



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

Modelagem e Avaliação de Desempenho do Modo Inband D2D Overlay em Redes
LTE-A

Helio de Paula Moura

Orientador

Dr. Carlos Alberto Vieira Campos

Co-orientador

Dr. Jefferson Elbert Simões

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2018

Modelagem e Avaliação de Desempenho do Modo Inband D2D Overlay em Redes
LTE-A

HELIO DE PAULA MOURA

DISSERTAÇÃO APRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE MESTRE PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFOR-
MÁTICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (UNI-
RIO). APROVADA PELA COMISSÃO EXAMINADORA ABAIXO ASSINADA.

Aprovada por:

Dr. Carlos Alberto Vieira Campos — UNIRIO

Dr. Jefferson Elbert Simões — UNIRIO

Dr. Sidney Cunha de Lucena — UNIRIO

Dr. Guilherme Dutra Gonzaga Jaime — IEN

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2018.

Moura, Helio de Paula

B118 Reconhecimento de Padrões em Requisitos de Sistemas de Informação de Sistemas Distribuídos / Helio de Paula Moura, 2018.
xiii, 187f.

Orientador: Cirus Macedo Hackenberg
Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

1. Sistemas de Informação - Requisitos - Reconhecimento de Padrões
I. Hackenberg, Cirus Macedo. II. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (2003-). Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Curso de Mestrado em Informática. Título.

CDD - 004.678

*Dedico essa dissertação à minha esposa
Raquel, que me deu apoio e incentivo nas
horas difíceis de desânimo e cansaço.*

Agradecimentos

Agradeço a minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que me deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Obrigado pela paciência, pelo incentivo, pela força e principalmente pelo carinho. Valeu a pena toda a distância, todo sofrimento, todas as renúncias. As minhas irmãs, que mesmo longe estiveram presentes e estão próximas de mim, fazendo tudo valer mais a pena. Aos meus sobrinhos Thaís, Thiago, Gustavo, Guilherme e Lavínea, simplesmente por existirem e tornarem cada dia melhor e mais divertido.

À minha esposa Raquel, pessoa com quem amo partilhar a vida. Obrigado pelo carinho, companheirismo, paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada dia.

Aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Com vocês as pausas entre um parágrafo e outro permitiram a força necessária para a produção dessa obra. Muito obrigado mesmo.

Agradeço também ao professor Carlos Alberto Vieira Campos, que me recebeu de braços abertos, ainda como aluno de matéria isolada, abraçou as minhas ideias de projeto de pesquisa, sempre atento nas suas orientações e, com sua vasta experiência acadêmica, permitiu a produção deste trabalho científico e ao professor Jefferson Elbert Simões, que foi de suma importância para a elaboração desse trabalho, atento aos diversos detalhes, demonstrando excelência e profundo conhecimento em diversos pontos tratados nessa dissertação. Muito obrigado pelo apoio e também confiança.

Por fim, apresento meus agradecimentos a CAPES, pelo apoio financeiro, sem o qual não teria sido possível desenvolver esta pesquisa e ao PPGI UNIRIO por tê-la abrigado.

Moura, Helio de Paula **Modelagem e Avaliação de Desempenho do Modo Inband D2D Overlay em Redes LTE-A**. UNIRIO, 2018. 95 páginas. Dissertação de Mestrado. Departamento de Informática Aplicada, UNIRIO.

RESUMO

O tráfego de dados móveis aumentou exponencialmente nos últimos anos, principalmente devido ao surgimento e popularização do *smartphone*. Com isso, surge a necessidade do advento de novas tecnologias que possam suportar essa crescente demanda e que garanta a entrega de altas taxa de dados, dentro da rede de acesso sem fio existente, de forma eficiente. O mecanismo *Device-to-Device* (D2D) nas redes celulares é visto como uma possível solução, a partir da possibilidade de comunicação direta entre os dispositivos, utilizando o canal de rádio celular (*inband*) ou um espectro não licenciado (*outband*). Usuários próximos o suficiente para estabelecer uma comunicação poderão, a partir dessa tecnologia, se comunicar sem a necessidade de intermediação da eNodeB. A partir desse mecanismo, pode-se obter ganhos de transmissão, melhor desempenho, ganho de energia, ganho espectral, entre outros.

No entanto, a integração da comunicação D2D em sistemas celulares impõe novos desafios tecnológicos. A mobilidade, por exemplo, apresenta amplos efeitos na rede. Em função disso, muitos trabalhos abordam questões que vão desde o tratamento da interferência até o desenvolvimento de mecanismos de controle visando a viabilidade da comunicação D2D.

Nesse contexto, propomos um modelo que, a partir de simulação matemática, nos permitisse avaliar o desempenho do mecanismo D2D em uma rede celular LTE-A na presença da mobilidade. Para este fim, foi desenvolvido um código utilizando a linguagem *Python*. Após sua implementação foram elaborados cenários de redes, baseados em parâmetros reais, e, finalmente, foram extraídos os resultados. A partir da análise dos resultados obtidos, foi observado que, de uma forma geral, houve um ganho de performance ao utilizar o D2D, quando comparado a situações sem o seu uso.

Palavras-chave: Redes Sem Fio, Redes Celulares, Dispositivos de Comunicação, Simulação Matemática, LTE-A, D2D.

ABSTRACT

Mobile data traffic has grown exponentially in the last few years mainly because of the arise and popularization of smartphones. For this reason, there is an increasing need for new technologies that may support efficiently a growing demand, with high data rate, in the wireless network already existing. The D2D mechanism may be a solution in cellular networks as it permits direct communication between two devices using cellular radio channels or unlicensed spectrum. The use of this technology will allow close enough users to establish communication in an eNodeB independent manner. The D2D mechanism may increase transmission gain, performance, energy gain, spectral gain, and others.

However, implementation of D2D communication in cellular networks creates new technological challenges. Mobility, for example, causes great impacts in network. Therefore, many papers discuss aspects of mobility, ranging from interference treatment to the development of mechanisms for controlling D2D communication.

In this context, we propose a mathematics simulation model to evaluate the performance of D2D mechanism in a LTE-A cellular network in the presence of mobility. In order to simulate D2D communication in LTE-A networks, we developed a *Python* code. After its implementation, some network scenarios were elaborated based on real parameters, and the results were extracted. Results analysis demonstrated that, in general, D2D enhances performance in comparison to non-D2D scenarios.

Keywords: Wireless Networks, Mobile Networks, Communication Devices, Mathematics Simulation, LTE-A, D2D.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivo e Contribuição	4
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados	6
2.1	Considerações Iniciais	6
2.2	Aspectos Técnicos da Telefonia Celular	7
2.3	O Surgimento das Gerações de Telefonia Móvel	10
2.4	1ª Geração de Telefonia Móvel	10
2.5	2ª Geração de Telefonia Móvel	11
2.6	3ª Geração de Telefonia Móvel	12
2.7	4ª Geração de Telefonia Móvel	14
2.7.1	O Padrão LTE	15
2.7.2	O Padrão LTE-A	17
2.7.3	O mecanismo D2D	18
2.7.3.1	Modos de Comunicação D2D	20

2.7.3.2	Mecanismo D2D - Cenários de Rede	22
2.8	A próxima geração de telefonia móvel (5G)	23
2.9	Trabalhos relacionados	25
2.10	Apresentação do Problema	27
3	Teoria Matemática	29
3.1	Espaços métricos	29
3.2	Processos Estocásticos	30
3.3	Processo de Poisson	31
3.4	Processo Ponto Poisson (PPP)	32
3.5	Movimento Browniano	33
3.6	Teoria de Grafos	34
3.7	Teoria estatística e teste t-student	36
4	Criação, Análise e Implementação do modelo	39
4.1	Representação de Antenas e Usuários	39
4.2	Áreas de Cobertura	40
4.3	Mobilidade dos UEs	41
4.4	Representação de Redes por Grafos	42
4.5	Estados dos Usuários	43
4.6	Análise do Modelo	43
4.7	Métricas usadas	44
4.8	Implementação	45
5	Avaliação de desempenho	47
5.1	Cenários de Rede	47

5.2	Análise dos resultados	48
5.2.1	Características de simulação e construção de gráficos	48
5.2.2	Variação da cobertura da eNodeBs	49
5.2.3	Variação da densidade das eNodeB's	51
5.2.4	Variação da densidade de UEs	52
5.2.5	Variação da mobilidade dos UEs	54
5.2.6	Variação do alcance D2D	54
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	57
	Referências Bibliográficas	58
A	Código Implementado em PYTHON	71
A.1	Criação da Classe e Funções	71
A.2	Parametrização com valores reais de rede	73
A.3	Conversões para a área do modelo	73
A.4	Normalizações	74
A.5	Código principal - Em função dos parâmetros	74
A.6	Código principal - Em função do tempo	76

Lista de Figuras

2.1	Um sistema de telefone sem fio	7
2.2	Células em redes de telefonia móvel.	8
2.3	Ilustração da arquitetura celular	9
2.4	Arquitetura GSM	12
2.5	Arquitetura da rede de telefonia móvel 3G UMTS	13
2.6	Arquitetura conceitual LTE	16
2.7	Novas funcionalidades do LTE-A	18
2.8	D2D em redes celulares LTE-A	21
2.9	Modo de comunicação D2D e a alocação de espectro	21
2.10	D2D em redes celulares LTE-A	22
2.11	Visão de uma célula com múltiplas antenas <i>Relay</i>	24
3.1	Exemplo de PPP	33
3.2	Exemplo de grafo	35
3.3	Adjacência de arestas	35
4.1	Esquemática da cobertura celular de cada antena	41
4.2	Esquemática da cobertura celular de cada antena	42
4.3	Exemplo de cenário esparsos e densos (eNodeB)	44

5.1	Varição do alcance da eNodeB com $\rho_a = 0.4$	50
5.2	Varição no tempo com $\rho_a = 0.4$ e $\Delta t = 2s$	50
5.3	Varição do alcance da eNodeB com $\rho_a = 1.0$	51
5.4	Varição no tempo com $\rho_a = 1.0$ e $\Delta t = 2s$	52
5.5	Varição da densidade de antenas	52
5.6	Avaliação da média amostral ao longo do tempo com $\Delta t = 2s$	53
5.7	Varição da densidade de usuários $\rho_a = 0.4$	53
5.8	Varição da densidade de usuários $\rho_a = 1.0$	54
5.9	Varição da mobilidade dos usuários com $\rho_a = 0.4$	55
5.10	Varição da mobilidade dos usuários com $\rho_a = 1.0$	55
5.11	Varição da mobilidade dos usuários com $\rho_a = 0.4$	56
5.12	Varição da mobilidade dos usuários com $\rho_a = 1.0$	56

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre MANET's e comunicações D2D	19
2.2	Comparação do D2D com WLAN e <i>Bluetooth</i>	20
2.3	Comparação das gerações: 1G ao 5G	24
3.1	Escala de Símbolos para cada valor de p	38
5.1	Valores Típicos	48

Lista de Nomenclaturas

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Forth Generation
5G	Fifth Generation
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
APN	Access Point Name
AuC	Autentication Center
BM	Brownian Motion
BSC	Base Station Controller
CAPEX	Capital Expenditures
CDMA	Code Division Multiple Access
CDR	Call Data Record
D2D	Device-to-Device
DL	Downlink
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
EIR	Equipment Identify Register
eNodeB	enhanced Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Duplex Division
FDM	Frequency Division Modulation
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GGSN	GateWay GPRS Support Node

GMSC	Gateway Mobile Switching Center
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System Mobile
HLR	Host Local Registrator
HMM	Hora de Maior Movimento
HSS	Home Subscriber Server
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IMT	International Mobile Communication
IMTS	Improved Mobile Telephone System
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	International Telecommunication Union
JBM	Jump Brownian Motion
KPI	Key Performance Indication
LC	Large Cells
LF	Lévy Flight
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MANETs	Mobile Adhoc Networks
MCM	Multi Carrier Modulation
MGW	Media GateWay
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Message Service
MSC	Mobile Switching Center
MTS	Mobile Telephone Service
OFDM	Frequency Division Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditures
PCRF	Policy and Charge Rules Function
PDN	Packet Data Network
PDSN	Packet Data Service Node
P-GW	Gateway Packet Data Network
P-GW	Packet data network Gateway
PMM	Período de Maior Movimento
PPP	Poisson Process Pontual
ProSe	Proximity Services

PSTN	Public switched telephone network
QoS	Quality of Service
RDW	Random Direction Model
RNC	Radio Network Control
RWP	Random WayPoint
SAE	System Architecture Evolution
SAE-GW	Gateway System Architecture Evolution
SC	Small Cells
SC-FDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Serving-Gateway
SIM	Subscriber Identity Module
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SIP	Session Initial Protocol
SMS	Short Message Service
UE	User Equipament
UHF	Ultra Hig Frequency
UL	UpLink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VHF	Very High Frequency
VLR	Visitor Location Register
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoLTE	Voice over LTE
W-CDMA	Wideband Code-Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WT	Wireless Telegraphy

Lista de Símbolos e Unidades

SIGLA	UN.	SIGNIFICADO
ρ_a	eNodeB/km ²	Densidade de antenas
ρ_u	UE/km ²	Densidade de UEs
c	km	Valor da cobertura da antena
s	s	Tempo em segundos
bps	bps	Bits por segundo
Hz	Hz	Hertz
A	km ²	Área de um espaço

1. Introdução

O mecanismo *Device-to-Device* (D2D) é a tecnologia de rádio que permite a comunicação direta entre dispositivos, ou seja, sem a necessidade da utilização da infraestrutura de rede para rotear a comunicação entre o transmissor e o receptor. Em geral, o termo "D2D" é utilizado quando nos referimos a essa comunicação em redes celulares, embora seja possível aplicá-lo a outras redes sem fio, mesmo que não seja o usual [1]. Várias tecnologias sem fio, definidas pelo *Third Generation Partnership Project* (3GPP), como *Bluetooth* [2], *WiFi Direct* [3, 4] e *LTE Direct* [5] podem suportar a comunicação D2D. Diferem, em sua maioria, em relação a taxa de dados, distância entre dispositivos, mecanismos de descoberta e aplicações típicas em uso [6].

A tecnologia *Long Term Evolution* (LTE), e recentemente a *Long Term Evolution - Advanced* (LTE-A), que suporta o padrão de quarta geração de telefonia móvel (em inglês: *Fourth Generation - 4G*), introduziu uma funcionalidade chamada *Proximity Services* (ProSe), descrita na especificação da *release* 12, revisada e melhorada na 13 [7], onde o D2D assume papel de destaque.

A principal vantagem do uso desse mecanismo é o seu grande potencial na diminuição dos custos da cobertura da rede celular, sendo mais eficiente e flexível [8], abrindo uma gama de opções de serviços que até então não eram possíveis. Em serviços locais, por exemplo, em aplicações sociais que se baseiam na proximidade, os dados podem ser transmitidos diretamente entre os dispositivos, sem a necessidade do uso da internet, diminuindo assim o tráfego na rede. A transmissão de dados locais pode se aproveitar das características de proximidade e transmissão de dados para aumentar a quantidade de aplicações móveis ao usuário. Os provedores de conteúdo ou o operador da rede podem criar pontos nos quais os dispositivos se conectem e recebam as informações [9–16]. Um outro uso interessante é se valer de um esquema *cache* [17] onde usuários que tenham interesse em uma determinada informação comum possam solicitar a um outro usuário que já a tenha. Através de comunicação D2D é possível ainda substituir as comunicações

celulares entre dispositivos próximos pela comunicação D2D. Por último, existe ainda um potencial para seu uso em situações de desastres, em cenários de comprometimento da infraestrutura de rede, inviabilizando uma densa comunicação. Situação que poderia ser minimizada com o uso dessa tecnologia [18].

O D2D traz um novo paradigma para as redes móveis, na medida que é possível que dispositivos sejam usados para fornecer, mesmo que momentaneamente, funções de rede, ou seja, comportam a infraestrutura de rede, atuando de maneira ativa quanto a ela, possibilitando, por exemplo, estabelecer um determinado caminho para roteamento de tráfego para outros dispositivos. Este fato não ocorre em uma comunicação celular tradicional [19], pois, nesse caso, os dispositivos são apenas demandantes ou consumidores de serviços de rede, e são passivos em se tratando da infraestrutura de rede. Embora tenha sido integrado já no curso do padrão 4G, o D2D é nativo quando se fala do padrão de quinta geração de telefonia móvel (em inglês: *Fifth Generation* - 5G) [20–24].

Devido a isso, existe grande interesse científico e também comercial com relação a essa tecnologia. As operadoras celulares, por exemplo tem grande interesse no modo D2D denominado *inband* [25, 26], no qual existe em uma mesma faixa do espectro celular, a coexistência de serviços de comunicação celular e D2D. Já no modelo *outband* [27], a comunicação celular se faz no espectro reservado para a rede celular e a comunicação D2D se utiliza de outra faixa, não concorrente, em geral a faixa *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) [28].

Um dos principais aspectos quando falamos de D2D, é considerar a variabilidade relativa da posição dos dispositivos, ou seja, a mobilidade e a posição relativa do dispositivo em um determinado instante de tempo. Isso influi no encontro entre eles, item essencial para que seja feita a comunicação, determinante para a sua permanência ou o seu encerramento. Conceitualmente, pode-se categorizá-lo como um tipo de rede *Ad-Hoc*, mas não se deve confundir, por exemplo, com as redes tolerantes a atraso ou interrupções (em inglês: *Delay/Disruption Tolerant Networking* - DTN), na medida que possui requisitos de rede específicos das redes 4G e 5G [1].

1.1 Motivação

Realização de pesquisa em redes móveis é bastante desafiador. Existe uma infinidade de protocolos com as mais diversas características e tantas questões de cunho tecnológico que por sua complexidade são impossíveis de serem observadas isoladamente. Existem diversas arquiteturas e sistemas de rede, cada qual com características únicas, dotadas de

camadas conceituais, necessárias para que seja possível certo tratamento modular, provendo uma variedade de serviços e também de problemas. Tais sistemas vem sendo atualizados e modificados praticamente a cada ano, principalmente devido à necessidade de uma constante evolução tecnológica, feita para atender uma demanda cada vez mais exigente.

Embora exista uma grande dificuldade de acompanhar essa mudança tão intensa, trabalhos nessa área nos permitem uma singular visão do funcionamento de diversos componentes, capazes de trabalhar de maneira mais ou menos harmônica para que uma simples chamada telefônica possa ser transmitida de um ponto a outro do planeta. Conceitos tecnológicos, às vezes tomados de maneira separada ao longo da história, passam a convergir ou a se integrar, fazendo com que os próprios serviços por eles suportados se modifiquem, possibilitando a simplificação de determinado projeto.

Todo esse movimento é visto de maneira intensa nas redes móveis. Essas redes vem integrando diversos serviços que antes eram separados, como voz e dados. Esse movimento não é recente, há pelo menos uma década existe um grande esforço para fazê-lo, e continuará por muitos anos devido, principalmente, a uma extensa matriz de infraestrutura instalada para esses serviços. Nesse contexto, pesquisas científicas nessa área encontram um campo fértil, devido ao grande número de áreas que podem ser exploradas e que se renovam constantemente.

As novas redes de telefonia móvel, 4G e futuramente 5G, modificam profundamente a maneira de prover serviços de rede. Passam a considerar, por exemplo, que os próprios dispositivos sejam parte ativa da infraestrutura de rede, mesmo que de forma momentânea, e não somente como elos passivos que só recebem ou enviam informações, em referência ao modelo puramente cliente-servidor. Isso significa, em termos, que essas novas redes preveem o uso do D2D em sua própria construção. Dessa forma o surgimento de comunicações dispositivo a dispositivo embarca nessa ideia, principalmente quando olhamos perspectivas dentro do 5G, que propõem, entre outras coisas, camadas dedicadas para que essas comunicações diretas possam ocorrer. Isso motiva novas pesquisas científicas, possibilitando o desenvolvimento de soluções de rede dentro desse novo conceito de rede.

1.2 Justificativa

O D2D é a tecnologia das redes de próxima geração (do inglês: Next Network Generation - NGN), e tem sido amplamente estudada nos últimos anos. Tendências crescen-

tes [29] abrem caminho para que o D2D assuma papel decisivo nas próximas gerações de telefonia móvel, principalmente quando nos referimos a geração 5G. A possibilidade de que dispositivos em uma rede celular possam falar diretamente, possibilita, por exemplo, maior eficiência espectral [30] quando a banda celular licenciada, latência reduzida, e também abre a possibilidade para o advento de novos serviços. Essa técnica é essencial para cumprir os principais objetivos da operadores de redes móveis, (do inglês: *Mobile Network Operators* - MNOs).

Apesar dos benefícios que o D2D é capaz de prover em redes LTE-A, existe uma série de questões de pesquisa que ainda precisam ser estudadas. Observações mostram que esse mecanismo pode interferir na comunicação dos usuários, celulares e D2D. Dessa forma, algumas ações de controle por parte do operador da rede precisam ser tomadas para que isso não aconteça. Outras preocupações incluem descoberta de pares e seleção de modo, controle de potência para os dispositivos, alocação de recursos de rádio e segurança da comunicação. Tais tratamentos seriam mais fáceis se não houvesse o fenômeno da mobilidade, fator que altera dinamicamente a topologia dos mesmos dispositivos na rede. A gestão desses dispositivos assim é de grande importância.

