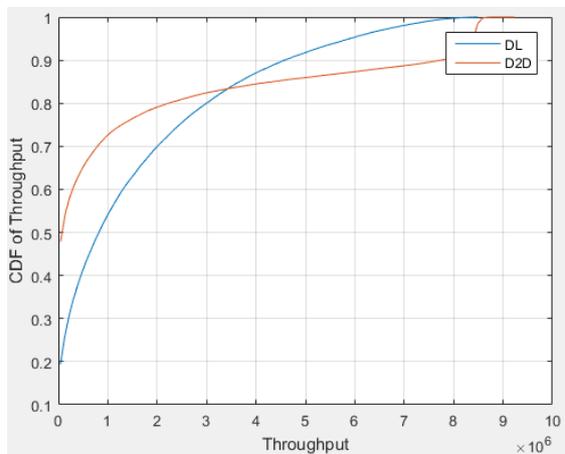


Figura 26 - CDF de Throughput utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 2.

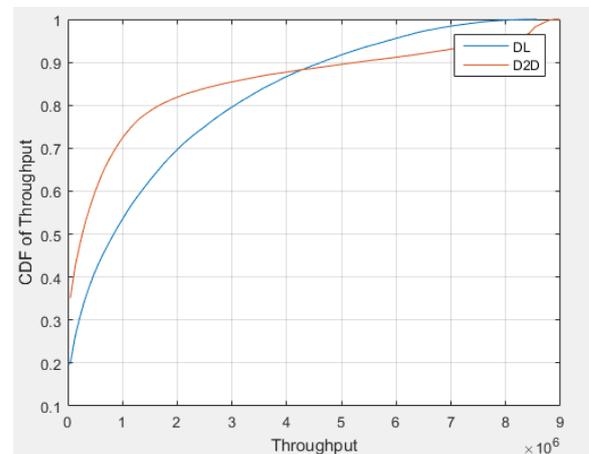


Figura 27 - CDF de Throughput utilizando RR em D2D para o Cenário 2.

Na análise do CDF de Throughput, podemos observar tanto figura na 26 como 27, a comunicação celular consegue obter melhores resultados que a comunicação D2D quando os valores de throughput são baixos. No gráfico 26 em que D2D utiliza MaxCI cerca de 48% dos utentes têm ritmos binários quase nulos, e para a utilização RR cerca de 35% de utentes têm ritmos binários quase nulos; enquanto que na comunicação celular apenas 20% dos utentes têm ritmos binários quase nulos.

4.2.3 Cenário 3

Existem 24 D2D_{TX} a transmitir com um raio máximo de 25m e em cada zona D2D_{TX} existem 5 D2D_{RX} a receberem os dados. Na Tabela 6 e figura 28 mostram-se todas as informações associadas a este cenário.

Características	Parâmetros	Valores
D2D	Scheduler	MaxCI & RR
	Número D2D _{TX}	24
	Número de D2D _{RX} por D2D _{TX}	5
	Raio (m) de D2D _{TX}	25
	Velocidade (Km/h)	3
	Potência de Transmissão	24 dBm

Tabela 6 - Parâmetros de simulação para o cenário 3.

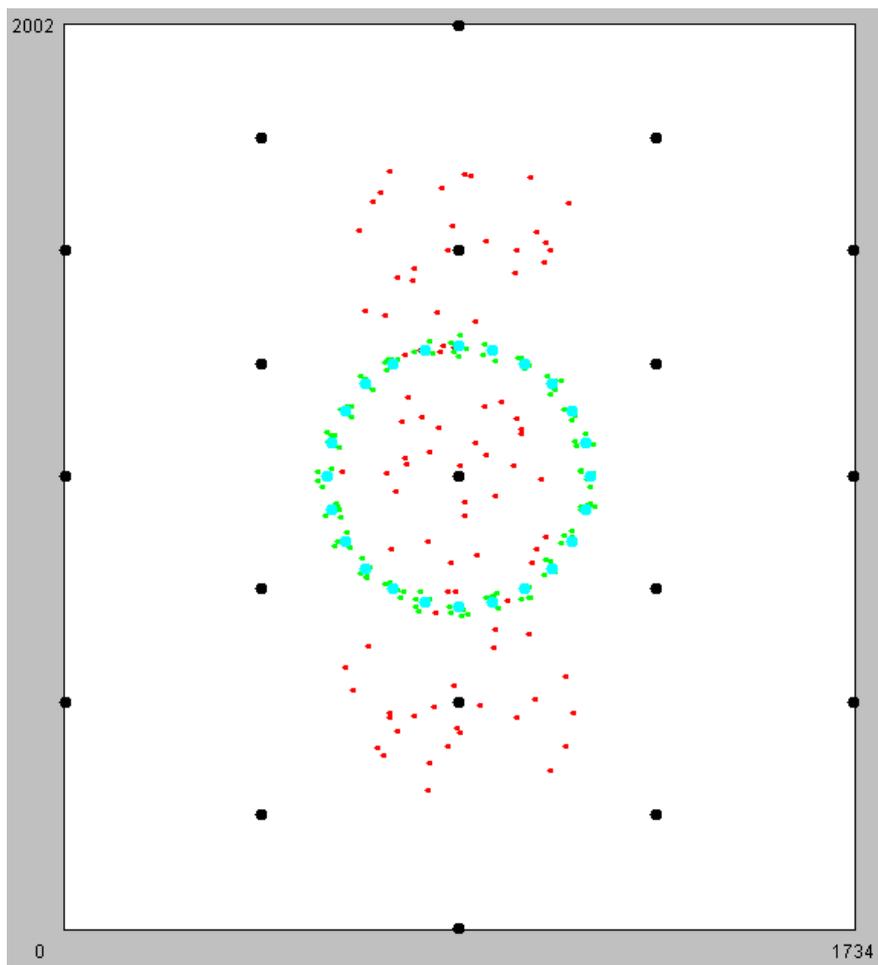


Figura 28 - Ilustração da topologia para o cenário 3.

Interferência em Comunicações D2D

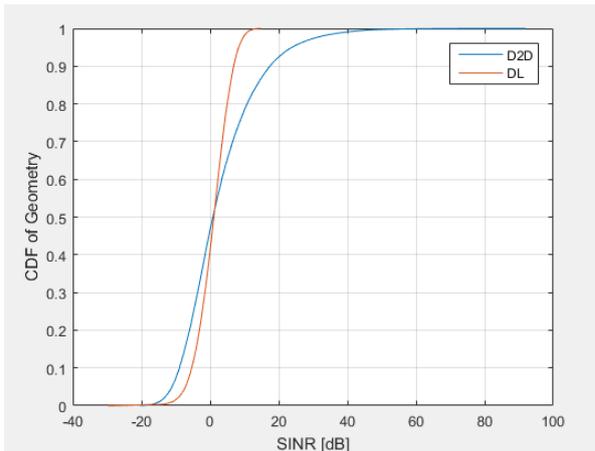


Figura 29 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 3.

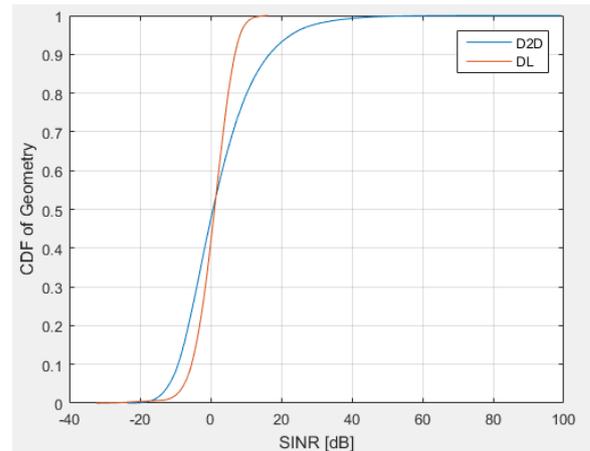


Figura 30 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando RR em D2D para o Cenário 3.