Assim, existem diversos trabalhos na literatura que buscam observar fenômenos como: interferência, *caching*, alocação dinâmica de canal, eficiência energética e espectral, entre outros na presença da mobilidade. Embora muitos trabalhos façam a sugestão acerca da influência da mobilidade no desempenho da rede, não fica claro como exatamente é esse comportamento, em termos de características e comportamento, em outras palavras, são necessários trabalhos que esclarecem ou consigam caracterizar o desempenho da rede quando a mesma, por uma determinada condição, altera as suas características físicas ou topológicas, visto em conjunto com a variação da mobilidade. Dessa forma, avaliações de um conjunto de parâmetros como: variação da cobertura da antena, variação do alcance da comunicação D2D – geralmente em função da condição do canal - aumento da densidade de usuários e antenas, etc, na presença da mobilidade, precisam ser estudados.

1.3 Objetivo e Contribuição

Nossa proposta tem como objetivo propôr um modelo matemático conceitual para comunicação D2D em redes LTE-A e a partir dele avaliar o desempenho do mecanismo D2D nessa rede, através de variações de parâmetros de rede concomitantemente com a mobilidade dos usuários.

As principais contribuições deste trabalho podem ser resumidas da seguinte forma:

1. Proposta de um modelo conceitual de uma rede LTE-A, que permite a avaliação de performance do mecanismo D2D na presença de mobilidade;
2. Implementação do modelo via programação em Python;
3. Avaliação de desempenho, a partir do modelo desenvolvido, do mecanismo D2D em uma rede celular LTE-A.

1.4 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 exibe um breve apanhado acerca das redes celulares e o mecanismo D2D, pontuando as suas principais características. Apresenta a motivação e justificativa para o estudo desse mecanismos na presença de mobilidade. Por fim, expõe os objetivos deste trabalho e suas contribuições.

O Capítulo 2 inicia com a apresentação da fundamentação teórica que sustenta o trabalho. Expõe os conceitos das redes celulares, começando pelo histórico da telefonia até às gerações de telefonia móvel, com aprofundamento nas redes com padrão 4G e 5G e encerra a seção com uma análise do mecanismo de D2D. Em sequência, faço a discussão sobre trabalhos relacionados que abordam os principais estudos feitos em D2D, destacando os principais nichos de pesquisa nessa área. Por fim, são apresentados outras propostas da literatura para a análise do D2D na presença da mobilidade e os pontos de pesquisa ainda em aberto.

O Capítulo 3 apresenta toda a teoria matemática necessária para suportar o modelo matemático proposto nesse trabalho, além da teoria estatística usada para a verificação dos resultados.

O Capítulo 4 descreve como o modelo é desenvolvido, sua análise e implementação. São apresentadas as premissas adotadas, as simplificações, todo o desenvolvimento do modelo, análise e a implementação via codificação em *Python*.

O Capítulo 5 descreve a implementação que foi desenvolvida, os parâmetros usados na simulação matemática, apresenta algumas questões de análise de desempenho e, finalmente, faz a partir da análise dos gráficos, a discussão dos resultados obtidos nas simulações, separadas por cada cenário.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho assim como as sugestões de pesquisa para trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

Este capítulo faz um breve histórico da telefonia, fornecendo alguns conceitos fundamentais de redes celulares, sendo essencial para a compreensão a respeito das novas gerações de telefonia e suas tecnologias. Damos certa ênfase as questões relacionadas às redes 4G (do inglês: *Forth Generation* - 4G), 5G e o mecanismo D2D. São apresentados trabalhos que propõem soluções em D2D, com destaque naqueles que tratam dos desafios de se estabelecer uma análise profunda do comportamento desse mecanismo na presença de mobilidade e sua relação com o desempenho da rede.

2.1 Considerações Iniciais

Desde a concepção da comunicação por meio de dispositivos eletrônicos [31, 32] ao uso de radiação eletromagnética para o estabelecimento dessas comunicações no meio sem fio [33, 34], o conceito de telefonia mudou muito ao longo dos anos, passando de um mero sistema que permitia a transmissão de voz a muitos quilômetros de distância, a uma complexa arquitetura que integra diversos serviços.

O crescimento dos serviços de banda-larga em redes de comunicações móveis tem provocado uma demanda por serviços cada vez mais rápidos e de qualidade. A demanda por serviços de dados, principalmente nos últimos anos, é muito superior aos serviços de voz tradicional e a expectativa é que aumente ainda mais devido à intensa proliferação de dispositivos como os *smartphones* e *tablets* que dispõem, via aplicações embarcadas, de uma variada gama de serviços ao usuário, desde o simples acesso à Internet a uma exigente comunicação em tempo real por videoconferência. Por esses motivos, há uma necessidade imediata do surgimento de novas tecnologias, que forneçam um serviço mais veloz e eficiente [35].

As redes móveis oferecem o grande benefício de mobilidade, permitindo flexibilidade

e acesso de banda larga em grandes áreas geográficas. Todavia, devido à sua natureza, uma série de desafios técnicos precisam ser superados, que vão desde o tratamento do desvanecimento seletivo, sombreamento, altas taxas de erros provenientes da interface aérea, variabilidade da potência de sinal, interferência, entre outros [36, 37]. Todavia, a cada geração de telefonia, muitas melhorias vem sendo desenvolvidas, por exemplo, o mecanismo D2D, capaz de transportar informações a partir dos próprios dispositivos, estabelecendo um novo paradigma de comunicação na medida que faz uso dos dispositivos móveis para estabelecer algum tipo roteamento de dados na rede.

2.2 Aspectos Técnicos da Telefonia Celular

A comunicação sem fio (do inglês: *wireless*) consiste na transferência de informação sem a utilização de cabos. Essas comunicações podem ser categorizadas de acordo com o comprimento de onda, com o serviço oferecido e até fazer referência a um sistema inteiro de telecomunicações. No que se refere a eletrônica e às telecomunicações, fazem o uso da radiação eletromagnética para que informações sejam enviadas pelo ar, este último utilizado como meio condutor. Enquanto sistema, podemos destacar o uso de rádio difusão, que utiliza ondas de rádio abertas que permite acesso livre as pessoas, comunicação via satélite por microondas, Wi-fi e redes de telefonia móvel celular.

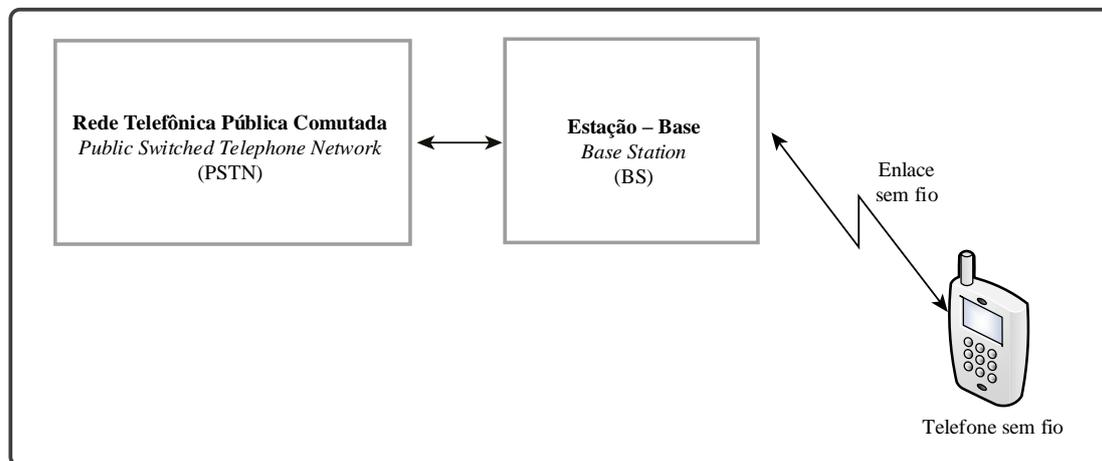


Figura 2.1: Um sistema de telefone sem fio
Adaptado: RAPPAPORT, 2002. [38]

A telefonia ou sistema telefônico, é basicamente composto por alguns telefones e um meio físico, necessário para levar a mensagem do telefone receptor para o transmissor, e vice-versa. A telefonia é dita sem fio e celular quando a infraestrutura é comportada por um sistema de antenas segmentado por células, e móvel, quando o fator de variabilidade relativa na posição de um determinado dispositivo na rede é considerável [38–41]. Em

geral, esses dois conceitos se confundem, embora não seja totalmente correto, as redes móveis são chamadas também de redes celulares.

Em todos os sistemas de telefonia móvel, uma região geográfica é dividida em células, e é esse o motivo pelo qual esses dispositivos são chamados telefones celulares [39]. A cobertura celular é idealmente caracterizada por um formato hexagonal regular, de modo a segmentar em células disjuntas o espaço. Com essa geometria é possível o reuso de frequência em células vizinhas, sem o efeito da interferência. A maioria das torres de celular usa antenas omnidirecionais que transmitem em um padrão aproximado ao circular. Obstruções e interferências elétricas podem atenuar um sinal e descaracterizar a informação a ser transportada. Como resultado, em alguns casos, as células se sobrepõem e, em outros, ocorrem falhas na cobertura do sinal [38, 42].

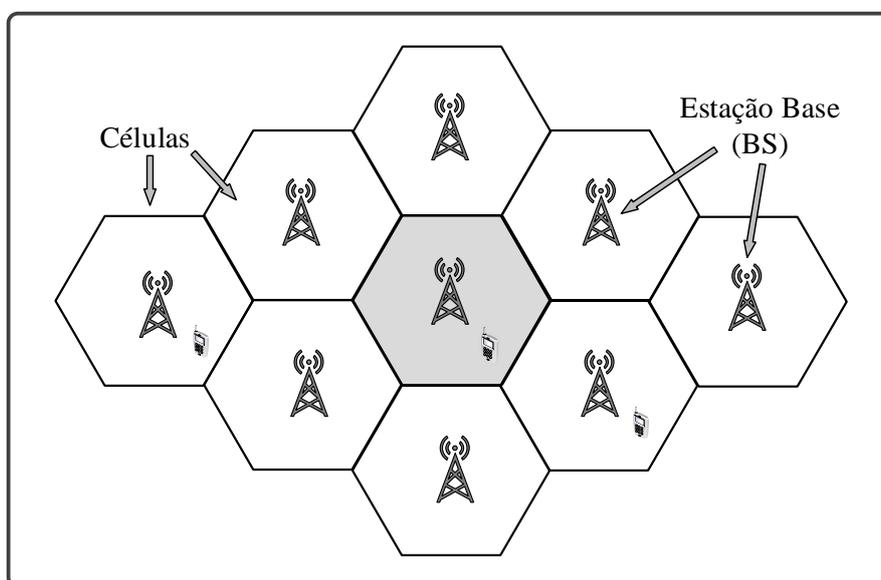


Figura 2.2: Células em redes de telefonia móvel.
Adaptado: TANENBAUM, 2011. [39]

Um sistema de telefonia celular oferece uma conexão sem fio à rede de telefonia pública comutada (do inglês: *Public Switched Telephone Network* - PSTN) para usuários de qualquer local dentro do alcance de rádio do sistema. Eles conseguem acomodar um grande número de usuários em uma grande área geográfica, e dentro de um espectro de frequência limitado. Os sistemas de rádio-celular oferecem serviço de alta qualidade, estabelecido a partir de uma infraestrutura bastante modular, que parte do princípio da cobertura limitada, onde cada transmissor de estação-base é atendido em uma pequena área geográfica, chamada de célula, de modo que os mesmos canais de rádio podem ser reutilizados por outra estação-base localizada a uma certa distância. Uma técnica de comutação *handoff*, permite que uma chamada em curso prossiga sem interrupção quando o

usuário passa de uma célula para outra [43–45].

Um sistema celular básico, observado na Figura 2.3, consiste em estações móveis, estações-base e uma Central de Comutação Móvel (do inglês: *Mobile Switching Center* - MSC). A MSC é responsável por conectar todas as estações móveis à PSTN em um sistema celular, e permite que estação móvel se comunique por meio de rádio com uma das estações-base, podendo ser transferida a diversas estações-base durante uma chamada. A estação móvel contém um transceptor, uma antena e circuitos de controle, podendo ser montada em um veículo ou usada como unidade de mão portátil. As estações-base consistem em vários transmissores e receptores que tratam simultaneamente das comunicações, e geralmente possuem torres que admitem várias antenas de transmissão e recepção [38]. A estação-base serve como uma ponte entre todos os usuários móveis da célula e conecta as chamadas móveis simultâneas por linhas telefônicas ou enlaces de microondas à MSC. Cabe a MSC realizar o controle e coordenação das operações de todas as estações-base e conectar todo sistema celular à PSTN [38].

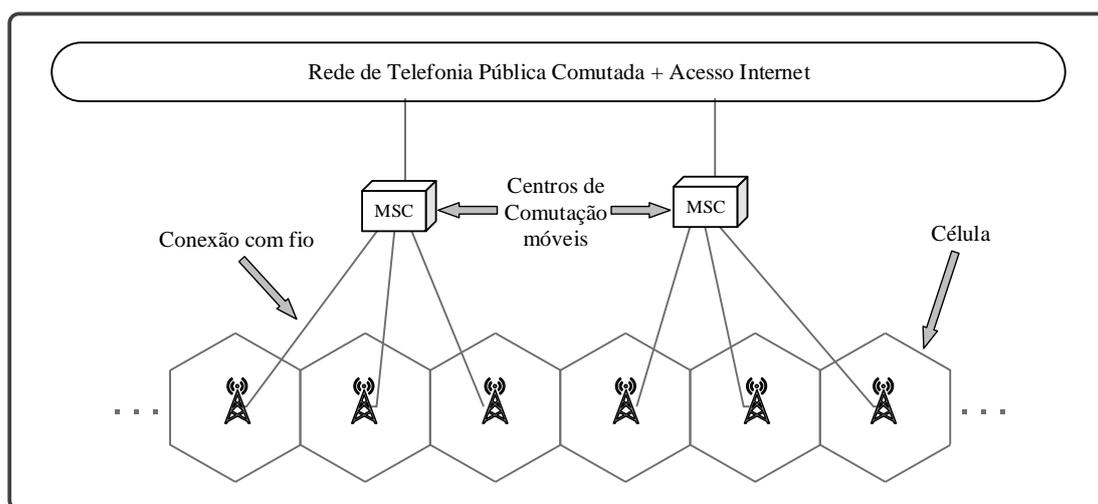


Figura 2.3: Ilustração da arquitetura celular
Adaptado: COMER, 2016. [42]

A comunicação entre a estação-base e as estações móveis é realizada por via de quatro tipos de canais diferentes. Os canais usados para transmissão de voz da estação-base para as estações móveis são chamados de Canais de Voz Diretos, e os canais usados para transmissão de voz das estações móveis para a estação-base são chamados de Canais de Voz Reversos. Os dois canais responsáveis por iniciar ligações móveis são os Canais de Controle Direto e os Canais de Controle Reversos. Os canais de controle transmitem e recebem mensagens de dados que transportam solicitações de início de chamada e de serviço, e são monitorados pelas estações móveis quando não têm uma chamada em andamento [46]. Os canais de controle diretos também servem como guias transmitindo

continuamente, em *broadcast*, todas as solicitações de tráfego para todas as estações móveis no sistema. É importante salientar o papel de mensagens supervisoras e mensagens de dados, que são enviadas de diversas formas para facilitar as mudanças de canal automáticas e as instruções de transferência para as estações móveis antes e durante uma chamada [42,46].

Outros desafios de caráter técnico, especificamente impostos às redes celulares, por exemplo, desvanecimento do sinal, transferência de chamada, perda por multipercurso, entre outros, exigem uma evolução constante da tecnologia celular a fim de permitir suprir a crescente demanda por serviços a elas delegadas.

2.3 O Surgimento das Gerações de Telefonia Móvel

Os telefones móveis, comumente ditos como telefones celulares, passaram por gerações distintas, cada qual com características tecnológicas particulares. As gerações surgiram a partir de uma necessidade de organização sobre as tecnologias e padrões existentes, estabelecendo requisitos de rede para os quais as tecnologias e padrões deveriam se enquadrar. Além disso, existia uma necessidade de se pontuar ou diferenciar a ideia do próprio conceito de telefonia, pois em sua nova concepção, saia de um mero sistema de entrega de voz a sistemas voltados para integração de serviços de voz e de dados.

A primeira geração de telefonia móvel (do inglês: *First Generation* - 1G) [47], era caracterizada pela serviço de voz analógica; a segunda geração (do inglês: *Second Generation* - 2G), tinha como principal elemento o serviço de voz digital; a terceira geração (do inglês: *Third Generation* - 3G), se caracterizou por oferecer serviços integrados de voz digital e dados (Internet, correio eletrônico, etc); e a quarta geração (4G) consolidou um sistema robusto com foco em dados.

2.4 1ª Geração de Telefonia Móvel

Essa geração tinha como principal aspecto, o oferecimento de serviço de voz analógica. Podemos dizer que a tecnologia *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), foi a mais popular dessa geração, e praticamente deu início a um intenso uso dos conceitos de sistemas celulares. A sua arquitetura de rede era dimensionada para trabalhar com a reutilização de frequências, comutação em escala com o uso de centros de comutação móveis (MSC), além de prover uma estrutura de controle capaz de suportar eventos onde

existe, por condições de rede, a necessidade de uma célula vizinha assumir determinada chamada. Dar-se o nome dessa técnica de transferência de chamadas o nome de *handoff* ou *handover*. o AMPS utiliza a tecnologia de modulação em frequência (do inglês: *Frequency Division Modulation* - FDM) com o acesso feito pela tecnologia de acesso por divisão de frequência (do inglês: *Frequency Division Multiple Access* - FDMA), e oferece serviço de comunicação de voz por meio analógico [48], com uma capacidade de canal de 30 KHz e também dados a uma velocidade até 2 kbps [49]. A partir do advento do 1G, o termo telefonia ficou mais abrangente em função da integração de outros serviços além da voz.

2.5 2ª Geração de Telefonia Móvel

O 2G trouxe ganhos significativos com relação a geração anterior, e teve como principal característica o uso da tecnologia de transmissão digital, que proporciona ganhos em capacidade, permitindo que os sinais de voz sejam digitalizados e compactados. Ela melhora a segurança, permitindo que sinais de voz e de controle sejam criptografados, o que impede fraudes, espionagem, ou acesso indevido a uma comunicação particular. Essa geração também ofereceu a possibilidade do uso de dados com velocidades de 20 kbps a 50 kbps, além de serviços como: *Short Message Service* (SMS), *Multimedia Message Service* (MMS) [50], entre outros. Assim como a geração anterior, não havia padronização internacional. Dessa forma, vários padrões foram desenvolvidos, em destaque, o padrão *Code Division Multiple Access* (CDMA) [51] e o padrão *Global System for Mobile Communications* (GSM) [52], além de tecnologias como *Enhanced Data Rates for Global Evolution* (EDGE) [53] e *General Packet Radio Service* (GPRS) [54].

A Figura 2.4, apresenta uma arquitetura de rede móvel GSM, muito similar a arquitetura AMPS. Os dispositivos são dotados de um cartão de módulo de identidade do assinante (do inglês: *Subscriber Identity Module* - SIM) que permite que a rede e o usuário possam se identificar, além de prover a codificação da conversa. O telefone móvel se comunica com as estações-base da célula que estão conectadas a um controlador de estação-base (do inglês: *Base Station Controller* - BSC), que controla os recursos de rádio das células e cuida do *handoff*, caso necessário. O BSC está conectado a um MSC, que direciona as chamadas e as conecta à rede de telefonia pública comutada, PSTN. Para saber para onde direcionar as chamadas, o MSC conta com a ajuda de dois registradores que mantêm o banco de dados dos aparelhos associados a sua célula. O registrado de local do visitante (do inglês: *Visitor Location Register* - VLR), contém a informação de aparelhos que visitam a célula e o registrador local inicial do usuário (do inglês: *Home*

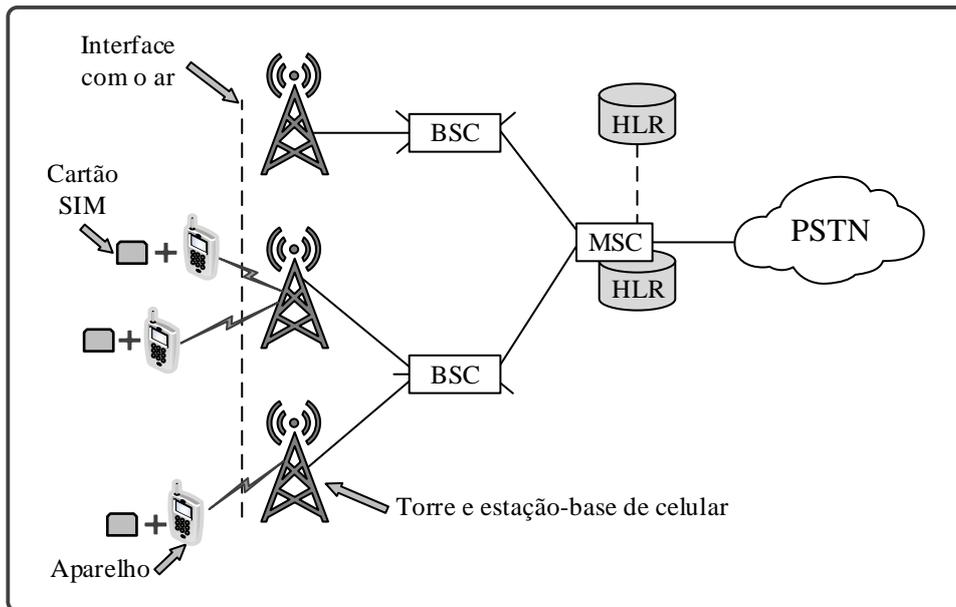


Figura 2.4: Arquitetura GSM
Adaptado: TANENBAUM, 2011. [39]

Location Register - HLR) que indica o último local conhecido de cada aparelho. Esses dados são usados para direcionar as chamadas de maneira correta. Os dois bancos de dados devem ser mantidos atualizados enquanto os aparelhos passam de uma célula para outra [39].

Existe ainda, dentro de uma mesma geração, algumas modificações tecnológicas, geralmente a partir de uma tecnologia, ou a introdução de subsistemas que provem maior capacidade. Como, em sua concepção, não existe uma profunda mudança na arquitetura e operação, são dados rótulos intermediários que possam caracterizar certa mudança. O rótulo 2.5G, por exemplo, é usado para sistemas que estendem o sistema 2G para incluir algumas características do 3G [42].

2.6 3ª Geração de Telefonia Móvel

A partir das gerações anteriores e o forte crescimento dessas redes, uma série de esforços foram feitos para ampliar o tráfego de dados nas redes celulares. A agência das nações unidas chamada União Internacional de Telecomunicações (do inglês: *International Telecommunication Union* - ITU), coordenou os trabalhos e desenvolveu um projeto denominado **IMT-2000**, (do inglês: *International Mobile Telecommunications* - IMT) que, de forma padronizada, estabelecia requisitos para o sistema de rede 3G: altas taxas de dados: 144 kbps em todos os ambientes e 2 Mbps em ambientes *indoor* com baixa mobilidade, transmissão de dados simétrica e assimétrica, serviços baseados em comutação de

circuitos e comutação de pacotes, qualidade de voz comparável à da telefonia fixa, melhor eficiência espectral, vários serviços simultâneos para usuários finais, incorporação dos sistemas celulares 2G, *roaming* global, e arquitetura aberta que permitisse a rápida integração de novas tecnologias [55]. A ITU previu uma única tecnologia mundial para o IMT-2000, de forma que os fabricantes fossem capazes de construir um único dispositivo, o que simplificaria questões técnicas futuras em relação a interconexões e também aceleraria o processo de desenvolvimento considerando que não haveria esforços paralelos em padrões distintos [56].

A partir de diversos estudos e propostas os padrões: *Universal Mobile Telecommunications Service* (UMTS) [57] e CDMA, foram selecionados para desenvolvimento em duas organizações, que refletiam esses dois campos do 3G [35]: O *3rd Generation Partners Project* (3GPP), que elaborava projetos para os padrões *Wideband Code-Division Multiple Access* (W-CDMA) com base na compatibilidade com GSM e IS-136, e um segundo grupo dentro 3GPP chamado de 3GPP2, que elaborava projetos para padrões CDMA2000 com base na compatibilidade com IS-95 [58]. As especificações do 3GPP estão estruturadas em *releases* que se referem às funcionalidades daquela determinada versão. Um dos focos do 3GPP, além propor novas tecnologias, é manter a compatibilidade com as versões anteriores, por exemplo, no caso do 3G, compatível com o GSM (2G). Uma arquitetura típica da rede 3G pode ser observada na figura 2.5.

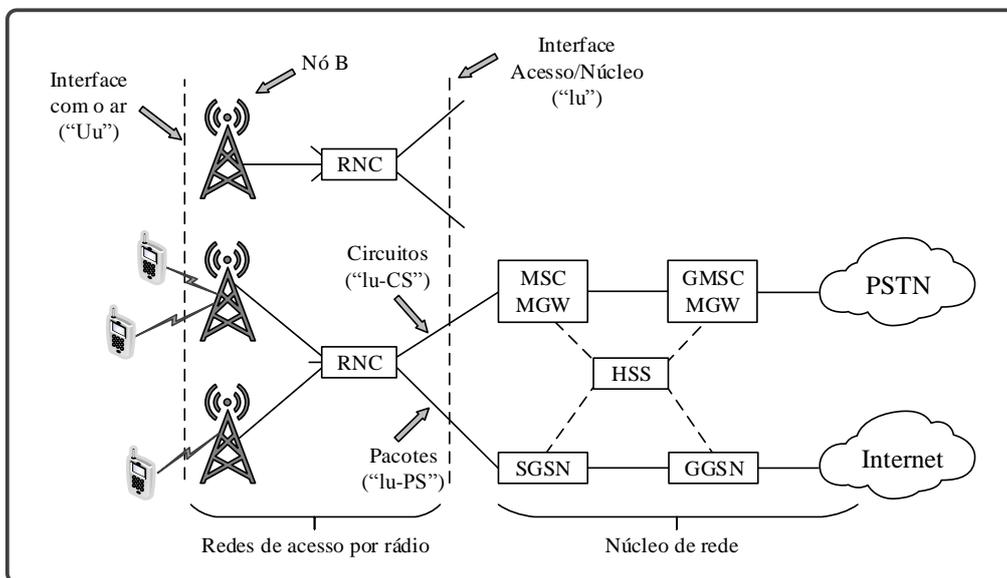


Figura 2.5: Arquitetura da rede de telefonia móvel 3G UMTS
Adaptado: TANENBAUM, 2011. [39]

A arquitetura da rede 3G se diferencia das demais pois contém um equipamento de comutação de pacotes nos circuitos *core*, que faz com que seja possível experimentar características de redes orientadas a pacotes e também a circuitos, algo que não se via em

gerações anteriores nas quais domina a comutação de circuitos para o transporte de chamadas de voz. Na arquitetura UMTS é possível observar esses dois modelos com o uso de elementos como o MSC, *Gateway-MSC* (GMSC), e *Media GateWay* (MGW), sendo este último o elemento que tem conexões com a PSTN via comutação de circuitos. O provimento de dados na arquitetura UMTS é feito via *Serving GPRS Support Node* (SGSN) e o *Gateway GPRS Support Node* (GGSN) que se conectam com todos os nós do *core* de rede, e promovem a entrega de pacotes de dados ao telefones móveis e também na rede externa, como a Internet [59].

O modelo arquitetural do UMTS, embora promovesse certa convergência de serviços, ainda mantinha caminhos separados para voz e dados na rede. Todavia, esse sistema permitiu discussões mais profundas acerca de algumas tecnologias, por exemplo, a tecnologia de voz sobre IP (VoIP, do inglês: *Voice over IP*), levando a soluções que pudessem viabilizar a convergência completa desses serviços.

O 3G trouxe grandes avanços tecnológicos em termos do tratamento da interferência, maior garantia de qualidade de voz e, principalmente, a disponibilização de serviços de dados com taxas que variam entre 384 kbps a 2Mbps [59–61]. Tal aumento da taxa, se comparado com a geração anterior, veio da tendência na qual, a cada ano que passa, serviços de dados são demandados de forma exponencial, em um contexto de virada em relação ao consumo dos serviços de voz tradicionais [62].

2.7 4ª Geração de Telefonia Móvel

Essa geração marca a forte convergência dos serviços de voz e dados, e em especial, traz uma série de requisitos técnicos muito mais voltados para o tráfego de dados, onde a demanda está em exponencial ascensão. Ela comporta ainda tratamentos de convergência de redes sem fio como IEEE 802.11 [63], *bluetooth*, entre outros. Alguns padrões para o 4G foram desenvolvidos como o IEEE 802.16, conhecido como *Worldwide interoperability for Microwave Access* (WiMAX) [64] e o LTE. A grande similaridade dessas tecnologias 4G é a utilização da técnica de modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) e também o uso do IP. É através destas eficientes técnicas de modulação e de esquemas robustos de acesso como o *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) que o sistema pode ser escalado, provendo altas taxas de dados e segurança.

O padrão LTE foi consolidado como o padrão para a geração 4G e está sendo amplamente implantado em todo o mundo, principalmente devido a aspectos técnicos ligados

a questões de compatibilidade com gerações anteriores, e talvez por fatores de custo econômico [64].

2.7.1 O Padrão LTE

Com a demanda crescente de dados e a exigência de taxas cada vez mais altas, o 3GPP definiu o padrão LTE, como o padrão para a geração 4G. Esse padrão foi desenvolvido para ter menor latência, reduzida de forma a possibilitar melhorias no desempenho do usuário a partir do conceito de *direct tunnel*, onde o plano do usuário é conectado diretamente ao *gateway* de borda, diminuindo o número de saltos e também o atraso, e maiores velocidades, atingindo até 150 Mbps de *downlink* e 50 Mbps de *uplink* com alta eficiência espectral, a partir do uso da tecnologia *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) e da tecnologia OFDMA [65]. Uma questão interessante acerca dessa tecnologia, em sinergia com o conceito das redes verdes (do inglês: *green networks*) [66], é a minimização do consumo de energia do terminal, que permite maior autonomia do dispositivo, diminuindo a necessidade de recargas. Isto foi atingido a partir de funcionalidades que, de maneira inteligente, economizam a bateria em situações de pouco uso, colocando o dispositivo em modo de espera, e também pelo tipo de modulação empregada chamada *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA), que consome menos energia.

Este padrão consolida uma tendência tecnológica do uso do *Internet Protocol* (IP), o protocolo principal da Internet, nas redes móveis. Com isso, a prestação de serviços, por exemplo, de voz, é feita a partir do uso do protocolo VoIP, diferentemente do que era feito na geração anterior [59–61]. A compatibilidade com os sistemas anteriores é uma das exigências de mercado e, por causa disso, o LTE é compatível com as redes legadas, tanto as padronizadas pelo 3GPP como as demais [67].

A arquitetura do LTE pode variar dependendo das versões das *releases*, com a extensão de sistemas ou surgimento de subsistemas que desenvolvam funções específicas. Todavia, o LTE define uma arquitetura básica que vai desde o acesso do equipamento de usuário (do inglês: *User Equipment* - UE) até a interconexão com operadores de serviços e Internet. A Figura 2.6, apresenta a arquitetura conceitual do sistema LTE.

O sistema *Evolved Packet System* (EPS) compõe todo o sistema *core* do LTE. O subsistema *Evolved Packet Core* (EPC) que provê as funcionalidades de controle de mobilidade, acesso a serviços e à Internet, e as interfaces de comunicação entre a rede de acesso e o sistema de serviços que desenvolve funções similares ao que fazia o sistema GPRS [54] nas redes legadas. Possui as interfaces de comunicação entre a rede de acesso e o sistema de serviços. O subsistema *Evolved - UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN)

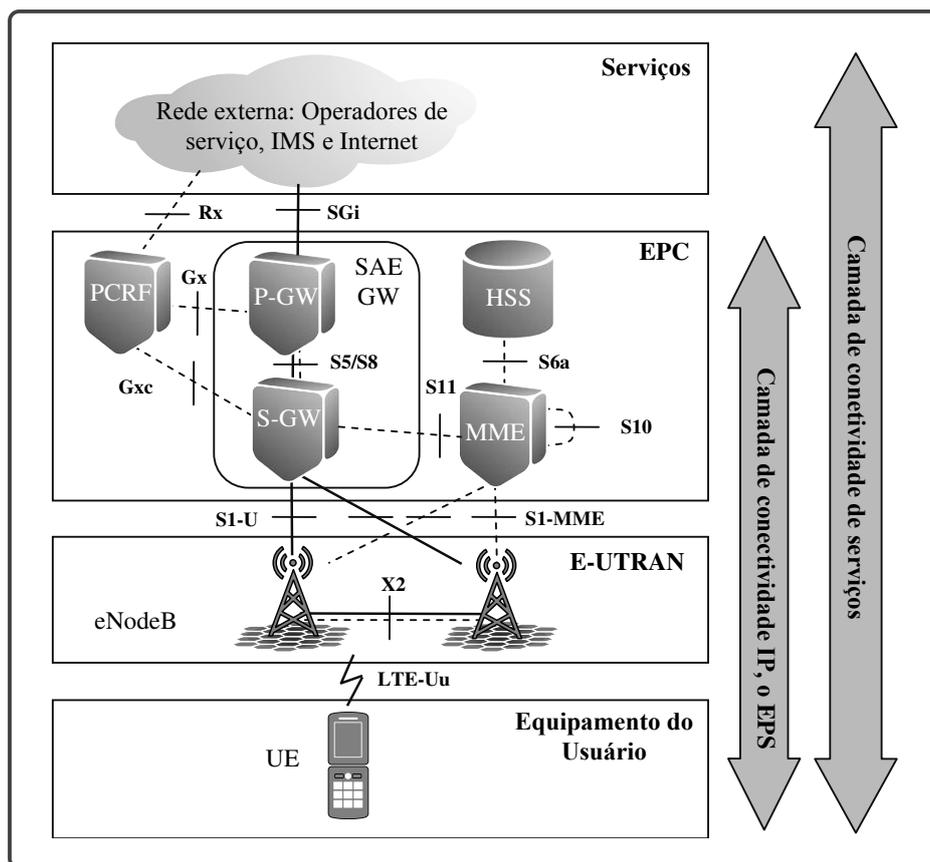


Figura 2.6: Arquitetura conceitual LTE
Adaptado: HOLMA, 2009. [35]

é formada pelas eNodeB's, as interfaces aéreas (LTE U-u), as interfaces S1 de conexão com o EPC, e as interfaces X2 de conexão entre as eNodeB's [13].

As eNodeB's passam a realizar funções de processamento e controle que antes eram realizadas pela unidades de controle de rádio (do inglês: *Radio Network Control* - RNC) no UMTS. Essas eNodeB's podem ser equipamentos compactos, com alto poder de processamento, embora pouco alcance, geralmente para o atendimento de uma alta densidade de usuários, feita a partir de células pequenas (do inglês: *Small Cells*) [68], ou equipamentos robustos, também com alto poder de processamento, mas atendendo uma grande área, feita a partir de células grandes (do inglês: *Large Cell*) [35].

O subsistema EPC possui os elementos: *Serving Gateway* (S-GW), *Packet Data Network – GateWay* (P-GW), *Mobility Management Entity* (MME), *Home Subscriber Server* (HSS), *Policy and Charge Rules Function* (PCRF). O S-GW e o MME têm funções semelhantes às executadas pelo SGSN do UMTS/GSM [69, 70], sendo comum vê-los integrados no mesmo hardware. Quando separados, utiliza-se a interface S11 de conexão. O MME é responsável pela mobilidade do usuário e pelas funções de autenticação, segurança, estabelecimento de conexões, autorização de serviços, suporte ao *handover* entre eNodeBs

ou *handover* entre sistema LTE e os sistemas 3G e 2G, caso aplicável. Ele também é responsável pela seleção do P-GW quando o móvel requer endereços IP da rede, fazendo-o a partir de um banco de dados com uma lista de P-GWs associados por *Access Point Name* (APN), que é o nome cadastrado no terminal do usuário. Neste processo o usuário envia o pedido de conexão juntamente com a APN do serviço solicitado, o MME recebe o pedido de conexão, consulta a tabela de APN e encaminha para o P-GW correspondente.

O S-GW é responsável pelo roteamento de pacotes IP. Ele armazena informações temporárias dos usuários como serviços IP suportados (informações recebidas do HSS e PCRF) e informações de roteamento interno no *core*. O P-GW é o roteador de borda que tem atribuições semelhantes as do GGSN no sistema UMTS/GSM. Basicamente, O P-GW aloca endereços IP para que, por exemplo, os usuários consigam ter acesso à Internet. O HSS agrega as funções do HLR, *Authentication Center* (AuC) e *Equipment Identity Register* (EIR) no UMTS/GSM [71]. Ele mantém um banco de dados com os registros e perfis de serviços dos usuários. A comunicação entre o HSS e a MME é realizada pela interface S6. O PCRF é responsável pela política e controle de carga e provê a qualidade de serviço (do inglês: *Quality of Service* - (QoS)) necessária de acordo com os requisitos do sistema, possibilitando, inclusive, diminuir a vazão de determinado usuário caso o volume de dados contratados tenha sido superado.

Apesar do provimento denso de serviços e altas taxas de dados, até o *release 10*, o LTE possuía alguns limites com relações a questões de reutilização de canais, modulação de sinal e eficiência espectral, entre outros [72]. Novas *releases* foram adicionados com a proposta de remover tais limites, fazendo com que o padrão pudesse evoluir.

2.7.2 O Padrão LTE-A

O LTE-A é uma evolução do padrão LTE, identificado na *release 10* e ainda em pleno desenvolvimento [67]. Ele traz tecnologias avançadas que permitem de forma otimizada a reutilização de canais, estabelece mecanismos que atuam em melhorias na diversidade espaço-tempo, maior eficiência espectral, entre outras. Ele também habilita funções que se traduzem em novas oportunidades de serviços (como voz e vídeo sobre IP), e também define novas estruturas com, por exemplo, estação rádio base repetidoras e *femto-cell* [73,74]. Dentre as evoluções previstas no LTE-A identifica-se a possibilidade de uma comunicação entre os dispositivos próximos denominados serviços de proximidade (do inglês: *Proximity Services* (ProSe)), controlada pela rede, porém de forma que o tráfego de dados seja direto entre esses dispositivos, o que, de certa forma, permite uma melhor utilização do espectro, aumento da capacidade da rede e redução de consumo de energia

radiante.

O LTE-A possibilitou ainda o tratamento em redes de topologia avançadas, por exemplo, as redes heterogêneas. Ele provê o aumento do desempenho nas redes sem fio, se aproveitando ao máximo da topologia das estações, dos dispositivos, e, por assim dizer, da disposição das células, de maneira mais dinâmica e inteligente [75, 76]. O LTE-A também introduz o conceito de *Multi Carrier Modulation* (MCM) para conseguir usar largura de banda ultra larga, até 100 MHz de espectro suportando taxas de dados muito altas, utilizando da tecnologia OFDMA e MIMO, para otimizar o espectro e garantir a diversidade necessária para aumento da faixa de transmissão [77].

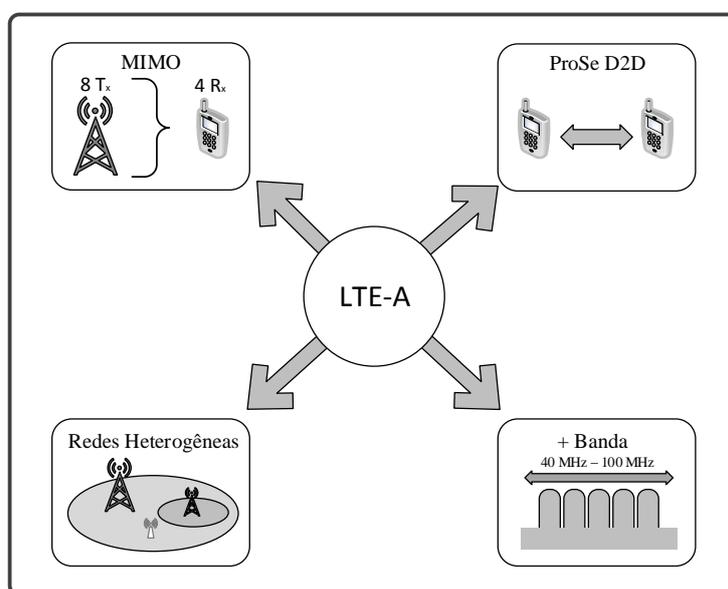


Figura 2.7: Novas funcionalidades do LTE-A

Algumas das vantagens, em relação a geração anterior, está na redução no custo por bit, melhor provisionamento de serviço, mais serviços a baixo custo com melhor experiência do usuário, uso flexível das bandas existentes e novas frequências; arquitetura simplificada e interfaces abertas e baixo consumo de potência do terminal [78–80].

2.7.3 O mecanismo D2D

Dentro do contexto de redes móveis, ao que se refere ao padrão LTE-A, a tecnologia D2D estabelece um interessante mecanismo de comunicação direta entre dispositivos, mantendo a mesma qualidade de serviço [28], taxas de dados aceitáveis e, acima de tudo, transparente para os usuários. O D2D estabelece uma maneira de estender os serviços da rede, utilizando para isso os próprios dispositivos, que funcionam como nós que roteiam pacotes ou se comunicam diretamente. Em outras palavras, esse mecanismo se propõe

a habilitar modos de comunicação onde dispositivos móveis consigam se comunicar diretamente, diferentemente do modelo de rede LTE tradicional, em que a comunicação é realizada via enlace direto com a eNodeB. Em função do crescimento das redes móveis, essa proposta visa solucionar questões de capacidade do sistema, em um cenário onde a atual estrutura de rede celular não consegue dar vazão às comunicações realizadas pelo usuários de maneira satisfatória. Nesse contexto é provável que além das camadas de rede baseada em células, surja uma nova camada baseada no conceito de comunicação D2D [28].