Neste cenário, os gráficos de CDF da Geometria em função de SINR, apresentam resultados de SINR médio semelhantes tanto para a comunicação celular como para comunicação D2D. No entanto, a comunicação D2D consegue ter maiores valores de SINR para metade dos utentes e tem piores valores de SINR para a outra metade dos utentes. Daqui espera-se que os resultados de *throughput* médio sejam mais elevados para as comunicações D2D do que para os celulares.

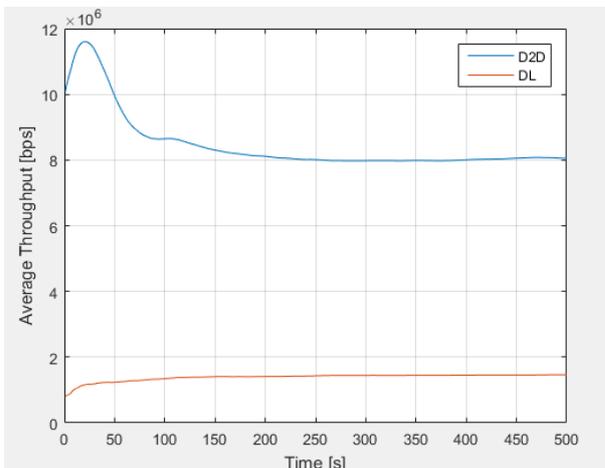


Figura 31 - Throughput médio utilizando Max CI em D2D para o Cenário 3.

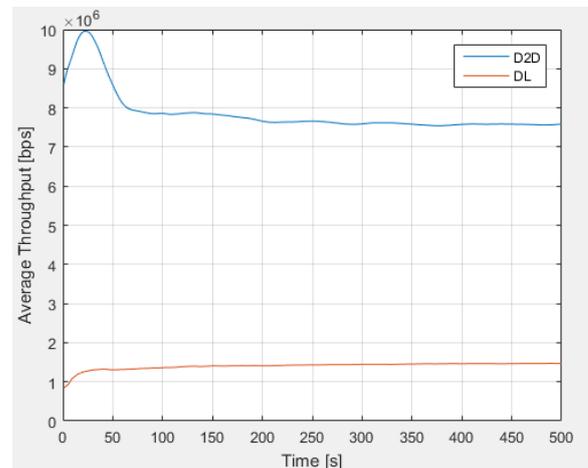


Figura 32 - Throughput médio utilizando RR em D2D para o Cenário 3.

Na análise destes resultados de *throughput*, verifica-se que a comunicação D2D apresenta média de *throughput* em função de tempo quatro vezes superior à comunicação celular. Com o *scheduler* MaxCI a comunicação D2D consegue obter uma

Interferência em Comunicações D2D

média de throughput ligeiramente superior ao RR, tal como podemos observar nas figuras 31 e 32.

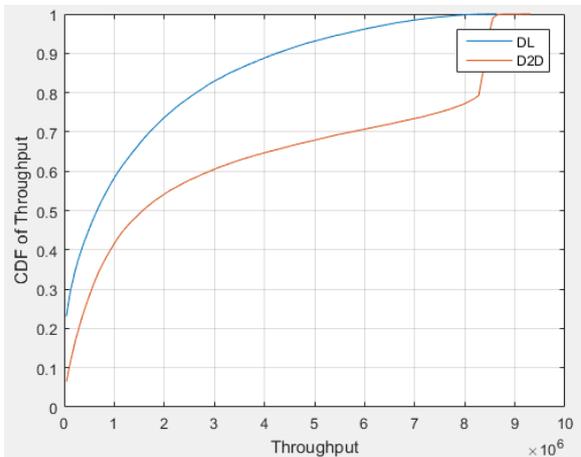


Figura 33 - CDF de Throughput utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 3.

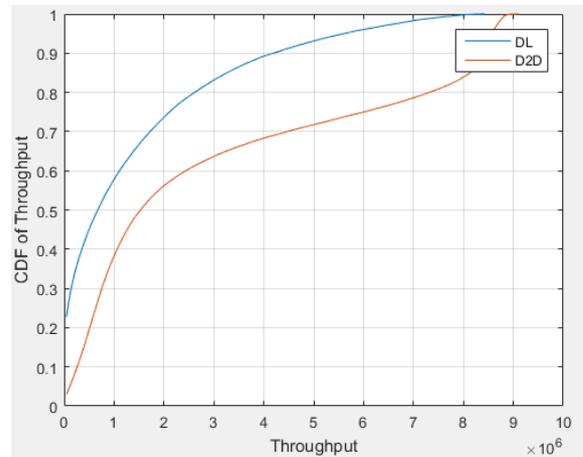


Figura 34 - CDF de Throughput utilizando RR em D2D para o Cenário 3.

No caso do CDF de throughput das figuras 33 e 34, continua a ser claro que na comunicação D2D obtém-se sempre melhores resultados em comparação com a comunicação celular. Há cerca de 3% de utentes D2D que têm ritmos binários quase nulos quando o scheduler é RR e esta percentagem de utentes sobe para 6% quando o scheduler é MaxCI. No caso dos utentes celulares são cerca de 22% os que têm ritmos binários quase nulos.

4.2.4 Cenário 4

Neste cenário há 60 D2D_{TX} a transmitir com um raio máximo de 10m e em cada D2D_{TX} existem 2 D2D_{RX} a receberem as informações. Na Tabela 7 e figura 35 mostra-se todas as informações associadas a este cenário.

Características	Parâmetros	Valores
D2D	Scheduler	MaxCI& RR
	Número D2D _{TX}	60
	Número de D2D _{RX} por D2D _{TX}	2
	Raio (m) de D2D _{TX}	10
	Velocidade (Km/h)	3
	Potência de Transmissão	24 dBm

Tabela 7 - Parâmetros de simulação para o cenário 4.