Em parte, o D2D importa certos fundamentos das redes *Ad-Hoc* [81,82], em particular os *Mobile Adhoc Network's* (MANETs), pois essa rede permite que dispositivos móveis possam formar uma rede em áreas onde não há uma infra-estrutura pré-definida de comunicações. As MANETs, dessa forma, são uma coleção de nós móveis que se formam estabelecendo uma rede temporária sem a assistência de qualquer ente administrador. São, em geral, redes *multi-hop*. Verifica-se um grande desafio fornecer QoS nessas redes, pois não há garantias quanto ao uso do canal sem fio, e também não há controle centralizado de gerenciamento, além de diversas restrições de recursos. A Tabela 2.1, mostra algumas diferenças entre as tecnologias MANETs e D2D.

Tabela 2.1: Comparação entre MANET's e comunicações D2D

MANET's	Comunicação D2D
Redes com múltiplos saltos (<i>Multi-hop</i>)	Em geral, com 1 salto (<i>One-hop</i>)
Não há garantias de <i>QoS</i>	Há garantias de <i>QoS</i>
Baixa Segurança	Razoável segurança
Controle não centralizado	Controle centralizado (Maior parte)
Sem potencial para melhorias na eficiência espectral	Potencial de melhorias na eficiência espectral
Conexão e associação manual	Associação automática, dependendo somente de critérios de proximidade
Não faz <i>handover</i>	Faz <i>handover</i>
Utilização de recursos não eficiente	Utilização de recursos eficiente

Adaptado: SAFDAR, 2016. [83].

Fazer os dispositivos agirem como pontos de retransmissão faz com que outros dispositivos possam se conectar a esses e criar uma rede. Essa solução traz alguns desafios, tais como segurança na transmissão de informação entre os dispositivos, gerenciamento de interferência entre os dispositivos, já que toda comunicação será feita dentro da mesma banda, alocação de recursos entre outros [18].

As atuais redes celulares, em parte, já trazem essa ideia de cooperação a fim de utilizar essa comunicação através de terminais de retransmissão fixos, fazendo com que a confi-

abilidade dos links, eficiência espectral, capacidade do sistema e alcance de transmissão aumente consideravelmente. Contudo, a total capacidade de comunicação cooperativa só pode ser alcançada se utilizarmos dispositivos móveis, para que a comunicação D2D possa ocorrer, dentro da banda licenciada, entre os usuários [84, 85]. Desta forma, a eNodeB tem pouco ou nenhum envolvimento na comunicação. Aqui cabe uma observação: dentro do conceito D2D é previsto que a comunicação possa ocorrer dentro de uma banda não licenciada, como é o caso, por exemplo, das tecnologias *Bluetooth* e *Wi-fi direct*, *Wireless Local Area Network (WLAN)*. A Tabela 2.2 faz a comparação entre algumas dessas tecnologias com o D2D.

Tabela 2.2: Comparação do D2D com WLAN e *Bluetooth*

Modos	Bluetooth	WLAN	Comunicação D2D
Pareamento	Manual	Manual, Assitido	Assistido
QoS	Sem garantias	Sem garantias	Garantido
Espectro	Não licenciado	Não licenciado	Licenciado, Não licenciado
Padronização	<i>Bluetooth</i> SIG	IEEE 802.11	3GPP Release 12
Taxa de dados (Máx.)	25 Mbps	54 Mbps	5-10 Gbps
Modulação	GFSK	DSSS	SC-FDMA (<i>Downlink</i>), OFDMA (<i>Uplink</i>)
Distância Tx (Máx.)	10-100 m	32 m	Up to 500 m
FEC	ARQ, FEC (MAC)	ARQ, FEC (PHY)	LDPC
Potência Tx (Máx.)	4dBm	15dBm	24dBm

Adaptado: MUMTAZ, 2015. [10]

Vários serviços se beneficiam com essa comunicação para, por exemplo, diminuir o custo da comunicação. Além disso, a comunicação D2D pode fazer com que serviços de computação em nuvem móveis compartilhem recursos para usuários que estão próximos, estabelecendo maior eficiência do uso do espectro. Prestadores de serviços também podem se beneficiar desse tipo de comunicação. Em lugares com muitas pessoas, como em estádios de esportes e shoppings, eles podem disseminar seus serviços e diminuir a carga na rede [67].

2.7.3.1 Modos de Comunicação D2D

De forma simplista uma rede LTE-A habilitada para D2D - podem existir redes LTE-A operando sem esta funcionalidade - estabelece um mecanismo de oportunidade. Quando a rede LTE-A percebe que existe dois dispositivos próximos e querem se comunicar, a comunicação D2D é estabelecida. Existe também, por exemplo, em função da indisponibilidade da eNodeB de realizar a alocação de recursos físicos, a comunicação D2D, se possível, pode ser habilitada e permitir que um dispositivo sem esses recursos consiga estabelecer comunicação com a eNodeB via um dispositivo próximo.

A Figura 2.8, 2.9, os tipo de comunicação D2D existentes, cada uma com uma característica. A comunicação D2D pode usar o espectro licenciado *inband* ou o espectro não

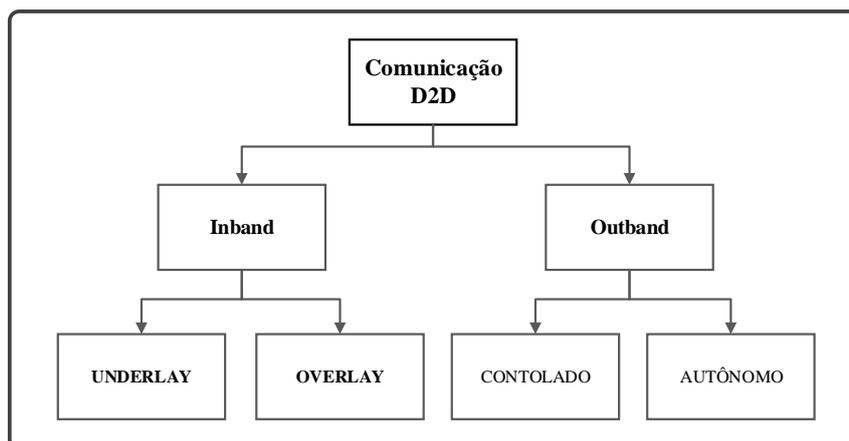


Figura 2.8: D2D em redes celulares LTE-A
Adaptado: LI, 2016. [86]

licenciado *outband* para a formação de links diretos [28]. No *inband* D2D é permitido ainda os modos *underlay* e *overlay* e no *outband*, os modos Controlados e Autônomos. O modo controlado *outband*, o rádio e as interfaces são gerenciadas pela eNodeB, enquanto no modo autônomo, os próprios usuários as alocações de rádio e interfaces.

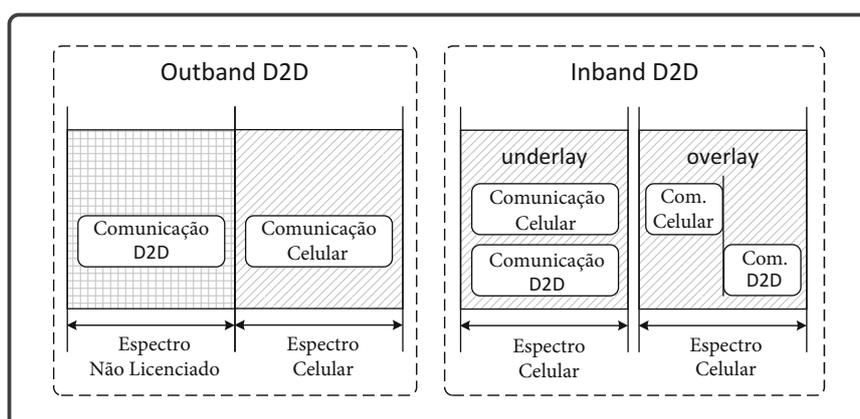


Figura 2.9: Modo de comunicação D2D e a alocação de espectro
Adaptado: LI, 2016. [86]

Em termos de alocação de recursos de rádio o D2D *inband* ocupa a mesma mesma faixa do espectro celular, ou seja a coexistência de serviços de comunicação celular e D2D. Já no modelo D2D *outband* [18], a comunicação celular se faz no espectro reservado para a rede celular e a comunicação D2D se utiliza de uma faixa não licenciada. As operadoras de redes celulares tem grande interesse em desenvolver pesquisas para o modo *inband*, pois se torna mais fácil garantir *QoS* ao se utilizar essa faixa do espectro celular. Ao contrário, não há muito interesse na realização de pesquisas para o modo *outband*, com o seu uso em faixas não licenciadas, devido a diversas dificuldades de segurança, cobrança, além da dificuldade de garantias de *QoS*. Além das empresas e operadoras de rede celular existe também grande interesse na área acadêmica em função

dos desafios ainda em aberto, por exemplo, em relação a escalabilidade, interferência, desempenho, *caching*, entre outros.

2.7.3.2 Mecanismo D2D - Cenários de Rede

A Figura 2.8 mostra uma esquematização do uso de D2D em uma rede celular, onde é possível observar o uso do D2D para *offloading*, para atendimento de dispositivos fora da cobertura celular, e pares D2D sem o uso do espectro celular.

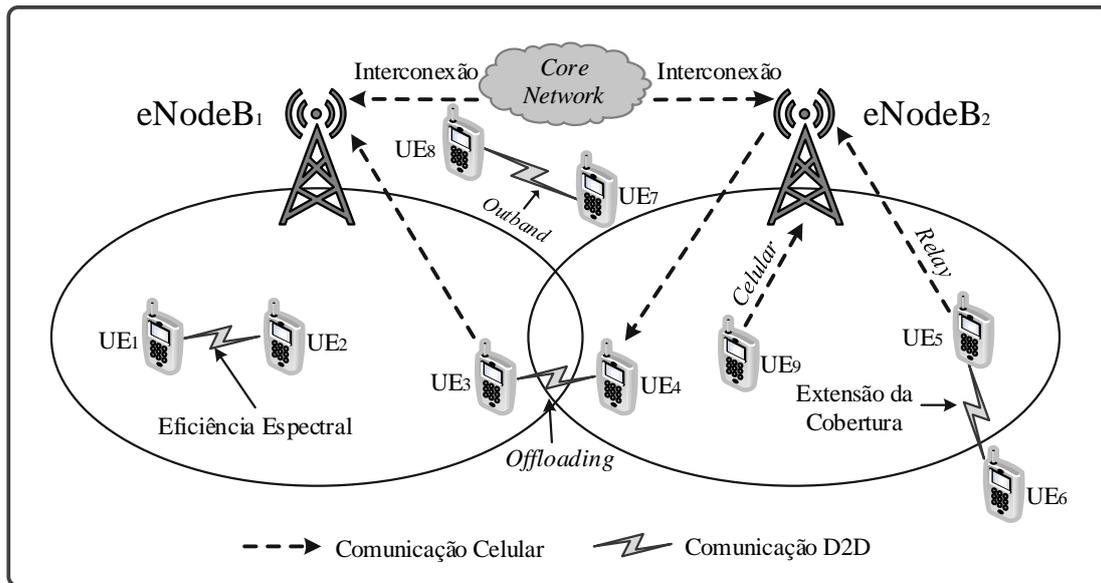


Figura 2.10: D2D em redes celulares LTE-A
Adaptado: LI, 2016. [86]

Na Figura 2.10, as eNodeB's estão interconectadas via *core* da rede LTE-A, permitindo a comunicação entre elas. Considere uma situação adversa de rede onde eNodeB₂ não consegue atender o UE₄, via *offloading* com o uso do D2D é possível atender esse dispositivo móvel a partir de um dispositivo próximo UE₃ que está associado a eNodeB₁. Como a comunicação será feita através de outros dispositivos, a segurança e o controle de interferência são desafios principais na arquitetura de comunicação em duas camadas.

Nessa mesma figura, alguns cenários de D2D são representados. Assim, por exemplo, é possível que dois dispositivos que estão na cobertura de uma eNodeB estejam se comunicando diretamente, via um espectro não licenciado, fazendo com que os recursos de rádio celular não sejam gastos para que possam ser utilizados por outros usuários. Também é possível que dispositivos estejam totalmente fora da área de cobertura das antenas e, ainda assim, consigam se comunicar via D2D em uma faixa não licenciada. É importante notar que tal comunicação exige uma segunda interface de rádio como *Wi-Fi Direct* [87, 88], *Bluetooth*, *ZigBee* [89], entre outras.

Por último, mais não menos importante, temos a questão da extensão da cobertura da rede celular por meio do *relay* de rede. Nesse cenário, é possível que um dispositivo que esteja fora da área de cobertura, consiga por questões de proximidade acessar um outro dispositivo que possui por sua vez comunicação com a eNodeB. Assim, é possível que o dispositivo que não conseguia estabelecer comunicação com a eNodeB o faça via esse outro dispositivo que está sendo atendido.

2.8 A próxima geração de telefonia móvel (5G)

O mecanismo D2D, assume papel de destaque nas tecnologias e padrões previstos para o sistema 5G. Essa próxima geração prevê, entre outras coisas, o estabelecimento de uma arquitetura em dois níveis. Um nível *Macro Cell* e um nível *Device* [90,91]. No primeiro, está compreendido as estações base para a comunicação com dispositivos na maneira como é hoje, já no segundo encontram-se os dispositivos. Caso um determinado dispositivo esteja operando dentro da cobertura da estação e os recursos da mesma estão disponíveis, o dispositivo irá fazer comunicações via eNodeB da maneira tradicional, e assim estará operando a nível da *Macro Cell*. Se um dispositivo se liga diretamente a outro dispositivo ou serve de caminho ou *relay* a outro, então ele estará operando no nível *Device* [92–94]. Nas áreas congestionadas, e nas bordas ou fronteiras da célula, uma rede de comunicação D2D é criada, para que comunicações diretas entre eles possam ocorrer. Isso ocorre com o controle total ou parcial de células ou mesmo sem nenhum controle.

Na Figura 2.11 é apresentada uma célula típica para um sistema 5G, formada por uma rede heterogênea, com a existência de estações somente com função *relay*.

Um dos pontos principais de suma importância em 5G é no que se refere a descoberta. Os dispositivos devem detectar e identificar outros dispositivos que utilizam D2D, função habilitada pela rede [92,95]. No caso da identificação de vários saltos, essa técnica deve ser utilizada em combinação com roteamento e com os requisitos específicos de cenários 5G, tais como descoberta eficiente em redes densas e ultra-baixa latência. Em casos como esse também é importante o papel da sincronização, pois é um desafio como será feito o tratamento e os problemas encontrados no meio físico (ar livre) [96]. A nível de controle da rede a gestão de recursos também deve ser levada em conta com a comunicação incluindo difusão, *multicast* e *unicast* nos mais variados cenários, algo extremamente complexo.

As redes 5G estão sendo dimensionadas dentro do contexto das chamadas redes ver-

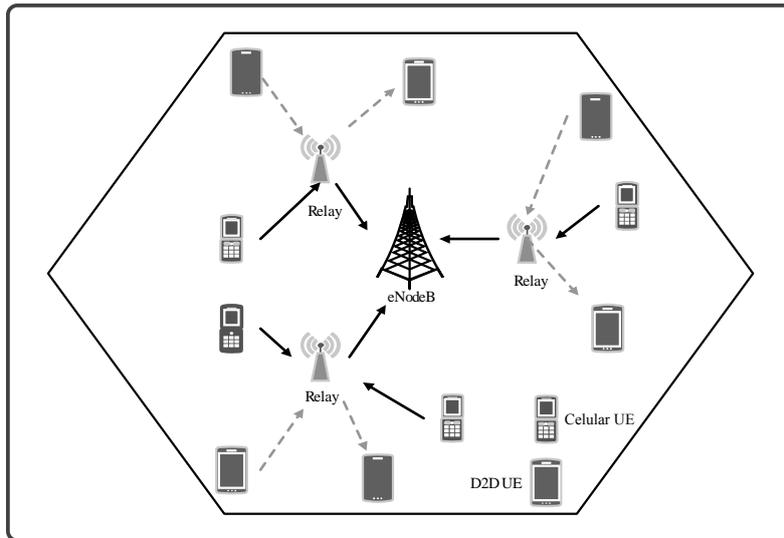


Figura 2.11: Visão de uma célula com múltiplas antenas *Relay*
Adaptado: GUPTA, 2015. [22]

des. Dessa forma, questões de gestão de energia e interferência eletromagnética são bastante importantes quando falamos do 5G. O próprio mecanismo D2D cria uma interferência extra, na medida que concorre com o serviço celular tradicional, sendo o gerenciamento e minimização da interferência uma das questões que devem ser tratadas pelo 5G [97, 98]. Além disso, a gestão da própria bateria, em situações de muitos saltos, e a comunicação em cenários onde a topologia, em um determinado instante é esparsa, deve ser considerada. Por fim, o 5G D2D pode se comunicar com praticamente qualquer tipo de dispositivo: há troca entre os modos D2D e celular, ou D2D e outro modo P2P (como WLAN), ou entre espectros autorizados e não autorizados [90, 97, 99]. A depender como essas trocas são feitas, o desempenho dos sistemas de comunicação *wireless* pode melhorar ou mesmo piorar.

Tabela 2.3: Comparação das gerações: 1G ao 5G

Tecnologia	1G	2G	3G	4G	5G
Período	1970 - 1990	1990 - 2004	2004 - 2010	Hoje	2020 - ?
Banda	2 Kbps	64 Kbps	2 Mbps	1 Gbps	> 1 Gbps
Tecnologia	Análogica	Digital	CDMA2000 UMTS, EDGE	WiMax Wi-Fi, LTE	WWW
Núcleo	PSTN	PSTN	PSTN e Rede de dados	Rede de dados	Rede de dados
Multiplexação	FDMA, TDMA	CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Comutação	Circuitos	Circuitos e Pacotes	Circuitos, Pacotes	Todos pacotes	Todos pacotes
Serviços	Telefonia Análogica	Telefonia Digital SMS	Telefonia SMS e Dados	Convergência Áudio Vídeo e Internet	Internet

Adaptado: VORA, 2015. [49]

2.9 Trabalhos relacionados

Existe um grande interesse da comunidade científica quanto aos desafios técnicos que envolvem o mecanismo D2D, principalmente devido ao seu uso na nova geração de telefonia móvel 5G. A *release* 12 que define o D2D, dentro da funcionalidade ProSe [7] aborda uma série de requisitos de rede necessários para o funcionamento do D2D na rede LTE-A, sendo fonte de estudos e pesquisa em muitos campos dentro dessa área. A questão da mobilidade é um campo bastante explorado que, devido a sua natureza, pode influir em um ou mais aspectos da comunicação. A seguir, são apresentados alguns trabalhos científicos que têm relação direta ou indireta com o proposto trabalho de dissertação.

HOSNY *et al.* [100] realiza um estudo baseado na previsibilidade do comportamento de usuários para que o operador de serviço possa aplicar políticas de armazenamento em *cache* nos seus dispositivos, suavizando, assim a carga na rede. Assim, uma estratégia de cache mais adequada poderia aliviar o congestionamento da rede, melhorando o desempenho geral da rede. Eles apresentam um modelo que propõe um sistema capaz de tomar decisões de *caching*, dependendo das características de tráfego e também de posição, para a tomada de decisão. Os usuários são equipados com a comunicação D2D, que é utilizada para compartilhar itens de dados em cache. Eles propõem ainda mecanismos de incentivo que compense o uso de recursos dos dispositivos dos usuários. Esse trabalho parte da perspectiva de controle, ou seja, toma decisões baseados em certas previsibilidade dos usuários na rede para decisões de cache. Dessa forma, a mobilidade é tratada de maneira ativa, pois mecanismos tomam decisões baseado em suas características.

ORSINO *et al.* [101] avaliam o impacto da mobilidade na comunicação D2D em redes celulares, partindo de diferentes padrões de movimentação de usuários. É proposto uma metodologia de avaliação do efeito da mobilidade no desempenho do mecanismo D2D. Para isso, utiliza-se de aplicações D2D típicas, como *streaming* de vídeo e *downloading* de dados. O tempo médio do *download* de dados entregue nos links D2D é medido, assim como o número de contatos e o tempo de contato, avaliado com diferentes modelos de mobilidade: *Random Waypoint* (RWP), *Random Direction Model* (RDM), *Brownian Motion* (BM), *Lévy Flight* (LF) e *Jump BM* (JBM). Alguns parâmetros não são avaliados como a cobertura da antena, a variação da densidade de usuários e antenas na rede e seus efeitos na mobilidade.