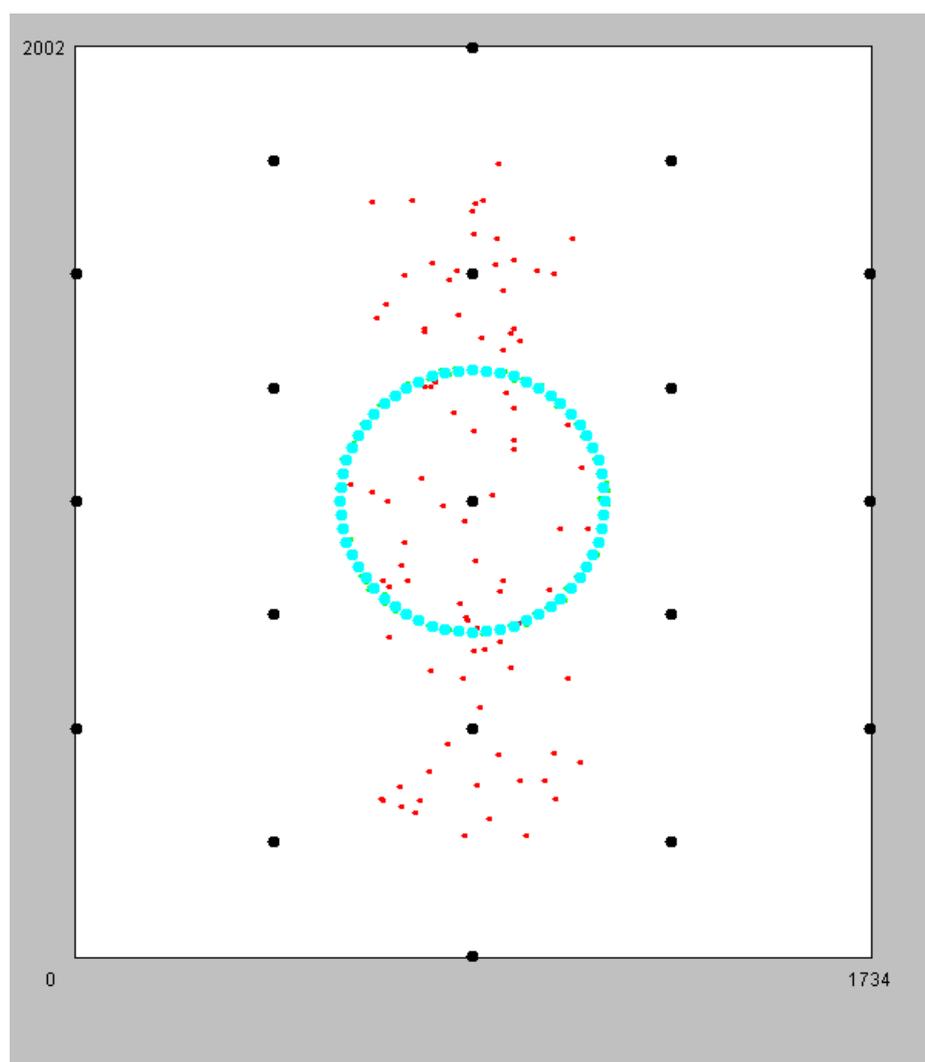


Figura 35 - Ilustração da topologia para o cenário 4.

Interferência em Comunicações D2D

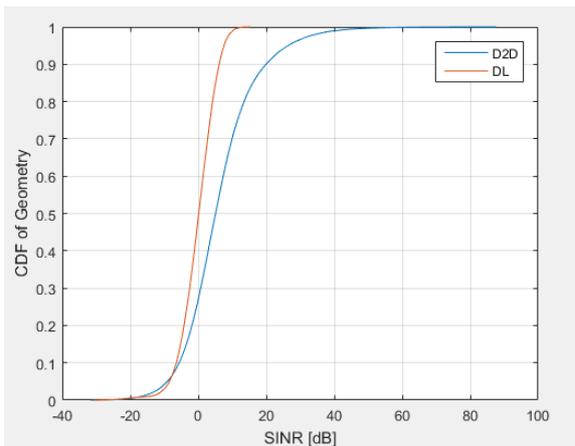


Figura 36 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 4.

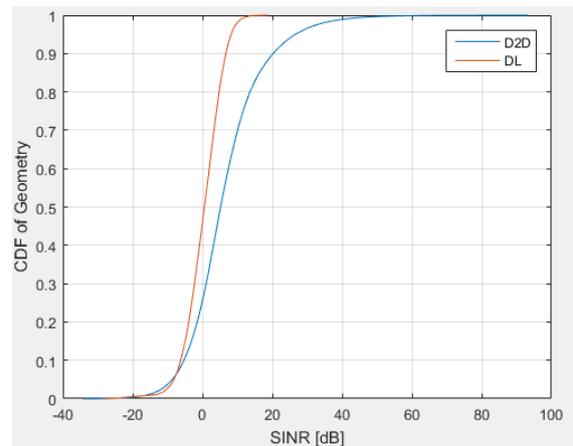


Figura 37 - CDF de Geometria em função SINR[dB] utilizando RR em D2D para o Cenário 4.

Neste cenário, conforme se ilustra nas figuras 36 e 37, a comunicação D2D apresenta melhores resultados de SINR do que a comunicação celular. Tendo a curva do CDF de Geometria atingido $\text{SINR} \geq 0\text{dB}$ com 28% dos utentes; enquanto que na comunicação celular só se consegue obter esse valor de SINR a partir de 40%. Neste cenário basicamente não existem diferenças em utilizar MaxCI ou RR porque as zonas D2D têm raio de 10m e os dispositivos estão todos muito próximos.

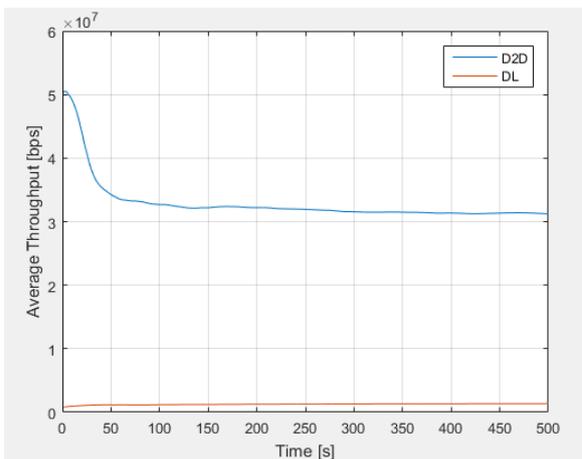


Figura 38 - Throughput médio utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 4.

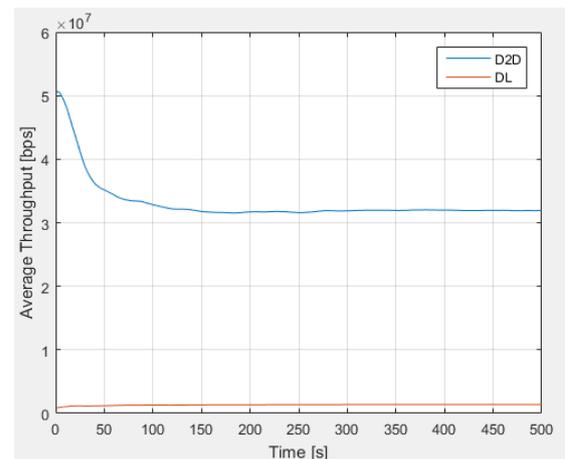


Figura 39 - Throughput médio utilizando RR em D2D para o Cenário 3.

Através das figuras 38 e 39, observamos que a comunicação D2D alcança uma média de 32Mbps de throughput, enquanto que a comunicação celular apenas alcança uma média de 1Mbps.

Interferência em Comunicações D2D

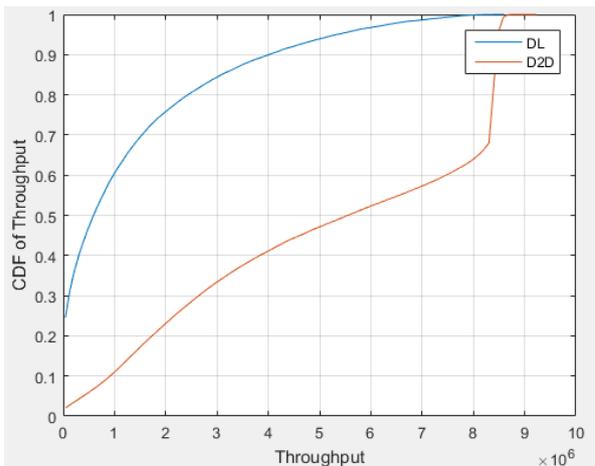


Figura 40 - CDF de Throughput utilizando MaxCI em D2D para o Cenário 4.

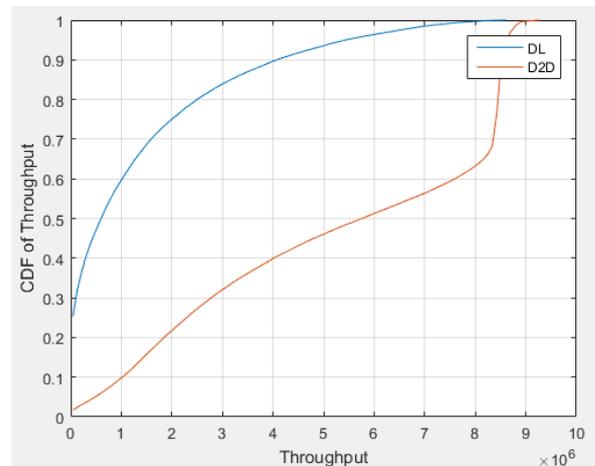


Figura 41- CDF de Throughput utilizando RR em D2D para o Cenário 4.

Observamos que no CDF de throughput para este cenário, a comunicação D2D continua a alcançar resultados melhores do que a comunicação celular, independentemente da comunicação D2D estar a utilizar MaxCI ou RR. Percebe-se que a partir de 1% de CDF de throughput a comunicação D2D consegue obter resultados de ritmos binários maiores do que zero, enquanto que na comunicação celular, isto só se consegue a partir dos 25% utentes. É de realçar que neste cenário 4 os móveis celulares têm uma maior distância em relação ao local onde está a eNB. Isto origina o aparecimento de mais interferência das outras células e uma consequente redução do throughput.

4.2.5 Cenário 5

Este cenário corresponde ao cenário 2, no qual existem 12 D2D_{TX} a transmitir com um raio máximo de 50m e em cada zona D2D_{TX} há 10 D2D_{RX} a receberem os dados. A grande diferença está nas potências de transmissão dos D2D_{TX} e dos eNBs, que passam para 27dBm e 43dBm, respetivamente. No cenário 2 eram de 24dBm e 46dBm respetivamente.

Neste cenário introduz-se a análise de CQI's (*channel quality indicators*). Segue abaixo a tabela com as informações de CQI's relacionados com os diferentes esquemas de modulação e codificação.

CQI index	Modulação	Tamanho de bloco (bits)	Eficiência espectral (bps/Hz)	Número de PRBs
0	Sem transmissão	0	0	0
1	QPSK	224	0.04	4
2	QPSK	504	0.10	9
3	QPSK	784	0.16	14
4	QPSK	1596	0.32	19
5	QPSK	2016	0.40	24
6	QPSK	4872	0.97	15
7	QPSK	5712	1.14	17
8	QPSK	7392	1.48	22
9	16QAM	9744	1.95	29
10	16QAM	11424	2.28	34
11	16QAM	14784	2.96	44
12	16QAM(2x2)	19656	3.92	26
13	16QAM(2x2)	24696	4.90	34
14	64QAM (2x2)	29484	5.90	47
15	64QAM (2x2)	37044	7.40	49

Tabela 8 - CQIs para os diferentes esquemas de modulação e codificação

Interferência em Comunicações D2D

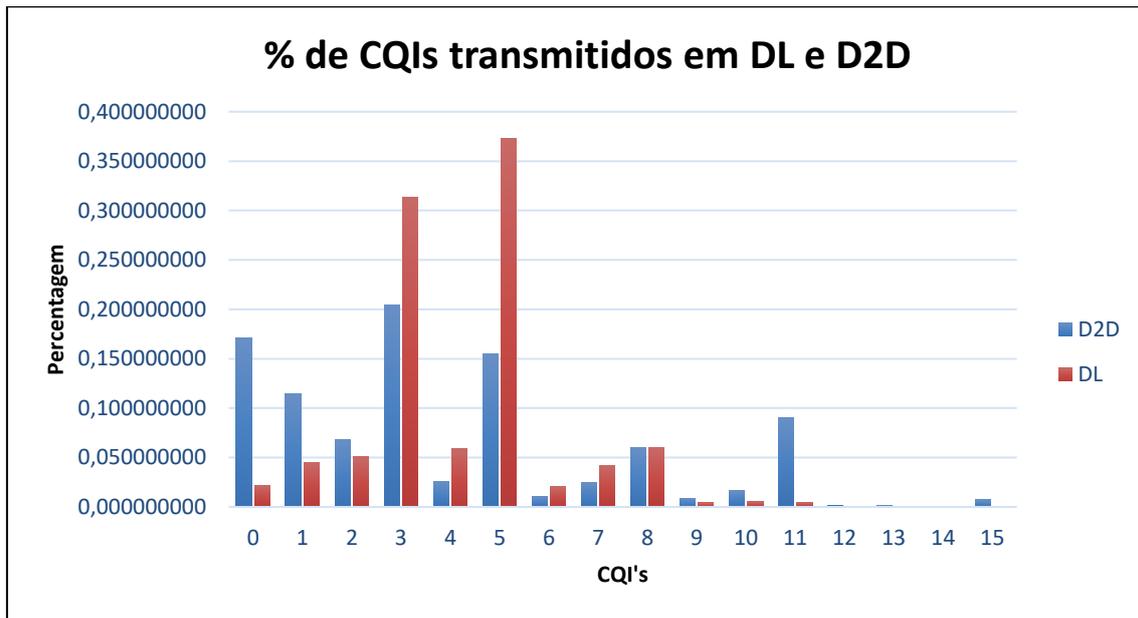


Figura 42 - Percentagem de CQI's Transmitidos em DL e D2D

Na figura 42 mostra-se a percentagem de CQIs transmitidos para as comunicações D2D e celulares. Esta distribuição está de acordo com os valores do CDF da SINR em função de SINR. Existe uma maior dispersão dos valores de SINR em dispositivos D2D do que nos celulares e isso está ilustrado na figura 42. A percentagem do CQI0 corresponde ao número de utentes que não transmite qualquer pacote o que está relacionado com os resultados do CDF do throughput.

Conforme se ilustra na figura 43, a redução de 40W para 20W na potência de transmissão das eNBs não altera em nada a curva da SINR do cenário 5 (20W) relativamente ao cenário 2 (40W). Contudo, o aumento da potência de transmissão de 250mW para 500mW nos dispositivos D2D provoca uma melhoria notória na SINR deste tipo de comunicação. Isso deve-se à relação entre o raio de 50m das zonas D2D em ambos os cenários, com a potência de transmissão. O aumento para o dobro da potência transmitida permitiu uma melhor cobertura sobretudo para os dispositivos D2D localizados na fronteira das zonas D2D aos quais corresponde os valores de SINR mais baixos. O mesmo não acontece no sistema celular pois a cobertura do raio de 289m é perfeitamente alcançável com 20W de potência transmitida por cada eNB.