YILMAZ *et al.* [102] desenvolvem um estudo da viabilidade do D2D em fornecer uma comunicação confiável de baixa latência entre usuários finais, levando em conta o efeito da mobilidade dos mesmos. Eles partem de características das redes 5G, utilizando *Small*

Cells e *Large Cells* nas suas observações. De acordo com os autores, há problemas no que se refere a latência, que pode aumentar quando vários nós de controle tiverem que trocar informações D2D entre si, fazendo com que exista uma sobrecarga de comunicação de sinalização na rede. Para tratar esse problema foi proposto um *framework* capaz de minimizar esse efeito, a partir da gestão ou controle da mobilidade dos nós. Conforme demonstrado pelos resultados da simulação, as soluções de mobilidade podem reduzir a sobrecarga de sinalização da rede e melhorar a latência D2D.

Um dos desafios que surge em D2D é a questão da descoberta de dispositivos e a gestão da proximidade e encontro necessária para que ocorra a comunicação. Todavia, alguns aspectos como a interferência, controle e gerenciamento dinâmico, carga de sinalização, entre outros, precisam ser superados. De fato, no trabalho de XENAKIS *et al.* [103], a descoberta de dispositivo e a proximidade de nós é explorada. Essa descoberta é assistida pela rede, de maneira centralizada, o que evita o tratamento intensivo nas questões de interferência, sinalização, controle e gerenciamento. O desenvolvimento matemático é feito principalmente para maximizar expressões para a descoberta de dispositivos e métricas de aproximação o que influencia no desempenho.

JARRAY *et al.* [104] estão interessados no estudo de *cache* em D2D. Eles partem do estudo da teoria, que descreve a capacidade de usuários D2D armazenar conteúdo. Por essa característica, onde relações de conexão e desconexão D2D são constantes, variando em função da mobilidade dos usuários. Para avaliar o efeito da mobilidade nesse contexto, são propostas métricas de desempenho novas, que permite avaliar a probabilidade de sucesso de entrega de um dado considerado popular. Eles partem de abordagens matemáticas como o uso do PPP e modelos de cobertura obtendo expressões aritméticas e probabilísticas, sob a perspectiva do cálculo de probabilidade desejado. São realizadas simulações que suportam o resultados obtidos analiticamente. Assim, de acordo com os autores, é possível revelar a influência da mobilidade no desempenho do sistema.

CHAKRABARTI *et al.* [105] propõem um modelo matemático, baseado em características reais de rede, para investigar o fenômeno de interrupção de serviço celular. Com isso, através de teoria probabilísticas, eles conseguem calcular essa interrupção. Eles realizam simulações para avaliar a efetividade do chaveamento ou comutação para o D2D estendendo, na prática, e cobertura da estação rádio-base. A probabilidade de interrupção é calculada, parâmetro importante para o estabelecimento de troca entre a comunicação celular tradicional para a comunicação D2D. Embora o se proponha avaliar essa interrupção os autores partem do principio de que a mobilidade dos usuários é muito baixa, e são aproximadamente estáticos, não avaliando tal comportamento em função dessa medida.

LIU *et al.* [106] destacam, com base na ferramenta de geometria estocástica, uma estrutura para analisar a probabilidade de cobertura em comunicações D2D com sobreposição de multicanais *downlink*. Além disso, em função dos vários resultados numéricos, são propostas soluções matemáticas para o melhor desempenho dos links D2D mesmo com baixa potência.

Trabalhos como o de ORSINO *et. al* [101], embora abordem a questão da mobilidade para esses serviços, não consideram situações em que há mudança de topologia, estabelece um modelo matemático a fim de descrever a relação entre cada variável e o seu comportamento em função da mobilidade. Já CHAKRABARTI *et al.* [105] e LIU *et al.* [106] partem para abordagens matemáticas com métricas de desempenho para os mecanismos D2D, todavia sem foco nas questões da influência da mobilidade.

Anteriormente investigamos o desempenho da comunicação D2D em uma rede móvel celular, a partir da criação de modelo de simulação para a realização de testes de conceito em relação à tecnologia D2D em redes celulares LTE-A [107]. Foi possível avaliar o comportamento do mecanismo D2D em situações de rede em que a mobilidade do dispositivos é praticamente nula, utilizando o simulador OMNet++5.0. Como resultados, em um cenário onde se tem a presença de uma eNodeB, para a cobertura de uma determinada área, foi possível observar que mesmo com um número pequeno de estações móveis, ou UE's, alguns ganhos com respeito a vazão e cobertura da rede são possíveis.

Percebemos, dessa forma, que os trabalhos realizados nessa área, não provêm estudos que forneçam resultados de desempenho a partir de uma análise conjunta das mudanças topológicas da rede e da mobilidade; aspecto que será explorado nesse trabalho.

2.10 Apresentação do Problema

Na comunicação D2D um dos grandes desafios, ainda pouco explorado, é o desenvolvimento de um modelo que permita avaliar como o desempenho do mecanismo D2D, na presença de mobilidade, se comporta.

Assim, estamos interessados em avaliar como esse fenômeno influencia o desempenho da rede, em situações onde estão presentes dispositivos com e sem o mecanismo D2D, a partir da variação de diversos parâmetros, tais como: alcance da antena, raio de encontro D2D, variação da velocidade dos dispositivos e alteração da topologia de rede. O comportamento e a eficiência da rede pode variar rapidamente quando diversas situações de rede se alteram conjuntamente com a mobilidade dos usuários. Esse mecanismo, se mal

dimensionado, pode ter grande influência no desempenho, prejudicando o tratamento das comunicações, afetando a cobertura e, conseqüentemente, o número de usuários atendidos e serviço prestado.

3. Teoria Matemática

Este capítulo compõe as ferramentas matemáticas necessárias que suporta o nosso modelo. Alguns conceitos são apresentados de forma breve, como a teoria de medida, processos pontuais, construção topológica, entre outros, todavia de forma suficiente para comportar teoricamente o modelo proposto. Também comporta a teoria estatística necessária para a análise dos resultados obtidos.

3.1 Espaços métricos

Chamamos de espaço métrico, aquele definido por um par (C, f) , onde C representa um conjunto e f uma função real também chamada de função distância, onde as seguintes propriedades são válidas $f : C \times C \rightarrow \mathbb{R}, \forall x, y, z \in C$:

- (1) $f(x, y) \geq 0$;
- (2) $f(x, y) = 0$ se, e somente se, $x = y$;
- (3) $f(x, y) = f(y, x)$;
- (4) $f(x, y) \leq f(x, y) + f(x, z)$ (desigualdade triangular)

Dentre os espaços métricos, o espaço euclidiano bidimensional \mathbb{R}^n é definido como o conjunto das n -uplas $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ de números reais. Esse espaço métrico está comportado nas seguintes funções distâncias $d(x, y)$ [108]:

- (a) Métrica Euclidiana:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3.1)$$

(b) Métrica do Máximo:

$$d(x,y) = \max_{1 \leq i \leq n} \{ |x_i - y_i| \} \quad (3.2)$$

(c) Métrica da Soma:

$$d(x,y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^2 \quad (3.3)$$

Assim, a partir de uma métrica é possível gerar uma topologia [109] de maneira a ser usada em uma área, em geral limitada, que comporta os entes do modelo.

3.2 Processos Estocásticos

Em geral, um processo estocástico é assim definido quando, em determinadas observações de um fenômeno em um período de tempo, pode se verificar a influência de efeitos aleatórios, isso em todo o intervalo de tempo ou sequência de tempos em que é considerado [110].

Em outras palavras, se trata de um fenômeno que varia em algum grau, de formas diferentes, à medida que o tempo passa, ou seja, uma sequência de tempo inteira do processo em diversas ocasiões diferentes, sob condições presumivelmente idênticas. Assim, a probabilidade não está no sentido de que cada resultado de uma experiência aleatória determina somente um único número. Ao invés, a experiência aleatória determina o comportamento de algum sistema para uma sequência ou intervalo de tempo inteiro. Isto é, o resultado da experiência aleatória é uma sequência ou série de valores, uma função, e não apenas um único número [111].

De maneira formal definimos um processo estocástico $X = \{ X_t : t \in I \}$ como uma família de variáveis aleatórias, em que T é chamado de espaço de parâmetros, que pode ser de tempo discreto ou de tempo contínuo, dependendo da maneira que o T é representado e usado, ou seja:

- Se T é contínuo, $T = \{t : 0 \leq t < \infty\}$, trata-se de um Processo Estocástico de parâmetros contínuos;
- Se T é discreto, $T = \{0, 1, 2, \dots\}$, trata-se de um Processo Estocástico de parâmetros discretos.

A realização do processo é feita a cada ponto t do conjunto T onde se observa uma medida ou variável aleatória X_t . Uma única função X_t , que corresponde a um único ponto

amostral é chamada de realização do processo estocástico [111, 112].

O conjunto de valores que X_t pode assumir é chamada de Espaço de Estados, e os valores específicos de X_t em dado momento são os estados do processo. Assim, se X_t representa alguma contagem, chamamos o processo de Processo de Estado Discreto ou cadeia aleatória e, se X_t representa uma medida é chamado de Processo de Estado Contínuo [111, 112].

Um dos mais importantes aspectos sobre processos estocásticos é aquele referente às sequências de variáveis aleatórias. Existe muita aplicação quando tratamos de variáveis aleatórias independentes, com distribuições idênticas como resultado de repetições independentes da mesma experiência aleatória, em que cada realização um valor ou medida é associado. Essa característica tem aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento [111–113].

3.3 Processo de Poisson

Um processo de particular importância, nesse contexto é o processo de Poisson. Esse processo conta com propriedades matemáticas convenientes, permite alguns tratamentos lineares [114] fato que o levou a ser frequentemente definido no espaço euclidiano e utilizado como modelo matemático em vários ramos da ciência.

O processo de Poisson pode ser definido em termos de ocorrências de eventos. É possível contar o número de chegadas ou eventos N_t até o instante t . O número de eventos segue uma distribuição de Poisson, ou seja, a distribuição de N_t tem distribuição de Poisson com parâmetro λt para algum $\lambda > 0$. O parâmetro λ associado ao processo é denominado de intensidade ou taxa de chegada do processo. O processo de Poisson é portanto, um processo estocástico a tempo contínuo, isto é $T = [0, \infty]$ [112, 113].

Seja N_t um processo de Poisson. Então, temos que:

$$P(N_t = n) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}, \quad \forall n \in \mathbb{N},$$

para algum $\lambda > 0$. Ou seja, $N_t \sim \text{Poisson}(\lambda t)$.

Similarmente o Processo Ponto Poisson (PPP) está relacionado com a distribuição de Poisson. O PPP será discutido com mais detalhes na seção 3.4.

3.4 Processo Ponto Poisson (PPP)

Define-se como processo de ponto ou campo de ponto o nome dado a coleção de pontos matemáticos localizados aleatoriamente em algum espaço matemático subjacente, como a linha real, o plano cartesiano ou mais espaços abstratos, tendo bastante aplicabilidade em modelos matemáticos de fenômenos ou objetos representáveis como pontos em algum tipo de espaço. Um processo de pontos bastante conhecido é o processo de Poisson que estabelece uma forma matemática para a distribuição de pontos dispostos no espaço matemático [115].

Como processo de pontos, corresponde a uma das classes mais importantes, devido a não interação entre eventos ou configurações de pontos em regiões disjuntas, implicando em um comportamento independente dos eventos [116, 117], simplificando várias análises matemáticas.

No plano geométrico, o processo de ponto é também conhecido como processo de Poisson espacial, e também pode representar objetos espalhados, como transmissores em uma rede sem fio. Nesses cenários, o processo é frequentemente usado em modelos matemáticos e nas áreas afins de processos de ponto espaciais, geometria estocástica, análise espacial e da teoria da percolação contínua [118].

Em particular, em espaços \mathbb{R}^2 , o processo de ponto espacial Poisson, também chamado simplesmente de PPP, refere-se ao processo de ponto que se localiza ou se insere em uma determinada área $A \in \mathbb{R}^2$. Esse processo contém uma função parâmetro $\Lambda(\cdot)$ que depende da localização no espaço subjacente em que o processo de Poisson é definido. No espaço euclidiano em \mathbb{R}^2 , isso é obtido através da introdução de uma função $\lambda(s) > 0$, onde $s \in \mathbb{R}^2$ é um ponto dessa dimensão, tal que, para a região limitada A , a integral $\lambda(s)$ sobre essa região é finita. Assim, o valor dessa integral, denotada por $\Lambda(A)$ [119], é dado por:

$$\Lambda(A) = \int_A \lambda(s) ds < \infty \quad (3.4)$$

Denota-se $N(A)$ a variável aleatória, ou número aleatório, referente a quantidade de pontos existentes nessa região. A probabilidade desse número aleatório ser igual a uma certa quantidade n na região A é dada por:

$$P \{ N(A) = n \} = \frac{(\Lambda|A|)^n}{n!} e^{-\Lambda|A|} \quad (3.5)$$

A função $\Lambda(A)$ representa, matematicamente, o número esperado de pontos do pro-

cesso de Poisson localizado na região limitada A , ou seja: $\Lambda(A) = E [N(A)]$.

Se o processo é dito homogêneo, ou seja, não depende da posição do espaço de estado subjacente através de seu parâmetro λ , sendo um processo estocástico estacionário e isotrópico, e estar distribuído uniformemente, a seguinte simplificação pode ser utilizada [120]:

$$\Lambda(A) = \int_A \lambda(s) ds = \lambda \int_A ds = \lambda \cdot A$$

$$E [N(A)] = \lambda \cdot A \quad (3.6)$$

A expressão 3.6 é bastante interessante pois relaciona a esperança estatística do número de pontos a partir de Poisson em uma determinada área A com a densidade multiplicada pela própria área A . Esse resultado é muito importante pois simplifica muita vezes problemas bastante complexos.

A Figura 3.1 apresenta, como exemplo a disposição de pontos por PPP, em uma área A , com $A = 4 (u.a)^2$ e $\lambda = 4 (u.a)^{-2}$, sendo $(u.a)$ a unidade de área.

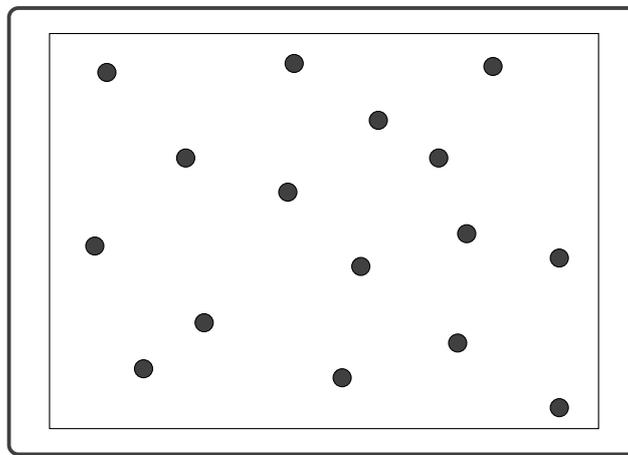


Figura 3.1: Exemplo de PPP

3.5 Movimento Browniano

Podemos utilizar algumas propriedades matemáticas para atribuir a um ponto o efeito físico conhecido como movimento ou mobilidade. A mobilidade é a capacidade de alguém ou alguma coisa se mover, fazendo com que sua posição relativa varie no tempo. Em linhas gerais, o ponto pode se mover desde que exista uma função que atualize seu valor ao longo de um intervalo de tempo Δt , sendo possível, dessa forma observar um efeito similar a um movimento.

Um movimento vastamente estudado, com diversas propriedades matemáticas bastante conhecida é o Movimento Browniano (do inglês: *Brownian Motion* - (BM)). Ele é descrito matematicamente como um processo estocástico, chamado de processo de *Wiener*. Nesse processo o movimento é interpretado como a relação de um determinado objeto em relação ao tempo, sendo associadas a distribuições de probabilidade.

O BM é definido formalmente como o processo estocástico com as seguintes características: $X = (X_t, t \in [0, \infty))$ e $Y = (Y_t, t \in [0, \infty))$, sendo X, Y variáveis aleatórias independentes, que representam o deslocamento do usuário no espaço, o dispositivo tem o seu movimento no espaço dado da seguinte forma [121]:

- a. O processo começa no zero: $X_0 = 0, Y_0 = 0$;
- b. Possui incrementos independentes e estacionários;
- c. Para todo $t > 0$, X_t, Y_t possuem distribuição normal $N(0, t)$;
- d. Possui caminhos amostrais contínuos.

Onde a distribuição normal, notada por $N(\mu, \sigma^2)$ apresenta a seguinte expressão:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2}$$

A partir da definição do processo estocástico, podemos afirmar que se trata de um movimento *Browniano* ou de *Wiener*. Dessa maneira, $X_{t+\Delta t} - X_t, Y_{t+\Delta t} - Y_t$ tem distribuição normal com média 0 (zero) e variância t , ou seja, $\Delta X, \Delta Y \sim N(0, t)$.

Devido a sua simplicidade, muitos resultados com aplicações práticas podem ser deduzidos isolando observações que sem o mesmo seriam inviáveis [122].

3.6 Teoria de Grafos

Muitas estruturas podem ser representadas por grafos, e muitos problemas de interesse prático podem ser formulados a partir da teoria do grafo, às vezes simplificando bastante o problema que se quer resolver. Nessa seção os grafos serão definidos formalmente assim como algumas das suas propriedades.

Podemos dizer que um grafo, denotado por: $G (V, E)$ é um conjunto V finito, não-vazio de pontos, cujos elementos são chamados de vértices, geralmente nós em ciências

de computação, conectados por um conjunto E de linhas, chamada de arestas, arcos ou enlaces. Uma aresta é um par distinto não-ordenado (v_i, v_j) , onde v_i e v_j são elementos distintos de V [123]. Normalmente, utiliza-se uma representação gráfica (geométrica) de um grafo, que facilita na sua aplicação para tratar um determinado problema. Um exemplo gráfico de um grafo pode ser observado na Figura 3.2.

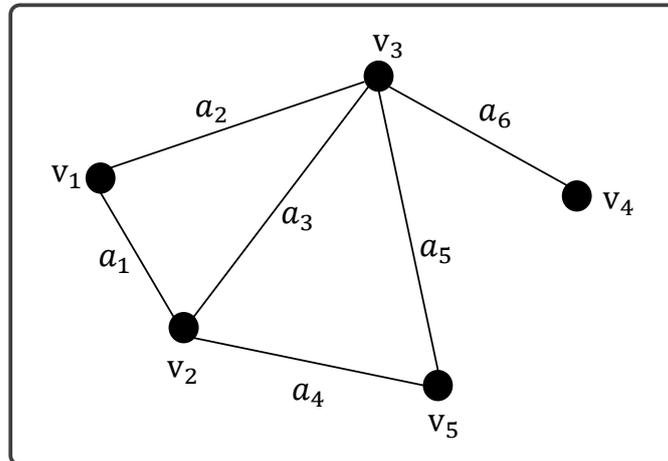


Figura 3.2: Exemplo de grafo
Adaptado: NETTO, 2003. [123].

Pode-se observar que os vértices são as extremidades (ou extremos) das arestas. A quantidade de vértices de um grafo (densidade de vértices) será denotada pela letra n e a quantidade de arestas (densidade de arestas), pela letra m .

Duas arestas são consideradas adjacentes, ou vizinhas, se possuírem um vértice em comum. Da mesma forma, dois vértices são adjacentes se possuírem uma aresta em comum. Na Figura 3.3 as arestas a_1 e a_2 são adjacentes, pois o vértice v_2 está presente em ambas, assim como a_2 e a_3 , com o vértice v_3 . Observa-se ainda que o vértice v_4 é vizinho de v_3 , devido ao compartilhamento da aresta a_3 , assim como v_1 e v_2 , com a aresta a_1 e v_2 e v_3 , com a aresta a_2 [123].

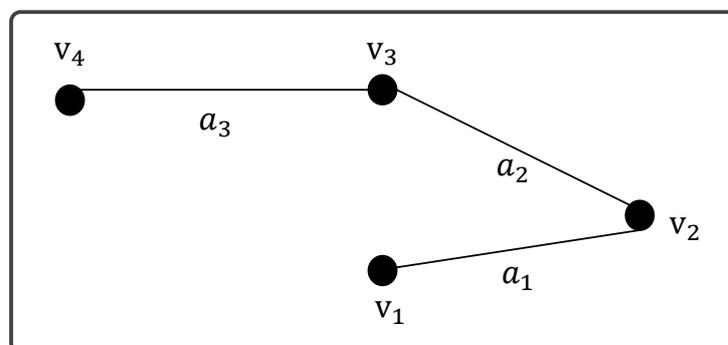


Figura 3.3: Adjacência de arestas
Adaptado: NETTO, 2003. [123].

Em um grafo, chamamos de caminho uma sequência de vértices, onde um vértice e seu sucessor na sequência possuem uma aresta ligando-os. Se existe um caminho entre dois vértices v_1 e v_2 , dizemos que v_1 alcança ou atinge v_2 e vice-versa. A quantidade de arestas é chamada de comprimento do caminho, dessa forma, caso se deseje saber o comprimento de um caminho será necessário de alguma forma, contar as arestas [123, 124].