Interferência em Comunicações D2D

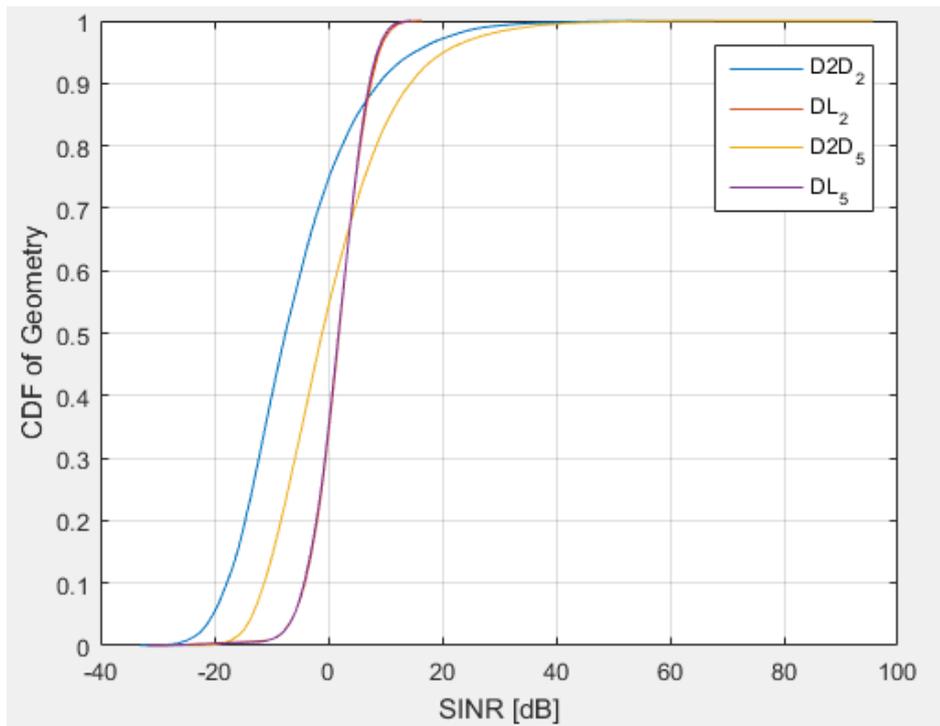


Figura 43 - CDF de Geometria versus SINR para cenários 5 e 2

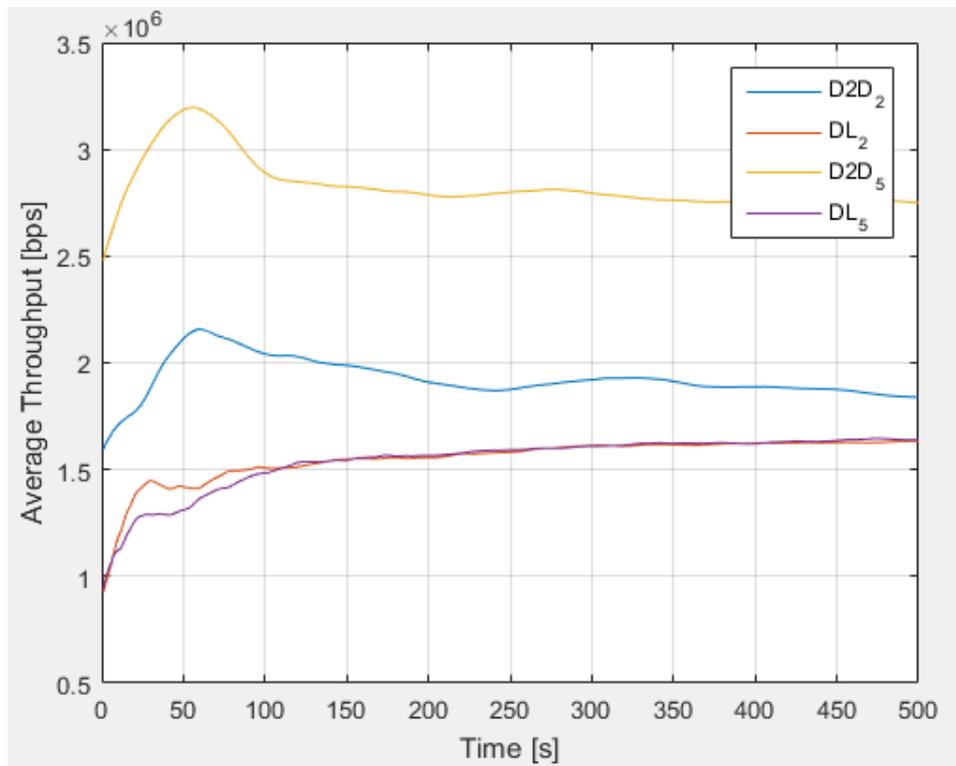


Figura 44 - Throughput médio versus tempo para os cenários 5 e 2.

Interferência em Comunicações D2D

Conforme se pode observar na figura 44, a redução de 40W para 20W na potência de transmissão das eNBs não altera em nada o valor do throughput médio ao longo do tempo dos móveis celulares. Isto já era esperado face à manutenção da curva da SINR do cenário 5 relativamente ao cenário 2. Era igualmente esperado que o aumento da potência de transmissão de 250mW para 500mW nos dispositivos D2D provocasse um aumento no throughput médio dos dispositivos D2D. De acordo com o gráfico este aumento é de cerca de 1.5, passa de 1.8 Mbps para 2.7 Mbps.

Pode-se observar na figura 45, que a redução de 40W para 20W na potência de transmissão das eNBs não altera em nada o valor do CDF do throughput onde quase 20% dos móveis transmite ritmos binários quase nulos. Esperava-se que o aumento para o dobro da potência nos dispositivos D2D originasse uma melhoria nas curvas do CDF do throughput. Como se pode observar há uma redução de dispositivos D2D que estão nas fronteiras das zonas e que transmitem ritmos quase nulos, passa de 48% para 39%. Mas esta melhoria afeta igualmente outros D2D que estão no meio das zonas. Apenas não se notam melhorias nos dispositivos muito próximos uns dos outros, porque a fonte de tráfego CBR não permite qualquer aumento de tráfego associado à mudança da potência transmitida. O ritmo desta fonte é constante e ronda os 37 Mbps para serem divididos por todos os dispositivos D2D. A fonte de tráfego do sistema celular é igual mas independente dos dispositivos D2D.

Interferência em Comunicações D2D

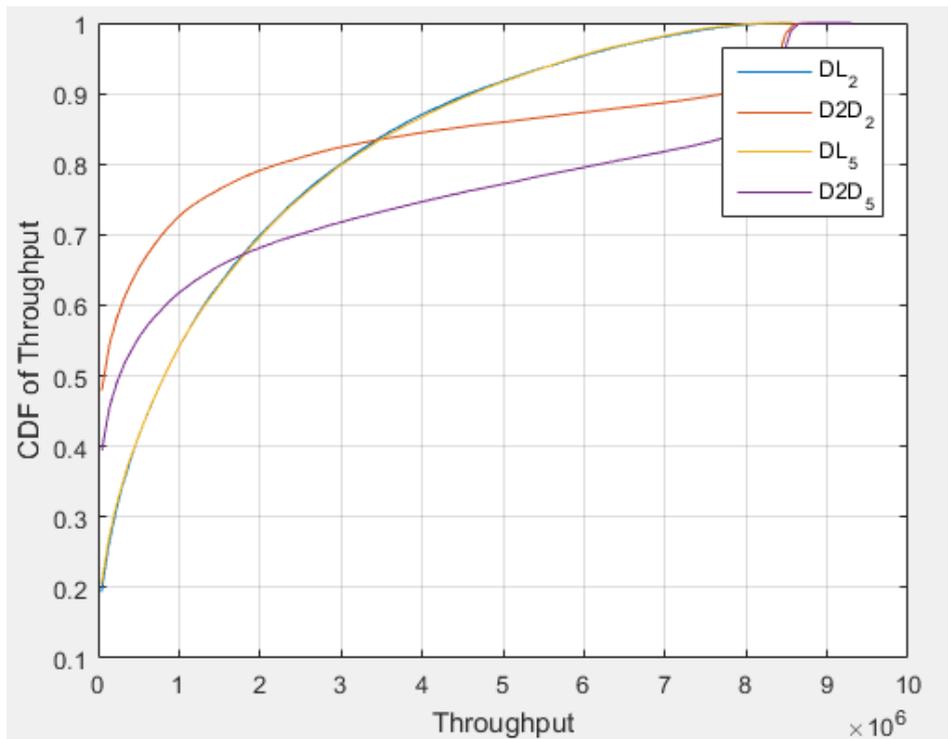


Figura 45 - CDF de Throughput para os cenários 5 e 2.

Neste cenário 5 foram analisados os atrasos dos pacotes, e comprovou-se o que já se esperava. Na comunicação entre dispositivos D2D o atraso na entrega dos pacotes é de cerca de 165ms. Enquanto que na comunicação celular regista-se um atraso mínimo dos pacotes que ronda os 225ms. Estes atrasos dependem também dos *schedulers* utilizados sendo constantes com o *scheduler* RR e com maior variação no MaxCI.

Capítulo 5

Conclusões

O presente capítulo sumariza as principais conclusões não só dos resultados obtidos das simulações mas também de outros capítulos, e por fim é apresentado o trabalho futuro que poderá ser realizado com base nesta dissertação.

5.1 Sumário dos Resultados

Esta dissertação de mestrado assumiu como objetivo compreender o potencial da comunicação D2D que deverá ser uma componente essencial na Quinta Geração de Comunicações Celulares (5G), analisando aspetos de interferência.

Para tal, esta análise apoiou-se no desenvolvimento de vários cenários da comunicação D2D dentro da estrutura de rede celular LTE-A usando simuladores já existentes, de sistema JAVA e de ligação em MatLab, que permitem compreender o comportamento da qualidade de comunicação D2D dentro da rede celular, podendo assim comparar-se o nível de sinal (SINR), a taxa de transmissão em função de tempo e performance (débito), no ambiente de um sistema celular LTE-A com a utilização de técnica de junção de controlo de potência e alocação de recursos rádio, de forma a mitigar as interferências.

No capítulo 2 realizou-se uma revisão de literatura, sobre a comunicação D2D e as interferências existentes na comunicação D2D. Na rede celular atual a comunicação é realizada do terminal para uma estação base e da estação base para o terminal destinatário. Mesmo que os dispositivos estejam próximos são obrigados a efetuar mais de um salto na transmissão de dados, o que poderá originar perdas de dados e atrasos na

Interferência em Comunicações D2D

transmissão. Nas fronteiras das células é onde existem maior interferência de sinal, devido à proximidade de células vizinhas e também é onde existe maior distância entre a estação base e o dispositivo o que implica em pouca potência na recepção, permitindo assim um registo de SINR com valores baixo.

A comunicação D2D pode ser uma boa solução para as situações em que os dispositivos estão próximos. Dado que a comunicação D2D permite a ligação direta entre dispositivos próximos um do outro, há apenas um salto na transmissão de dados, evitando também a necessidade de transmissão de potência elevada, o que levará a poupança de bateria dos dispositivos e menor atraso.

No capítulo 3 fez-se uma descrição dos diversos tipos de interferências das comunicações D2D, de que se ressalta as interferências serem em maior número do que as das comunicações celulares.

O trabalho prático foi desenvolvido no capítulo 4 e constou de quatro cenários com diferentes raios de cobertura das zonas com comunicação D2D mantendo-se sempre o mesmo número de dispositivos D2D igual a 120. Associado a uma redução/aumento do raio das zonas D2D, situadas sempre na fronteira da célula central do sistema celular hipotético com 19 eNBs, corresponde um aumento/redução do raio em que se colocam os móveis celulares.

Exemplificando, no primeiro cenário, há 6 zonas de comunicação D2D, cada uma delas com raio de 100m e há 20 dispositivos em cada zona. Para a comunicação celular das células o raio é sempre de 289m, tendo os seus utentes sido colocados a uma distância do seu raio menos o raio D2D, isto é, $289-100 = 189\text{m}$, o que implica que os utentes celulares estarão muito próximos da sua eNB. A potência de transmissão da eNB é de 40W e há 10 móveis em cada setor, enquanto para os terminais $D2D_{TX}$ transmite-se uma potência de 0.25W numa distância máxima de 100m. Na comunicação D2D os seus utentes terão interferências das ligações celulares e também das próprias ligações D2D.

Interferência em Comunicações D2D

Neste cenário que é o pior da comunicação D2D, verificou-se que o *throughput* e a SINR das comunicações celulares é superior ao das ligações D2D. Daí percebe-se que neste cenário a comunicação D2D não conduz benefício para rede celular global.

Contudo, o sistema foi melhorando quando se reduziu a distância entre D2D_{TX} e D2D_{RX}, aumentando o número dos D2D_{TX} e reduzindo o número de D2D_{RX} para cada D2D_{TX}, mantendo sempre o total de 120 dispositivos. No cenário 4 há 60 D2D_{TX} a transmitir num raio de 10m para apenas 2 D2D_{RX}. Desta forma temos os celulares a poderem-se afastar da eNB até uma distância de $289 - 10 = 279$ m., o que implica numa degradação das comunicações celulares. Neste cenário há uma qualidade muito superior das comunicações D2D comparativamente à celular.

Por fim, para a aumentar a complexidade da análise, criou-se um cenário (cenário 5), que permitiu comparar a percentagem de transmissão de CQI's da comunicação D2D e da celular. Aumentou-se a potência de transmissão D2D para o dobro (de 250mW para 500mW) e reduziu-se a potência de transmissão celular para metade (de 40W para 20W). Neste cenário verificou-se que não ocorreram quaisquer mudanças no desempenho da rede celular devido à redução de potência mas registaram-se melhorias no desempenho dos dispositivos D2D devido a esse aumento da potência. Concluindo-se daqui que há uma forte relação entre o desempenho dos D2D e a sua potência de transmissão.

Neste mesmo cenário foi também analisado os atrasos dos pacotes, e comprovou-se o que já se esperava. Há uma redução nos atrasos das comunicações entre dispositivos D2D relativamente aos das comunicações celulares.

É de salientar que na comparação dos *schedulers* a serem utilizados na comunicação D2D, o MaxCI apresenta melhores resultados em comparação com o *Round Robin*, e isto deve-se ao facto do MaxCI beneficiar os utilizadores que estão na proximidade. Isso é o ideal para a comunicação D2D, visto que ela depende fortemente da distância entre dispositivos face à reduzida potência de transmissão dos dispositivos D2D. No RR dá-se

a mesma prioridade a todos os utentes, e isso origina que dispositivos afastados comuniquem com igual prioridade à dos que estão próximos uns dos outros.

Através dos resultados obtidos, foi possível comprovar que a comunicação D2D deverá trazer muitos benefícios para a rede celular em geral, contudo, requerendo uma especial atenção no caso de gestão de interferências, havendo agora um maior tipo de interferências do que quando apenas existia a rede celular, obrigando à implementação de novas técnicas de mitigação de interferências.

5.2 Trabalho Futuro

Nesta dissertação, a implementação das comunicações D2D foi feita com base no simulador LTE-A já existente em JAVA, e neste simulador a comunicação é feita apenas no sentido descendente (*downlink*). Numa rede celular a comunicação é realizada nos sentidos ascendente e descendente (*uplink e downlink*) pelo que se torna necessário introduzir no simulador a ligação ascendente.

Deste modo, propõe-se para trabalho futuro, a implementação de um simulador que permita a comunicação em ambos os sentidos (*uplink e downlink*) de forma a analisar ambas as ligações. As comunicações D2D devem partilhar igualmente a mesma banda de frequências usada pelos móveis celulares na ligação ascendente.

Outros estudos possíveis são a cobrança das operadoras móveis, para os utentes que utilizam a comunicação D2D.

O estudo aprofundado dos mecanismos de segurança na comunicação D2D, afim de viabilizar a comunicação D2D é mais um possível caso para estudo no futuro.