Dizemos que um rótulo é uma cadeia de caracteres ou número que identifica um vértice ou uma aresta. Um grafo é dito rotulado, se todos os seus vértices e/ou arestas possuírem um rótulo. Os rótulos de um grafo formam o conjunto de rótulos do grafo. Assim, um grafo é dito valorado ou com pesos, se seus rótulos forem numéricos e esses números pertencerem a um conjunto devidamente especificado.

É definido como Caminho de Valor Máximo, o caminho elementar entre dois vértices, em um grafo valorado, onde a soma do valor das arestas é o máximo possível e Caminho de Valor Mínimo, o caminho elementar entre dois vértices, em um grafo valorado, onde a soma do valor das arestas é o mínimo possível [123–125].

A distância entre dois vértices de um grafo é o menor comprimento dos caminhos entre esses dois vértices. A medição dessas distâncias, se remetermos a uma topologia de rede, pode significar a distância, ou enlace, entre dois nós de rede onde um pacote deve passar e chegar até determinado destino. Assim, cálculos dinâmicos dessa distância é de grande interesse nas áreas de rede de computadores que, em geral, busca caminhos mais curtos em prol da eficiência da rede.

Uma outra questão de profundo interesse dentro da teoria dos grafos são as operações que podemos fazer os utilizando. Operações de construção de grafos, a partir de uniões, remoções, inserções de nós e arestas são de grande interesse. Não é o objetivo desse trabalho detalhar profundamente tais operações, sendo suficiente citá-las, pois as mesmas estarão presentes na implementação do modelo. Outras referências com o detalhamento sobre o tema pode ser encontrado em SIMOES *et al.* [126] e em GOLDBARG *et al.* [127].

3.7 Teoria estatística e teste t-student

Estatística é a ciência que utiliza-se das teorias probabilísticas para explicar a frequência da ocorrência de eventos, tanto em estudos observacionais quanto em experimentos para modelar a aleatoriedade e a incerteza de forma a estimar ou possibilitar a previsão de fenômenos futuros, conforme o caso. Teste de hipóteses é um procedimento estatístico que permite tomar uma decisão de aceitar ou rejeitar a hipótese nula H_0 entre duas ou

mais hipóteses, sejam elas nulas H_0 ou alternativas H_1 [128].

O teste t de Student ou somente teste t é um teste de hipótese baseado em uma distribuição t de Student. Essa premissa é normalmente usada quando a estatística de teste, na verdade, segue uma distribuição normal, mas a variância da população σ^2 é desconhecida. Nesse caso, é usada a variância amostral s^2 e com esse ajuste a estatística de teste passa a seguir uma distribuição t de Student.

Um das aplicações do teste t é quando existem situações em que precisamos saber se alguma característica é realmente diferente entre dois grupos de indivíduos.

Basicamente existem 3 tipos de teste t que são possíveis de serem aplicados: teste t de uma amostra, teste t de amostras independentes e teste t de amostras relacionadas (pareadas).

O teste t de uma amostra basicamente serve para verificar se os dados coletados é bem diferente ou não de uma média conhecida. Por outro lado, o teste t de amostra independentes e pareadas são comumente utilizados em delineamento seccionais e longitudinais prospectivos ou experimentos, respectivamente. O teste t para amostra independentes consiste na comparação de médias entre dois grupos, No entanto é necessária uma homogeneidade de variância, que nada mais é do que a variabilidade semelhante entre os grupos testados. Por outro lado, o uso do teste t pareado é realizado quando existe a situação em que o mesmo indivíduo fornece uma determinada característica para dois de comparação [129].

Em todos os tipos de testes t necessita-se relatar o valor de t que é chamado de razão crítica assim como do p -value, pois assim podemos identificar a veracidade da sua probabilidade (p). Com essas informações poderemos afirmar se a diferença ocorre na realidade ($p < 0,05$) e rejeitamos a hipótese nula ou ela existe apenas ao acaso ($p > 0,05$) e aceitamos a hipótese nula.

É comum a utilização do teste t não-pareado levando em conta que as amostras são independentes. Embora alguns casos deve-se que considerar que as amostras tem certa correlação, em termos práticos, essa abordagem é muito utilizada, principalmente onde há evidências de que existe uma fraca correlação. Assim, o teste leva em conta:

A. Para variâncias iguais:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{s^2(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2})}}; s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

com $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade e s o desvio padrão conjugado.

B. Para variâncias diferentes:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2})}}$$

Como esse teste não segue uma distribuição t , o cálculo do valor de p não é direto. No entanto, existe métodos computacionais para o cálculo da estimativa de p [130].

É comum o uso de uma escala de asteriscos (*) indicando se a diferença entre os grupos é significativa ou não. Quanto mais asteriscos forem representados, maior a confiabilidade de que aquela diferença não tenha sido fruto do acaso. Essa escala é pontuada como descrita na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Escala de Símbolos para cada valor de p

probabilidade	x	Símbolos
$p < x$	0,05	*
	0,01	**
	0,001	***
	0,0001	****

Assim, quanto mais estrelas maior a probabilidade de que o resultado represente uma diferença sem acasos.

Uma análise mais profunda dessa escala permite observar que quando temos o valor máximo de x , ou seja $x = 0,05$, temos satisfeita a condição para obtermos um Intervalo de Confiança (IC) de 95%.

4. Criação, Análise e Implementação do modelo

Para que se possa avaliar um potencial ganho do mecanismo D2D com mobilidade, desenvolveu-se um modelo matemático capaz de representar uma fragmento de um sistema de rede celular LTE-A em uma rede real. Análises de desempenho são, dessa forma, feita a partir desse modelo idealizado.

Toda a construção topológica, definição dos entes e relação entre eles, será apresentada levando em conta a teoria matemática que a suporta.

4.1 Representação de Antenas e Usuários

Inicialmente é feito o posicionamento das antenas no espaço A . Esse posicionamento é feito de maneira que o essa disposição se aproxime da disposição real das antenas em uma rede. Uma das formas mais interessantes de se fazer isso é utilizando algum processo matemático de ponto. Para redes sem fio, em geral, o processo pontual de Poisson (do inglês, *Poisson Point Process* - PPP), por representar de maneira aproximada, de acordo com pesquisas científicas recentes, as posições de estações rádio-base de uma rede celular [131], é bastante utilizado. Devido a sua natureza matemática é possível simplificar e lançar de propriedades que facilitam a análise. Nesse trabalho utilizaremos o PPP para representar a disposição das estações de rádio da rede.

Tomamos aqui o cuidado no uso do PPP para representar a nossa rede pois, dependendo dos fenômenos observados, é possível verificar restrições quanto ao seu uso. Os autores DENG *et al.* [132] e NASRI *et al* [133], em seus trabalhos, discutem cenários e desenvolvem análises em situações onde o uso do PPP pode não ser adequado, sendo a rede melhor representada com o uso de outros modelos. Todavia, isso é verdade em casos específicos dos fenômenos em estudo, por exemplo, quando deseja-se tratar questões de interferência, alocação dinâmica de canal, entre outros fenômenos. Em nosso modelo,

desconsideramos efeitos que, de certa maneira, nos impedem de usar o PPP para representar as estações de rádio pois o estudo leva em conta o modo D2D *inband-overlay*, situação onde o fenômeno da interferência é pouco relevante, e também por assumir que não existe disputa de acesso ao canal. Assim, o trabalho fará uso do PPP para representar as eNodeB's da rede e os usuários da rede, nos possibilitando análises que sem o uso desse processo seriam intratáveis [134–136].

No proposto modelo, assumimos que o processo é homogêneo e uniformemente distribuído. Assim é possível a utilização da equação 3.6. Estações de rádio e usuários são inseridos a partir de dois PPP independentes.

Neste passo, vale notar que embora existam diferenças conceituais com relação às antenas, estações rádio-base e a eNodeB's, em nossa nomenclatura e dentro do escopo do trabalho os mesmos terão o mesmo significado. Dessa forma, iremos nos referir a cada um desses termos sem distinção, tendo em mente que os mesmos tem o mesmo significado; quando nos referimos a *User Equipament* - (UE), também estaremos nos referindo a usuários e dispositivos. Neste trabalho tais termos terão o mesmo sentido, isso significa dizer que, em nossas observações, esses termos serão usados indistintamente, sem prejuízo no entendimento e conceituações assumidas.

4.2 Áreas de Cobertura

As eNodeB's, representadas pelos pontos gerados pelo PPP, emitem uma determinada potência de radiação eletromagnética, em uma dada direção ao longo do tempo. Nesse modelo iremos considerar que a radiação emitida é omnidirecional, ou seja, emite de maneira igual em todas as direções, considera-se ainda que o meio é isotrópico, ou seja, meio onde as propriedades físicas estão relacionadas com um ponto que independe da direção [138]. Geometricamente, representaremos como círculos a cobertura de cada eNodeB e, por definição, atenderão áreas iguais com alcances iguais. A figura 4.1 revela como é a cobertura em cada eNodeB:

Na figura é possível observar que a área mais clara, círculo onde o centróide é um ponto de Poisson, se trata do alcance de cada eNodeB e as áreas irregulares mais escuras, são as zonas sem cobertura. Assim, um UE está em situação de cobertura quando o mesmo está na região de alcance das eNodeB's e indisponível quando fora dessa região.

A esse círculo, puramente por questões conceituais, chamaremos de célula, ou seja, ao nos referimos sobre a área de cobertura, nos referimos também a célula. Como isso,

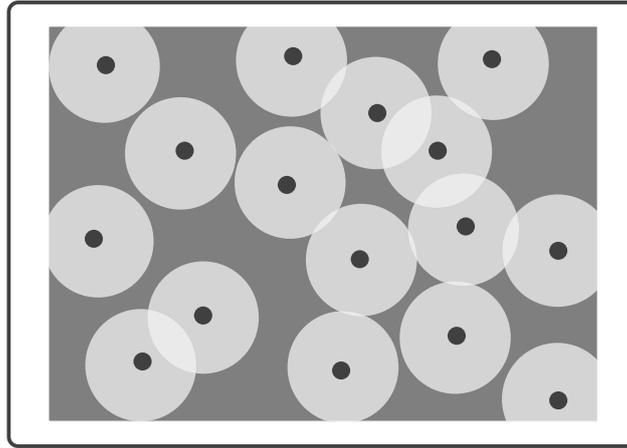


Figura 4.1: Esquemática da cobertura celular de cada antena

verifica-se que não há condição de cobertura celular fora da célula.

4.3 Mobilidade dos UEs

Em nosso modelo a mobilidade dos usuários é regida pelo BM. Este processo inicia-se do zero, possui incrementos independentes e estacionários com caminhos amostrais contínuos, em outras palavras, em \mathbb{R}^2 o movimento é independente para cada variável, ou seja, o movimento que o ponto faz em x é independente do movimento realizado em y . Com isso, temos, dessa forma, as características necessárias para a composição desse movimento.

Nesse contexto algumas situações de "fuga" de pontos da área podem ocorrer. Isso ocorre em situações onde esses pontos (no modelo: usuários) simplesmente "fogem" da área A , ou seja, o seu movimento faz com ele possa sair dessa área sendo, então, necessário um tratamento particular desse acontecimento. CAMPOS *et al.* [139], propõe que esse evento seja tratado de forma que, quando identificado, se faça uma reflexão de igual distância para dentro do mapa, ou seja, mecanismo que faz com que os pontos sempre estejam dentro do mapa, abordagem essa utilizada nesse trabalho.

Os usuários iniciam o seu movimento a partir de um ponto aleatório, sendo incrementado a cada instante t de um valor de variância (de acordo com a distribuição normal que compõe o BM), comum a todos os nós.

4.4 Representação de Redes por Grafos

Em ciências da computação os grafos são de fundamental importância, talvez devido ao extenso uso dessa ferramenta na área, justificando o intenso desenvolvimento de algoritmos para manipulá-los [140]. Um exemplo de uso é a aplicação em redes de computadores, onde nós podemos representar um componente da rede, seja um computador ou um servidor, simplesmente como uma relação entre nós (elementos de rede) e arestas (enlaces de comunicação).

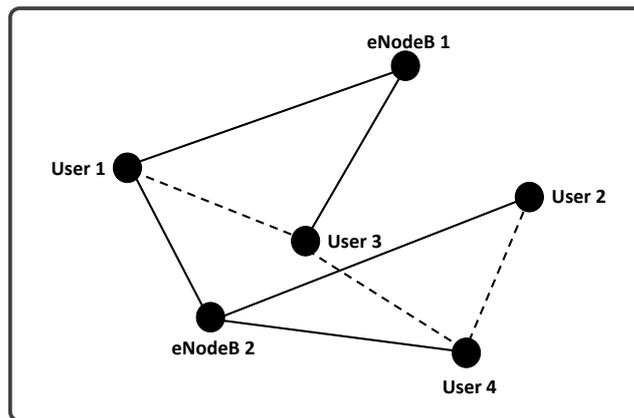


Figura 4.2: Esquemática da cobertura celular de cada antena

A figura 4.2 mostra um exemplo de uma abstração de uma rede representada por grafos. As arestas representadas por linha tracejada representam as comunicações que ocorrem diretamente entre os usuários e as linhas cheias as comunicações de usuários com eNodeB.

No proposto modelo será construído um grafo similar ao apresentado na figura 4.2 da seguinte maneira:

- (1) - Dispositivos e eNodeB's serão representados por nós (pontos);
- (2) - Considerando dois usuários quaisquer $User_1$ e $User_2$, com a posição dada por $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$, respectivamente. A aresta é estabelecida se:

$$d(User_1, User_2) = \sqrt{|x_2 - x_1|^2 + |y_2 - y_1|^2} \quad e \quad d(User_1, User_2) \leq \beta$$

- (3) Similarmente ao item (2) considerando um usuário $User_u$ e uma $eNodeB_w$, com posições $P_u(a, b)$ e $P_w(c, d)$, a aresta será estabelecida se:

$$d(User_u, eNodeB_w) = \sqrt{|c-a|^2 + |d-b|^2} \quad e \quad d(User_u, eNodeB_w) \leq \beta$$

sendo β correspondente ao limiar previamente estabelecido.

4.5 Estados dos Usuários

No proposto modelo os dispositivos dos usuários estão em apenas 3 estados de comunicação:

- a. Usuário com comunicação D2D - situação onde o dispositivo do usuário tem a disponibilidade de realizar tanto comunicações celulares tradicionais quanto comunicações D2D do tipo *relay*.
- b. Usuário sem comunicação D2D - situação onde os usuários tem a disponibilidade de realizar a comunicação celular somente.
- c. Usuário sem comunicação - situação onde o usuário está desprovido de qualquer comunicação.

Toda a comunicação D2D é do tipo *relay*, ou seja, são consideradas apenas as comunicações que tem como destino o acesso a eNodeB. Acessos diretos entre dispositivos não são considerados.

4.6 Análise do Modelo

Nesse trabalho estamos interessados em identificar os saltos necessários para que um usuário consiga, a partir de outro usuário próximo o suficiente, acessar indiretamente uma eNodeB.

Usaremos os grafos para representar situações de rede em determinado tempo, ou seja, formaremos grafos a cada intervalo de tempo t e calcularemos medidas de interesse sobre a topologia naquela instante, observando as comunicações que ocorrem entre dispositivos-dispositivo e dispositivos-antenas [141].

Ainda, para essa análise, utilizaremos duas situações de rede: esparsa e densa. A situação esparsa é aquela condição onde não existe, quantitativamente muitos pontos em

uma determinada área A, ou seja, os pontos (usuários) estão esparsos ou espalhados uns com os outros. A situação densa é aquela condição onde existe, quantitativamente, muitos pontos na área, de forma que estão muito próximos e distribuídos densamente pela área. Em particular, esta última condição é muito abordada para os padrões da geração 5G [90].

Na figura 4.3 ilustra uma situação de topologia esparsa e densa. Na figura 4.3(a) é um exemplo de topologia esparsa quanto a quantidade de eNodeB's em uma área A, já na figura 4.3(b) é ilustrado a topologia densa.

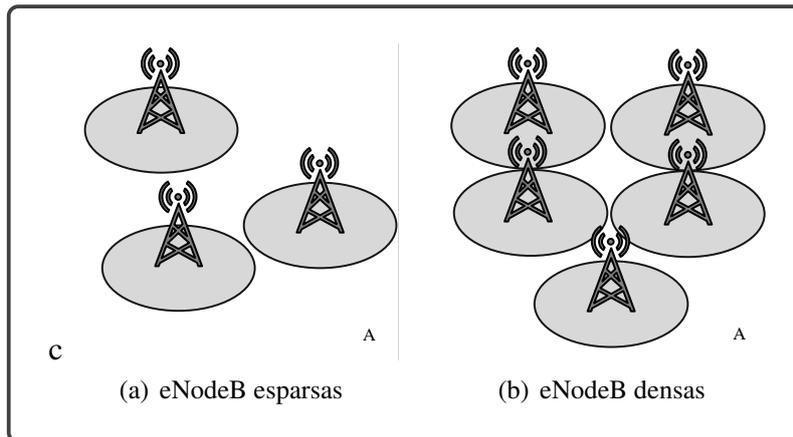


Figura 4.3: Exemplo de cenário esparsos e denso (eNodeB)

4.7 Métricas usadas

A métrica de medida utilizada compreenderá a porcentagem de usuários que conseguem acesso a eNodeB, seja via dispositivo de um usuário próximo ou diretamente a eNodeB.

Assim, para cada estado do dispositivo, como visto na seção 4.5, a porcentagem leva em conta:

$$\text{Atendimento (\%)} = \frac{\text{Número de usuários na comunicação}}{\text{Número de usuários}}$$

O desempenho é avaliado a partir da perspectiva de serviço, ou seja, levando em conta a porcentagem de UE's atendidas.

4.8 Implementação

Para a codificação do modelo e geração de eventos de simulação, foi implementado um código na linguagem *Python 3*, permitindo extrair resultados com base no modelo proposto.

A geração de PPP foi simulada com base nos trabalhos de STOYAN *et al.* [115] e STREIT [137] que descrevem que a simulação desse processo pode ser feita em dois passos:

- (1) - Criação de um número aleatório de pontos.
- (2) - Posicionamento desses pontos de forma aleatória.

Esses trabalhos resumem um método para calcular a média, ou esperança matemática, de pontos em uma determinada área. Assim somente é necessário que uma função crie números aleatórios e posicione esses pontos de forma aleatória, tomando por base a equação 3.6. Dessa forma é possível gerar os pontos pelo PPP na área.

Os pacotes NUMPY e NETWORKX, foram utilizados para que fossem possíveis os diversos cálculos aritméticos e a construção de grafos. Essas funções também serviram para a função que fez a análise da topologia do grafo.

O código foi estruturado e implementado da seguinte forma:

1. Criação da classe Ponto (x,y) , que associa dados ou atributos a operações com pontos euclidianos (x,y) numa só estrutura;
2. Criação das funções para geração de PPP, movimento Browniano, construção e análise de grafos;
3. Conversão e normalização dos parâmetros reais para o espaço do modelo;
4. Gravação de resultados em arquivos *logs* para análise em *software* gráfico.

Para que fosse possível utilizar a velocidade média como variável de entrada, era necessário elaborar uma maneira onde a variância pudesse variar o longo de um tempo t , continuamente. Assim, a seguinte expressão foi codificada para que fosse possível inserir a velocidade média dos usuários com parâmetro:

$$\text{variância} = \text{tempo} \cdot \text{velocidade}$$

Logo, os incrementos dos pontos se movendo ao longo do plano, se dá pelo tempo de observação e a velocidade inserida como parâmetro, que incrementa a variância da distribuição normal associada ao BM.

O código, em sua íntegra, pode ser visto no apêndice A.

5. Avaliação de desempenho

A partir do modelo construído, foi implementado um código, na linguagem *Python*, codificado e em sintonia com a modelagem matemática proposta, a fim de realizar um estudo sobre o comportamento da mobilidade dos dispositivos em uma rede celular LTE-A e como esse fenômeno afeta o desempenho do mecanismo D2D nessa rede.

O desempenho é avaliado a partir da perspectiva de serviço, ou seja, levando em conta a porcentagem de UE's atendidas em função da variação dos parâmetros em cada cenário.

5.1 Cenários de Rede

Nosso objetivo é avaliar o comportamento da mobilidade em uma determinada área A, que representará o segmento de rede de interesse. Nos baseamos em um cenário de rede LTE-A que se utiliza de estações-base *Small Cell*, comum em centros urbanos por causa da topografia da região e disposição de construções. Além disso a própria regulação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [142] limita a radiação em certas regiões. Em centros urbanos, por exemplo, não é permitida a construção de grandes estruturas para a instalação de antenas.