Bibliografia

- [1] G. A. L. I. Safdar *et al.*, “Interference Mitigation in D2D Communication Underlying LTE-A Network,” vol. 4, pp. 7967–7987, 2016.
- [2] E. Summary, “Cisco Visual Networking Index : Global Mobile Data Traffic Forecast Update , 2016 – 2021,” pp. 2016–2021, 2017.
- [3] Z. Yue, W. Sun, P. Li, M. U. Rehman, and X. Yang, “Internet of Things : Architecture , Technology and Key Problems in Implementation,” no. Cisp, pp. 1298–1302, 2015.
- [4] H. Atta, U. Mustafa, M. A. Imran, S. Member, M. Z. Shakir, and A. Imran, “Separation Framework : An Enabler for Cooperative and D2D Communication for Future 5G Networks,” vol. 18, no. 1, pp. 419–445, 2016.
- [5] X. Lin, J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Ratasuk, “An overview of 3GPP device-to-device proximity services,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 4, pp. 40–48, 2014.
- [6] P. Gandotra and R. K. Jha, “Device-to-Device Communication in Cellular Networks : A Survey Author ’ s Accepted Manuscript,” *J. Netw. Comput. Appl.*, no. July, 2016.
- [7] A. Gupta and R. K. Jha, “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [8] “3gpp EVOLUTION OF WIRELESS COMMUNICATION - Pesquisa Google.” [Online]. Available: https://www.google.pt/search?q=3gpp+EVOLUTION+OF+WIRELESS+COMMUNICATION&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEWjCrPCiwLTVAhXILhoKHdWSBikQ_AUICigB&biw=1366&bih=589#imgdii=DOuXpCZWb7vToM:&imgcr=9LXU570EeLrk7M: [Accessed: 31-Jul-2017].
- [9] J. Lee, Y. Su, and C. Shen, “A Comparative Study of Wireless Protocols :,” pp. 46–51, 2007.
- [10] J. Feng, “Device-to-Device Communications in LTE-Advanced Network Télécom Bretagne Device-to-Device Communications in LTE-Advanced Network,” 2014.
- [11] “O que é Wi-fi Direct? Entenda a tecnologia e acabe com dúvidas | Notícias | TechTudo.” [Online]. Available: <http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2014/11/o-que-e-wi-fi-direct-entenda-tecnologia-e-acabe-com-duvidas.html>. [Accessed: 29-Jul-2017].
- [12] H. A. Mustafa, M. Z. Shakir, M. A. Imran, A. Imran, and R. Tafazolli, “Coverage Gain and Device-to-Device User Density: Stochastic Geometry Modeling and

- Analysis,” vol. 19, no. 10, pp. 1742–1745, 2015.
- [13] D. Feng, L. Lu, Y. Yuan-Wu, G. Li, and S. Li, “Device-to-device communications in cellular networks,” *IEEE Commun. Mag.*, no. April, pp. 49–55, 2014.
- [14] A. Asadi, S. Member, Q. Wang, S. Member, and V. Mancuso, “A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks,” vol. 16, no. 4, pp. 1801–1819, 2014.
- [15] D. Zhu, S. Member, J. Wang, and A. L. Swindlehurst, “Downlink Resource Reuse for Device-to-Device Communications Underlying Cellular Networks,” vol. 21, no. 5, pp. 531–534, 2014.
- [16] O. In, “Device-to-Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks,” no. December, pp. 42–49, 2009.
- [17] D. Feng, L. Lu, Y. Yuan-Wu, G. Ye Li, S. Li, and G. Feng, “Device-to-device communications in cellular networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 4, pp. 49–55, 2014.
- [18] G. Fodor, E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, N. Reider, and G. Miklós, “Design Aspects of Network Assisted Device-to-Device Communications,” no. March, pp. 170–177, 2012.
- [19] P. Mach, Z. Becvar, and T. Vanek, “In-Band Device-to-Device Communication in OFDMA Cellular Networks : A Survey and Challenges,” vol. 17, no. 4, pp. 1885–1922, 2015.
- [20] B. Raghothaman, E. Deng, R. Pragada, G. Sternberg, T. Deng, and K. Vanganuru, “Architecture and protocols for LTE-based device to device communication,” *2013 Int. Conf. Comput. Netw. Commun. ICNC 2013*, pp. 895–899, 2013.
- [21] B. W. Khoueiry and M. R. Soleymani, “A Novel Coding Strategy for Device-to-Device Communications,” pp. 200–205, 2015.
- [22] T. Peng, Q. Lu, H. Wang, S. Xu, and W. Wang, “Interference Avoidance Mechanisms in the Hybrid Cellular and Device-to-Device Systems,” pp. 617–621, 2009.
- [23] J. Gu, S. J. Bae, B. Choi, and M. Y. Chung, “Dynamic Power Control Mechanism for Interference Coordination of Device-to-Device Communication in Cellular Networks,” pp. 71–75, 2011.
- [24] X. Zhu, S. Wen, G. Cao, X. Zhang, and D. Yang, “QoS-based resource allocation scheme for device-to-device (D2D) radio underlying cellular networks,” *2012 19th Int. Conf. Telecommun. ICT 2012*, no. Ict, 2012.
- [25] Y. Qin, M. Ding, M. Zhang, H. Yu, and H. Luo, “Relaying robust beamforming for device-to-device communication with channel uncertainty,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 10, pp. 1859–1862, 2014.

- [26] X. Ge *et al.*, “Multi-User Massive MIMO Communication Systems Based on Irregular Antenna Arrays,” vol. 15, no. 8, pp. 5287–5301, 2016.
- [27] B. Cho, K. Koufos, and J. Riku, “Spectrum allocation and mode selection for overlay D2D using carrier sensing threshold.”
- [28] M. Usman, A. A. Gebremariam, U. Raza, and F. Granelli, “A Software-Defined Device-to-Device Communication Architecture for Public Safety Applications in 5G Networks,” pp. 1649–1654, 2015.
- [29] J. Hong, S. Park, H. Kim, S. Choi, and K. B. Lee, “Analysis of Device-to-Device Discovery and Link Setup in LTE Networks,” pp. 2856–2860, 2013.
- [30] H. Elsayw and E. Hossain, “Analytical Modeling of Mode Selection and Power Control for Underlay D2D Communication in Cellular Networks,” pp. 1–14.
- [31] S. Baidya and M. Levorato, “Content-Based Interference Management for Video Transmission in D2D Communications Underlying LTE,” 2017.
- [32] R. Tanbourgi, J. Holger, and F. K. Jondral, “Cooperative Interference Cancellation using Device-to-Device Communications,” pp. 1–12, 2014.
- [33] S. Mumtaz, K. Mohammed, S. Huq, and J. Rodriguez, “Coordinated Paradigm for D2D Communications,” pp. 718–723, 2014.
- [34] H. Sun, M. Wildemeersch, M. Sheng, and T. Q. S. Quek, “D2D enhanced heterogeneous cellular networks with dynamic TDD,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 8, pp. 4204–4218, 2015.
- [35] R. Yin, G. Yu, H. Zhang, Z. Zhang, and G. Y. Li, “Decentralized Interference Coordination for D2D Communication Underlying Cellular Networks,” pp. 2626–2631, 2015.
- [36] M. N. Tehrani, M. Uysal, and H. Yanikomeroglu, “Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks : Challenges , Solutions , and Future Directions,” no. May, 2014.
- [37] X. Hu, Q. Wang, W. Wei, and L. Yang, “Device-to-Device Communication Underlying MU-MIMO in Multi-cell Networks with Interference Alignment,” 2016.
- [38] M. Simsek, A. Merwaday, and N. Correal, “Device-to-Device Discovery Based on 3GPP System Level Simulations,” pp. 555–560, 2013.
- [39] S. Huang, B. Liang, and J. Li, “Distributed Interference and Delay Aware Design for D2D Communication in Large Wireless Networks With Adaptive Interference Estimation,” vol. 16, no. 6, pp. 3924–3939, 2017.
- [40] E. Zihan, S. Member, K. W. Choi, D. I. Kim, and S. Member, “Distributed Random Access Scheme for Collision Avoidance in Cellular Device-to-Device Communication,” vol. 14, no. 7, pp. 3571–3585, 2015.