Tipicamente uma *Small Cell* de uma rede LTE-A, em uma região urbana, pode atender usuários em um raio de até 1.5 km (valor máximo) de sua base, isso sem considerar questões de limitações de recursos e processamento [68]. Considerando limitações de atendimento nos períodos de pico, seja no Período de Maior Movimento (PMM) ou na Hora de Maior movimento (HMM), essa cobertura é variável, situação onde a operadora de rede tem que reduzir o alcance, o que significa reduzir o raio de cobertura da antena, e realizar diversas manobras de rede para que se consiga oferecer serviços com o QoS exigido [143, 144]. Utilizaremos, dessa forma, parâmetros relativos a *Small Cell*, para compor nossos cenários.

Vale ressaltar, que é suficiente informarmos o alcance de cobertura de uma *Small Cell*, uma vez que o alcance, implicitamente, refere-se a potência do sinal, além de considerar também, as atenuações de qualquer natureza. Assim é desnecessário mais detalhes sobre a potência transmitida, atenuação típica do canal, perda por multipercursos, entre outros fatores, levando em conta que é suficiente tratarmos apenas o alcance da *Small Cell* ou eNodeB.

Tabela 5.1: Valores Típicos

Cenários	Valores Típicos	Unidade
Densidade das eNodeB's	-	Qtd/km ²
Alcance das eNodeB's	1.0	km
Densidade dos UE's	500	Qtd/km ²
Velocidade dos UE's	4.0	km/h
Alcance D2D	0.05	km

A tabela 5.1 mostra os parâmetros e lista os cenários que serão usados na avaliação do desempenho de rede. Para todos os cenários consideramos uma área de observação com formato quadrado com lado = 3 km, ou seja, $A = 9 \text{ km}^2$, em tamanhos reais de rede. Ao analisar um cenário, utiliza-se o valor típico para as outras variáveis que não estão sob avaliação.

5.2 Análise dos resultados

Nesta seção, apresentaremos os gráficos gerados a partir dos cenários propostos e faremos a discussão acerca do comportamento do desempenho, em função da porcentagem de usuários atendidos.

5.2.1 Características de simulação e construção de gráficos

Caracterizamos 2 tipos de simulações, que apresentam visões diferentes em um dado cenário de rede.

- (1) Avaliação em função dos parâmetros: gera resultados que permitem avaliar a porcentagem de UE's atendidas em função dos parâmetros do cenário.

- Foram feitas 20 rodadas cada uma com o tempo de simulação de 1200 segundos para cada parâmetro avaliado dentro do cenário.

(2) Avaliação em função do tempo: gera resultados que permitem avaliar a porcentagem de UE's atendidas em função do tempo.

- Foram feitas 20 rodadas, cada uma com o tempo de simulação de 300s segundos para cada parâmetro avaliado.

Com relação a simulação (1), é importante ressaltar que a cada rodada de simulação, uma nova topologia de rede era gerada, ou seja, a topologia inicial e disposição das antenas no mapa era alterada, assim que se iniciava uma nova rodada de simulação. Isso foi importante pois nos garante que as observações e resultados não estão condicionados a uma única topologia de rede.

A geração dos gráficos e toda a análise estatística, foi realizada com o uso do Software *Graphpad Prism 7.0*. Inicialmente, foi realizado o teste de normalidade de D'Agostino e Pearson nos dados obtidos. Em, seguida, foi aplicado o teste t paramétrico não pareado com o objetivo de comparar os resultados de diferentes grupos em um mesmo cenário em função do uso da tecnologia D2D.

Em todos os gráficos os asteriscos assinalam os parâmetros em que foram encontradas diferenças estatisticamente significativas pelo teste *t*. As barras representam as médias \pm erro padrão da média

5.2.2 Variação da cobertura da eNodeBs

Na Figura 5.1 pode-se observar a relação do percentual de UE's atendidas em função da variação do alcance das eNodeB's. Para o valor de densidade $\rho_a = 0.4$ eNodeB/km², duas curvas são consideradas. A azul refere-se ao comportamento, ao longo da variação desse parâmetro, da quantidade percentual de UE's com comunicação celular e D2D atendidas. Em vermelho, pontilhado, trata-se somente do comportamento da quantidade percentual de UE's que fazem apenas comunicação celular.

É possível verificar um aumento percentual estatisticamente significativo de UE's atendidas se levarmos em conta o uso do mecanismo D2D. Com o aumento do alcance, mais usuários entram na situação de cobertura celular e menos usuários tem comunicação D2D. Se comparamos as duas curvas existe uma tendência, aproximada, dessa relação ser linearmente constante. Isso sugere, em números absolutos, que a quantidade de UE's que entram na condição de cobertura celular é proporcional a quantidade dos que saem da condição de comunicação D2D.

A Figura 5.2 mostra como se dá o atendimento percentual de usuários, por parâmetro,

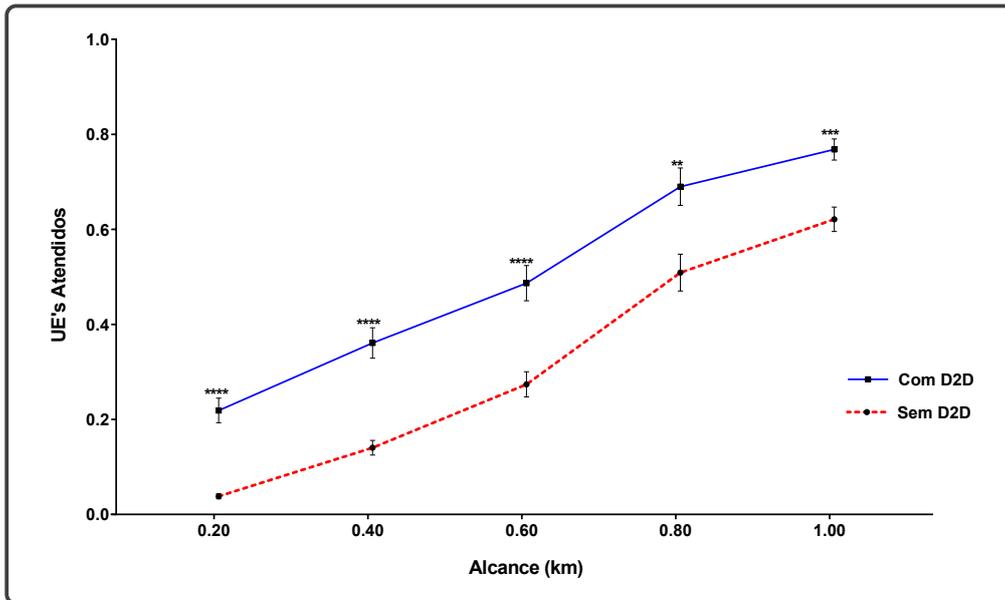


Figura 5.1: Variação do alcance da eNodeB com $\rho_a = 0.4$

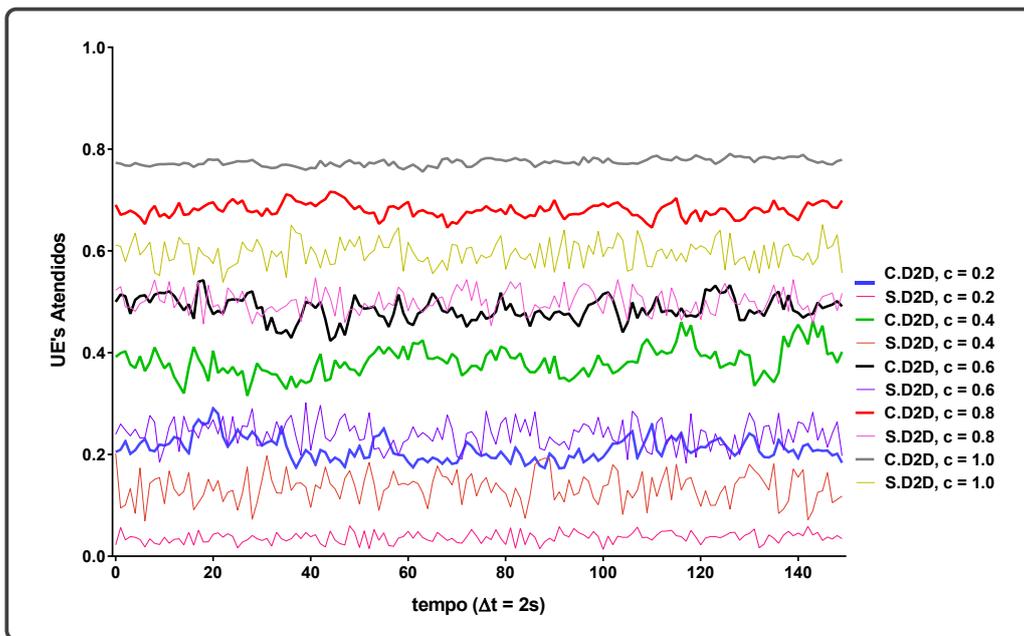


Figura 5.2: Variação no tempo com $\rho_a = 0.4$ e $\Delta t = 2s$

em uma janela de observação de 2s. Esse gráfico permite uma visão melhor de como se comporta a variação ou flutuação das médias amostrais ao longo do tempo de simulação. Nele é possível observar que não existe grandes flutuações da média no intervalo de tempo. Essa observação visa, por fim, perceber algum tipo de "salto" muito grande, ou muito intenso, o que poderia comprometer, de certa forma, a interpretação do resultado.

Na Figura 5.3 pode-se observar a relação do percentual de UE's atendidas em função da variação do alcance das eNodeB's para o valor de densidade $\rho_a = 1.0$ eNodeB/km².

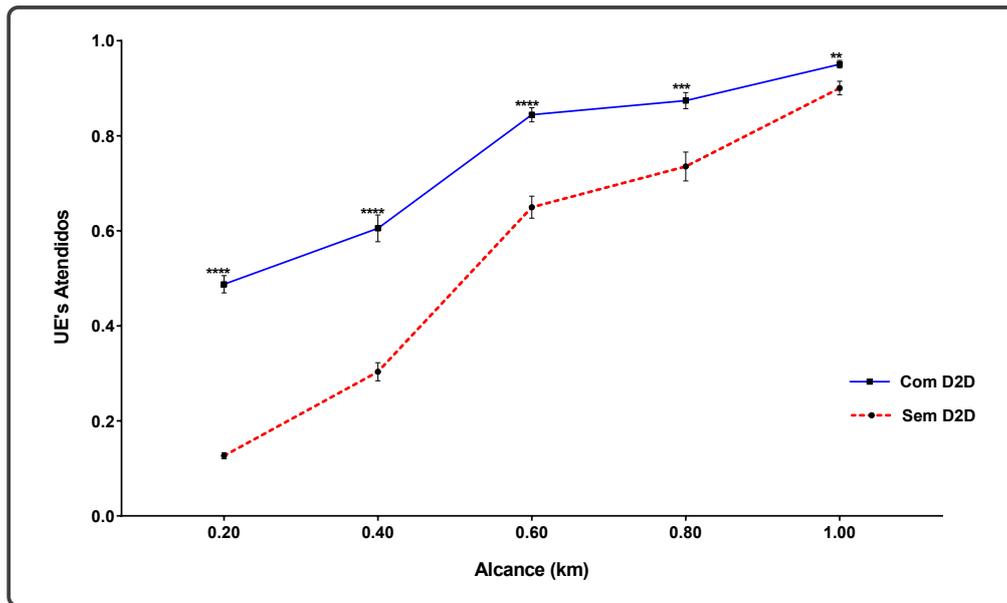


Figura 5.3: Variação do alcance da eNodeB com $\rho_a = 1.0$

Aqui também são apresentadas duas curvas, da mesma maneira que observado na Figura 5.1. Com o aumento da densidade das eNodeB's na rede, se comparado com o cenário esparsa, a cobertura e o atendimento percentual de UE's tende a aumentar, visto que existe mais eNodeB/km², e mais UE's tendem a ser atendidas. Ao contrário do cenário esparsa, nesse cenário, existe uma tendência da relação entre as curvas não ser linear, o que pode ser explicado pela elevação da densidade das eNodeB's. Mais usuários são cobertos pelas eNodeB's e menos relações D2D são realizadas na medida que se aumenta o alcance; quando elevamos a densidade, a quantidade de atendimento das UE's existe uma tendência maior quanto ao número de usuários D2D atendidos.

A Figura 5.4 mostra como se dá o atendimento percentual de usuários, por parâmetro. Nele também é possível observar que não existe grandes flutuações.

5.2.3 Variação da densidade das eNodeB's

Na Figura 5.5 pode-se observar a relação do percentual de UE's atendidas em função variação da densidade das eNodeB's. É possível observar que o atendimento é maior quando se utiliza o mecanismo D2D, em comparação com o a curva onde esse mecanismo não está presente. Pode-se observar ainda que as variações da curva em azul acompanha, de maneira aproximada, a curva em vermelho. Isso faz sentido, considerando que a medida que se aumenta a densidade de antenas, também se aumenta a cobertura celular.

A Figura 5.6 mostra como se dá o atendimento percentual de usuários, por parâmetro, ao longo do tempo de 2s. Nessa última análise é possível observar, com maior nitidez,

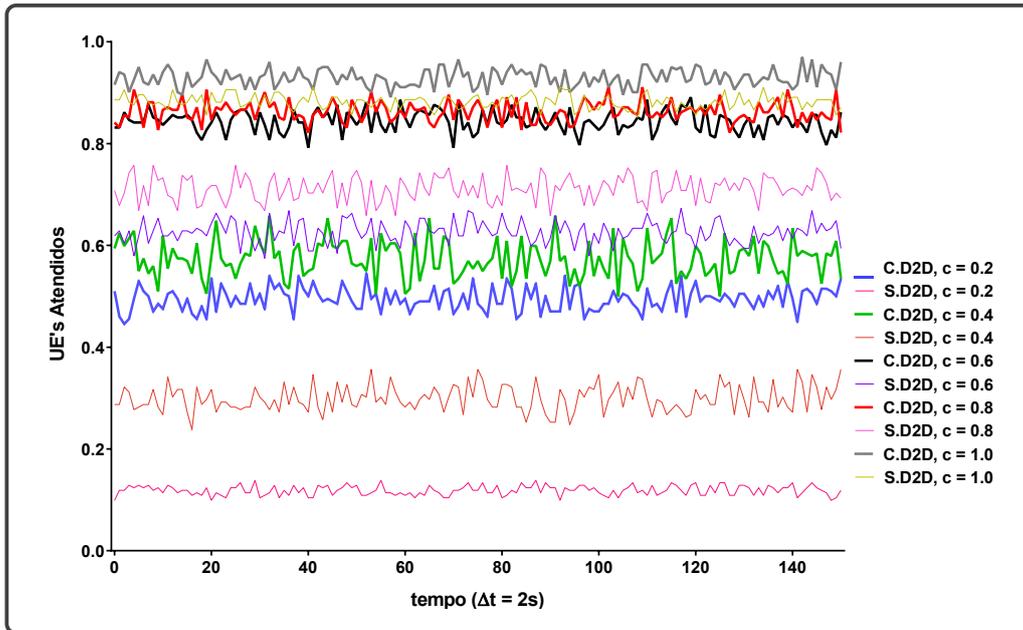


Figura 5.4: Variação no tempo com $\rho_a = 1.0$ e $\Delta t = 2s$
 UE's - User Equipaments, C.D2D - com D2D, S.D2D - sem D2D, c - cobertura e Δt - variação de tempo.

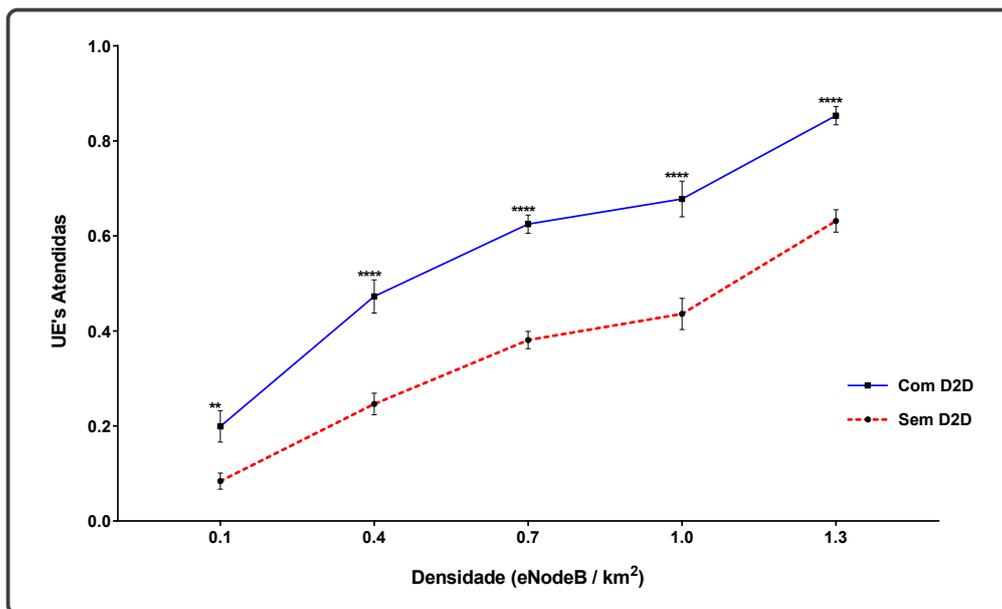


Figura 5.5: Variação da densidade de antenas

que existem poucas flutuações, o que garante nos garante resultados mais confiáveis.

5.2.4 Variação da densidade de UEs

Os gráficos mostrados na Figura 5.7, sugerem que não existe uma grande mudança de cobertura quando variamos de uma densidade de 100 usuários/km² para 250 usuários/km²,

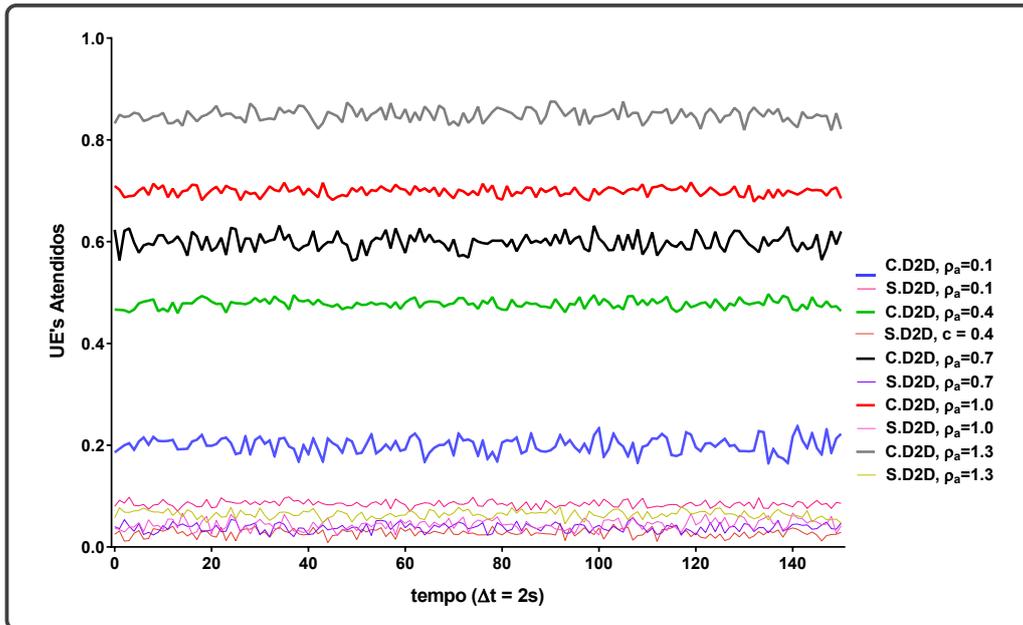


Figura 5.6: Avaliação da média amostral ao longo do tempo com $\Delta t = 2s$ UE's - *User Equipaments*, C.D2D - com D2D, S.D2D - sem D2D, ρ_a - densidade de antena e Δt - variação de tempo.

considerando que não podemos avaliar uma tendência pois as curvas nesse intervalo estão dentro da margem de erro. A partir desse valor, é possível observar uma substancial elevação do número de atendimentos.