- [41] M. Zulhasnine, C. Huang, and A. Srinivasan, “Efficient Resource Allocation for Device-to-Device Communication Underlying LTE Network,” *IEEE 6th Int. Conf. Wirel. Mob. Comput. Netw. Commun. Effic.*, pp. 368–375, 2010.
- [42] L. Wei, R. Q. Hu, Y. Qian, and G. Wu, “Enable Device-to-Device Communications Underlying Cellular Networks: Challenges and Research Aspects,” no. June, pp. 90–96, 2014.
- [43] O. For, “Enabling Device-to-Device Communications in Millimeter-Wave 5G Cellular Networks,” no. January, pp. 209–215, 2015.
- [44] Y. A. Sambo, M. Z. Shakir, E. Serpedin, K. A. Qaraqe, M. A. Imran, and B. Ahmed, “Energy Efficiency Improvements in HetNets by Exploiting Device-to-Device Communications,” pp. 2–6, 2014.
- [45] M. U. Rehman, X. Chen, S. Member, C. G. Parini, Z. Ying, and S. Member, “Evaluation of a Statistical Model for the Characterization of Multipath Affecting Mobile Terminal GPS Antennas in Sub-Urban Areas,” vol. 60, no. 2, pp. 1084–1094, 2012.
- [46] M. Jo, “H ETEROGENEOUS C LOUD R ADIO A CCESS N ETWORKS D EVICE - TO -D EVICE -B ASED H ETEROGENEOUS R ADIO A CCESS N ETWORK A RCHITECTURE FOR M OBILE C LOUD C OMPUTING,” no. June, pp. 50–58, 2015.
- [47] Y. Zhang, J. Zheng, S. Member, P. Lu, C. Sun, and S. Member, “Interference Graph Construction for Cellular D2D Communications,” vol. 66, no. 4, pp. 3293–3305, 2017.
- [48] P. Marinier and D. Pani, “INTERFERENCE MANAGEMENT FOR LTE SYSTEMS Background System Model Interference Management Techniques Methodology Experimental results Summary and Conclusion,” pp. 1–16, 2013.
- [49] M. R. Communications, U. Kingdom, and M. Radio, “Interference Management for Multiple Device-to- Device Communications Underlying Cellular Networks,” no. September, pp. 223–227, 2013.
- [50] C. Femtocells, H. O. Kpojime, and G. A. Safdar, “Interference Mitigation in,” vol. 17, no. 3, pp. 1511–1534, 2015.
- [51] C. M. Shamrao, “Interference Reduction by Switching the Underlying Transmitter in D2D Communications,” pp. 417–418, 2017.
- [52] P. Jänis, V. Koivunen, C. B. Ribeiro, K. Doppler, and K. Hugl, “Interference-avoiding MIMO schemes for device-to-device radio underlying cellular networks,” *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, pp. 2385–2389, 2009.
- [53] R. Zhang, X. Cheng, L. Yang, and B. Jiao, “Interference-Aware Graph Based Resource Sharing for Device-to-Device Communications Underlying Cellular Networks,” 2013.

- [54] H. Kwon, J. Lee, and I. Kang, “Interference-Aware Interference Mitigation for Device-to-Device Communications,” pp. 0–4, 2014.
- [55] H. Pang, P. Wang, X. Wang, F. Liu, and N. N. Van, “Joint Mode Selection and Resource Allocation Using Evolutionary Algorithm for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks,” vol. 8, no. 11, 2013.
- [56] A. Ramezani-kebrya *et al.*, “Joint Power Optimization for Device-to-Device Communication in Cellular Networks with Interference Control,” vol. 1276, no. c, pp. 1–17, 2017.
- [57] Q. Technologies, “LTE Direct Always-on Device-to- Device Proximal Discovery,” no. August, pp. 1–13, 2014.
- [58] D. Tsolkas, E. Liotou, N. Passas, and L. Merakos, “LTE-A Access , Core , and Protocol Architecture for D2D Communication,” 2014.
- [59] K. Akkarajitsakul, P. Phunchongharn, E. Hossain, and V. K. Bhargava, “Mode Selection for Energy-Efficient D2D Communications in LTE-Advanced Networks : A Coalitional Game Approach,” pp. 488–492, 2012.
- [60] S. M. Evicce *et al.*, “Novel Concepts for Device-to-Device Communication Using Network Coding,” no. April, pp. 32–39, 2014.
- [61] M. Sheng *et al.*, “On-Demand Scheduling : Achieving QoS Differentiation for D2D Communications,” no. July, pp. 162–170, 2015.
- [62] L. Huang, Z. Su, Z. Gao, Z. Lin, T. Hu, and M. Liwang, “OOP-based Device-to-Device Communication Simulator Design of LTE Network Yc $\diamond\diamond$ ’,” no. Icese, pp. 294–297, 2014.
- [63] L. Lei, Z. Zhong, C. Lin, and X. Shen, “Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 19, no. 3, pp. 96–104, 2012.
- [64] F. Teng, D. Guo, and M. L. Honig, “Power Control Based on Interference Pricing in Hybrid D2D and Cellular Networks,” pp. 676–680, 2012.
- [65] K. J. Zou *et al.*, “Proximity Discovery for Device-to-Device Communications over a Cellular Network,” no. June, pp. 98–107, 2014.
- [66] H. S. Chae, J. Gu, B. Choi, and M. Y. Chung, “Radio Resource Allocation Scheme for Device-to-Device Communication in Cellular Networks Using Fractional Frequency Reuse,” vol. 1, no. October, pp. 58–62, 2011.
- [67] L. Melki, S. Najeh, and H. Besbes, “Radio Resource Allocation Scheme for Intra-Inter-Cell D2D Communications in LTE-A,” no. Ici, pp. 1515–1519, 2015.
- [68] W. Zhao and S. Wang, “Resource Allocation for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks: An Alternating Optimization Method,” vol. 19, no. 8, pp. 1398–1401, 2015.

- [69] J. Huang, Y. Zhao, and K. Sohrawy, “Resource Allocation for Intercell Device-to-Device Communication Underlying Cellular Network: A Game-Theoretic Approach,” 2014.
- [70] Q. Duong, Y. Shin, and O. S. Shin, “Resource allocation scheme for device-to-device communications underlying cellular networks,” *2013 Int. Conf. Comput. Manag. Telecommun. ComManTel 2013*, no. August, pp. 66–69, 2013.
- [71] C. Yu, K. Doppler, B. Ribeiro, and O. Tirkkonen, “Resource Sharing Optimization for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks,” vol. 10, no. 8, pp. 2752–2763, 2011.
- [72] D. Verenzuela and G. Miao, “Scalable D2D Communications for,” vol. 16, no. 6, pp. 3435–3447, 2017.
- [73] S. M. Evice, T. O. Mart, M. Alam, D. Yang, J. Rodriguez, and R. A. Abdalameed, “Secure Device-to-Device Communication in LTE-A,” no. April, pp. 66–73, 2014.
- [74] Y. Li, “Social-Aware D2D Communications: Qualitative Insights and Quantitative Analysis,” no. June, pp. 150–158, 2014.
- [75] B. Zhang, Y. Li, D. Jin, P. Hui, and Z. Han, “Social-Aware Peer Discovery for D2D Communications Underlying Cellular Networks,” vol. 14, no. 5, pp. 2426–2439, 2015.
- [76] B. Cho, K. Koufos, R. Jäntti, Z. Li, and M. A. Uusitalo, “Spectrum Allocation for Multi-Operator Device-to-Device Communication,” pp. 5454–5459, 2015.
- [77] M. Han, B. Kim, and J. Lee, “Subchannel and Transmission Mode Scheduling for D2D Communication in OFDMA Networks,” 2012.
- [78] H. Xing and S. Hakola, “The Investigation of Power Control Schemes for a Device – to-Device Communication integrated into OFDMA Cellular System,” pp. 1775–1780, 2010.
- [79] Y. Li, Z. Zhang, and H. Wang, “Transmission Mode Selection and Interference Mitigation for Social Aware D2D Communication,” 2016.

Interferência em Comunicações D2D