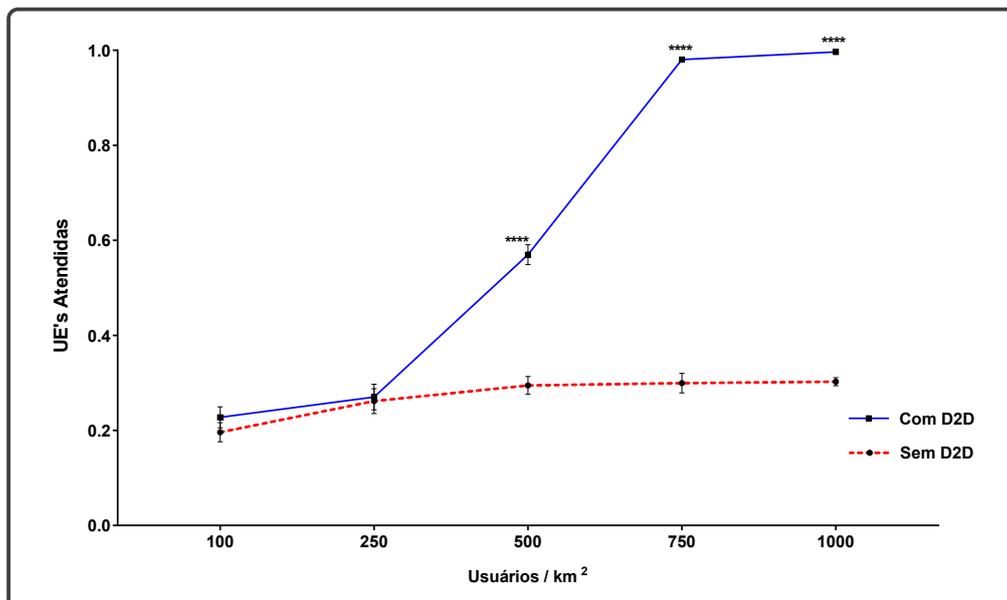


Figura 5.7: Variação da densidade de usuários $\rho_a = 0.4$

Esse mesmo fenômeno é observado quando fazemos a análise no cenário de topologia densa, representada na Figura 5.8. Como os valores entre 100 usuários/km² e 250

usuários/km² não há diferença estatisticamente significativa entre o uso de D2D e a ausência deste. Os valores encontrados estão dentro da margem de erro. Contudo, a partir de 500 usuários por km² é observado um aumento significativo do percentual de usuários atendidos.

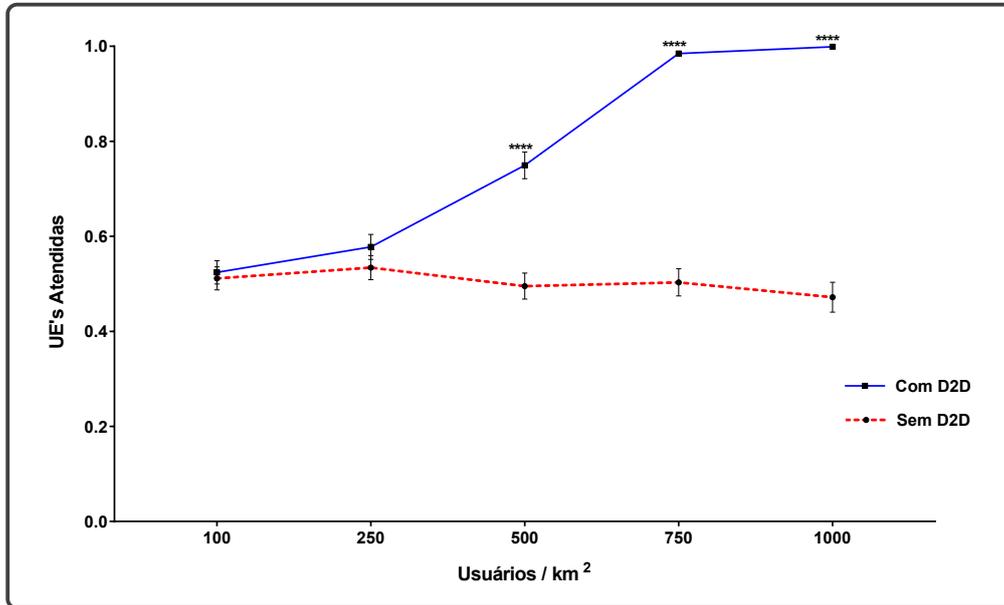


Figura 5.8: Variação da densidade de usuários $\rho_a = 1.0$

5.2.5 Variação da mobilidade dos UEs

Este cenário avalia o comportamento, avaliado no percentual de atendimentos dos UE's, para a variação da mobilidade. Percebe-se tanto para a topologia esparsa 5.9 quanto para a densa 5.10 que não existe variação do número de atendimentos. Isso significa que a mobilidade não interfere no percentual de UE's atendidas. Isso faz sentido pois, em nosso modelo, não avaliamos o tempo de contato entre os dispositivos, e sim o número de contatos. Dessa forma, tais resultados, confirmam o sentimento de que a mobilidade, traduzida em variabilidade da posição mais ou menos intensa, não interfere no desempenho da rede. Contudo, ao comparar os grupos com D2D e sem D2D, percebemos que o percentual de usuários atendidos, é estatisticamente maior quando se utiliza o D2D independentemente do grau de mobilidade e do tipo de topologia.

5.2.6 Variação do alcance D2D

Como o observado no gráfico 5.11, cenário esparsa, e no gráfico 5.12, cenário denso, até 0.025 Km não há aumento no percentual de atendimento de usuários pelo uso do D2D. Acima desses valores, se observa um aumento estatisticamente significativo no percentual

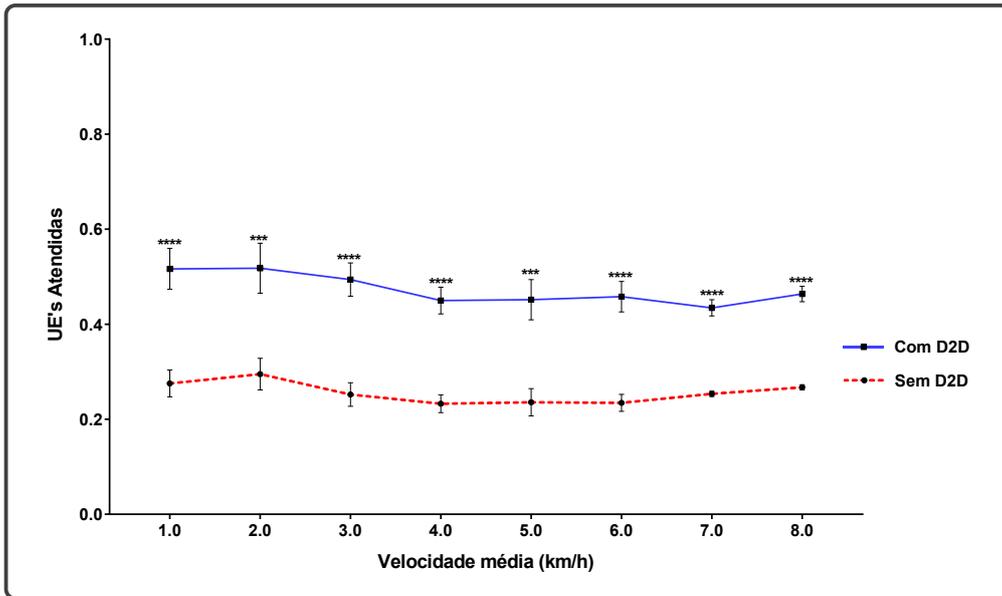


Figura 5.9: Variação da mobilidade dos usuários com $\rho_a = 0.4$

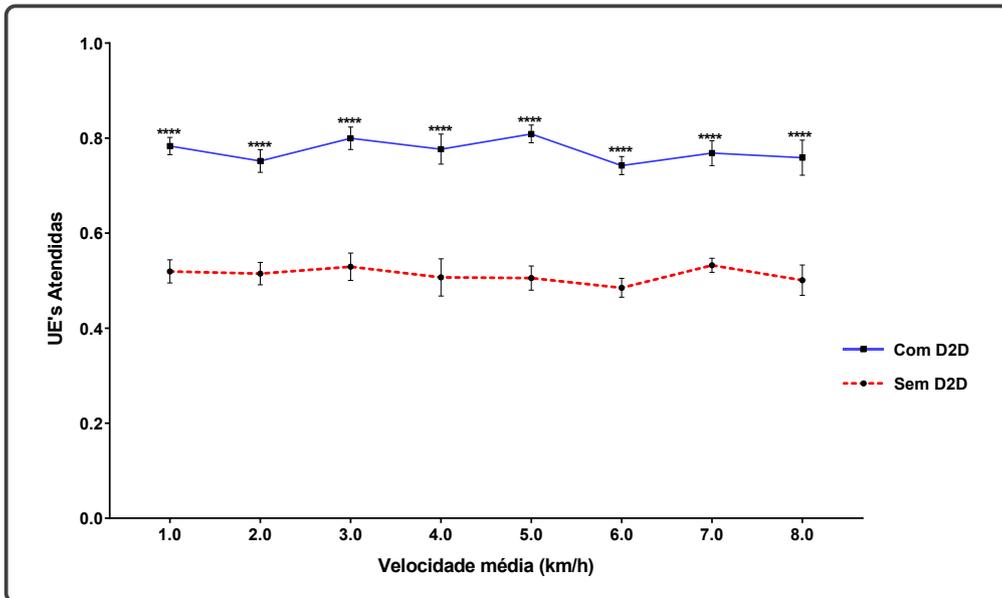


Figura 5.10: Variação da mobilidade dos usuários com $\rho_a = 1.0$

de atendimento de usuários em função do uso do D2D, sendo este efeito mais intenso a partir do alcance de 0.075 km.

Considerando apenas as relações de comunicação celular, ou seja, sem D2D, representado pelas linhas vermelhas nas Figuras 5.11 e 5.12, podemos observar que ocorre um aumento, aproximadamente constante, do atendimento percentual dos usuários quando a topologia de rede passa de esparsa para densa. Este fato pode ser comprovado graficamente pelo descolamento vertical da curva Sem D2D de valores próximos a 0.25 (na Figura 5.11) para cerca de 0.5 (na Figura 5.12).

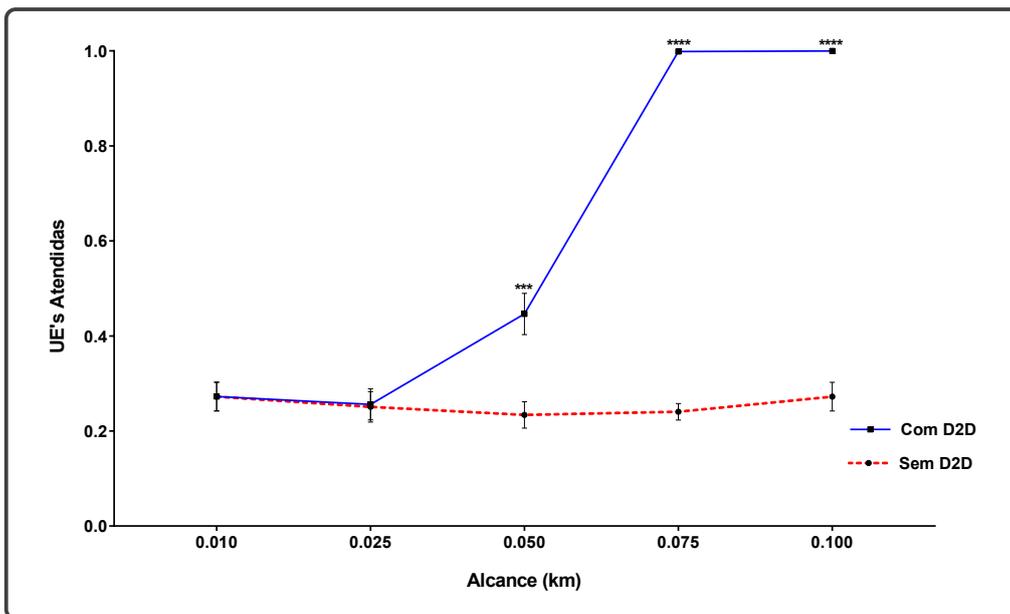


Figura 5.11: Variação da mobilidade dos usuários com $\rho_a = 0.4$

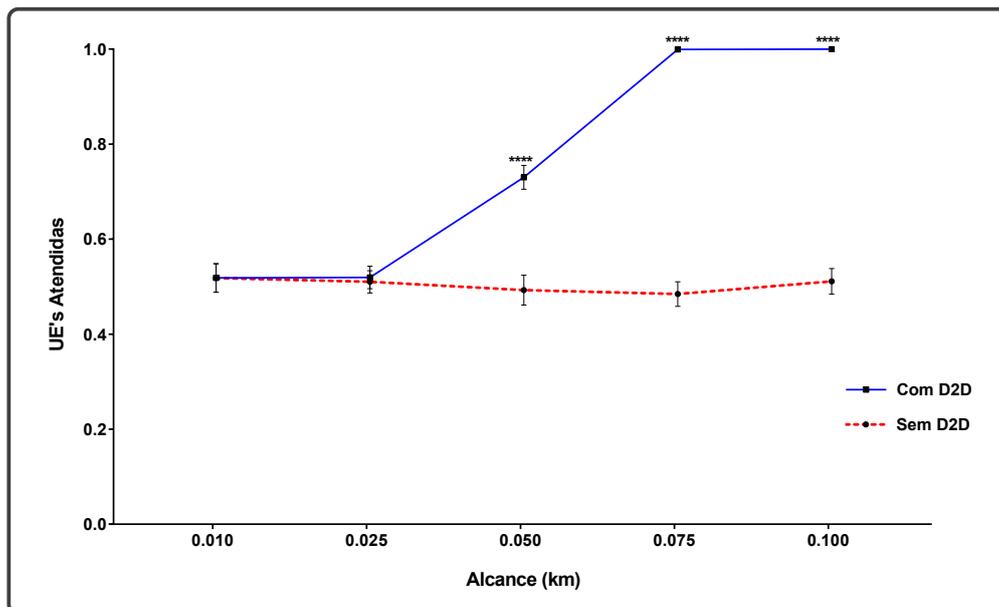


Figura 5.12: Variação da mobilidade dos usuários com $\rho_a = 1.0$

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho realizamos uma avaliação de desempenho de uma rede LTE-A com D2D, sob a perspectiva de atendimento percentual de usuários, a partir da análise de diferentes cenários de rede. Para isso, foi necessário o desenvolvimento de um modelo matemático capaz de representar, de maneira aproximada, uma topologia de uma rede real.

A partir desse modelo, foi desenvolvido um código na linguagem Python, que permitiu a extração de resultados em função da variação dos parâmetros em cada cenário: alcance das antenas, densidade de antenas, densidade de usuários, mobilidade dos usuários e alcance D2D.

Com isso, foi possível avaliar que existe ganhos com o uso do D2D se comparado a situações sem esse mecanismo, mesmo na presença da mobilidade dos usuários.

Observamos, também, que no cenário onde variamos a velocidade dos dispositivos, que tanto para a topologia esparsa quanto para a densa, não existe variação do número de atendimentos. Isso ocorre porque as medições foram feitas em um determinado instante t , sem levar em conta a intermitência do encontro.

Como trabalhos futuros, entendemos ser importante considerar o uso de modelos que representam melhor a mobilidade humana, por exemplo, *Lèvy flight*. Também é importante levar em conta o tempo de contato entre os nós para estimativas de taxa média de dados, considerações sobre o tratamento do *textithandover* e situações de D2D mesmo com usuários dentro do raio de cobertura celular.

Por fim, é interessante também avaliar o consumo da bateria dos dispositivos, o tratamento de interferência e também o uso de modelos de desvanecimento de sinal.

Referências Bibliográficas

- [1] SONG, L., NIYATO, D., ZHU H., HOSSAIN, E., **Wireless Device-to-Device Communications and Networks**. 1 ed. United Kingdom, Cambridge University Press, 2015.
- [2] BISDIKIAN, C. "An overview of the Bluetooth wireless technology", **IEEE Communications Magazine**, vol.39, no.11, pp.86-94, 2001.
- [3] ASADI A., MANCUSO V. "WiFi Direct and LTE D2D in action", **Wireless Days (WD)**, 6686520, Valencia, Spain, 13-15 Nov 2013.
- [4] PYATTAEV, A., JOHNSON, K., ANDREEV, S., et al. "3GPP LTE traffic offloading onto WiFi Direct", **Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)**, 6533328, Shanghai, China, 7-10 April 2013.
- [5] CONDOLUCI M., MILITANO L., ORSINO A., et al. "LTE-direct vs. WiFi-direct for machine-type communications over LTE-A systems", **Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)**, 7343681, Hong Kong, China, 30 Aug.-2 Sept. 2015.
- [6] KAR, U. N., SANYAL, D. K. "An overview of device-to-device communication in cellular networks", **ICT Express**, 2017, doi.org/10.1016/j.icte.2017.08.002, ISSN 2405-9595.
- [7] SHAO, Y. L., CHUN, C. C., GRACE S. T. L., et al. "Enhanced LTE Device-to-Device Proximity Services", **IEEE Communications Magazine**, vol.54, no.5, pp.154-159, 2016.
- [8] FODOR, G., DAHLMAN, E., MILDH D., et al. "Design Aspects of Network Assisted Device-to-Device Communications", **IEEE Communications Magazine**, vol.50, no.3, pp.170–177, 2012.

- [9] CHAABAN, A., SEZGIN, A. "Device-Relaying in Cellular D2D Networks: A Fairness Perspective", **International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks**, vol. 156, pp. 653-664, 2015.
- [10] MUMTAZ, S., RODRIGUEZ, J. **Smart Device to Smart Device Communication**. 1 ed. Switzerland, Cambridge Springer, 2014.
- [11] YUFENG, W., VASILAKOS, A. V., QUN J., et al. **Device-to-Device based Proximity Service: Architecture, Issues, and Applications**. 1 ed. USA, CRC Press, 2017.
- [12] DAHLMAN, E., PARKVALL, S., SKÖLD, J. **4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G**. 3 ed. USA, Academic Press, 2016.
- [13] COX, C. **An Introduction to LTE**. 2 ed. USA, Wiley, 2014.
- [14] DOPPLER, K., RINNE M. P., JANIS, P., et al. "Device-to-Device Communications; Functional Prospects for LTE-Advanced Networks", **IEEE International Conference on Communications Workshops**, 5208020, Dresden, Germany, 14-18 June 2009.
- [15] DOPPLER, K., RINNE, M., WIJTING, C., RIBEIRO C. B., et al. "Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks", **IEEE Communications Magazine**, vol.47, no.12, pp.42-49, 2009.
- [16] XIANG, C., LIUGING, Y., XIA S. "D2D for Intelligent Transportation Systems: A Feasibility Study", **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, vol. 18, no.4, pp.1784-1793, 2015.
- [17] JI, M., CAIRE, G., MOLISCH, A. F. "Wireless Device-to-Device Caching Networks: Basic Principles and System Performance", **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol. 34, no. 1, pp. 176-189, 2016.
- [18] LIU, J., NEI, K., JIANFENG, M., et al. "Device-to-Device Communication in LTE-Advanced Networks: A Survey", **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol.17, no. 17, pp. 1923-1940, 2015.
- [19] SHAO, Y. L., CHUN, C. C., FAN, M. T., et al. "3GPP device-to-device communications for beyond 4G cellular networks", **IEEE Communications Magazine**, vol.54, no.3, pp.29-35, 2016.

- [20] IRFAN, M., SHER, J., ULLAH, N., et al. "5G Wireless Technology- An overview of the current Trends", **International Journal of Computer Applications Technology and Research**, vol. 5, no. 7, pp. 489–494, 2016.
- [21] PIRINEN, P. "A brief overview of 5G research activities", **5G for Ubiquitous Connectivity (5GU)**, 7041023, Akaslompolo, Finland, 26-28 Nov. 2014.
- [22] GUPTA, A., JHA, R. K. "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies", **IEEE Access**, vol. 3, pp.1206-1232, 2015.
- [23] QINGGING, W., GEOFFREY, Y. L., WEN, C., et al. "An Overview of Sustainable Green 5G Networks", **IEEE Wireless Communications**, vol.24, no.4, pp. 72-80, 2017.
- [24] BISWASH, S. K., ZIVIANI, A., JAIN, R., et al. "Device-to-Device Communication in 5G Networks", **Mobile Networks and Applications**, vol. 22, no. 6, pp. 995–997, 2017.
- [25] MACH, P., BECVAR, Z., VANEK, T. "In-Band Device-to-Device Communication in OFDMA Cellular Networks: A Survey and Challenges", **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, Vol. 17, no. 4, pp. 1885-1922, 2015.
- [26] DONG, L., YONG, L. "In-Band Emission in LTE-A D2D: Impact and Addressing Schemes", **Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**, 7145876, Glasgow, United Kingdom, 11-14 May 2015.
- [27] ASADI, A., MANCUSO, V., GUPTA, R. "An SDR-based experimental study of outband D2D communications", **INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, IEEE**, 7524372, San Francisco, CA, USA, 10-14 April 2016.
- [28] ASADI, A., Q., MANCUSO, V. "A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks", **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, Vol. 16, pp. 1801-1819, 2014.
- [29] ASTELY, D., DAHLMAN, E., FODOR, G. "LTE Release 12 and Beyond". **IEEE Communication Magazine**, vol.51, no. 7, pp. 154-60, 2013.
- [30] CHAI, Y., QINGHE, D., PINYI, R. "Partial time-frequency resource allocation for device-to-device communications underlying cellular networks", **International Conference Communications (ICC)**, 6655570, Budapest, Hungary, 9-13 Jun., 2013.

- [31] GROSVENOR, E. S, WESSON, M. **Alexander Graham Bell: The Life and Times of the Man Who Invented the Telephone.** 1 ed. USA, Harry N Abrams, 1997.
- [32] MEUCCI, S. **Antonio and the Electric Scream -The Man Who Invented the Telephone.** 1 ed. Massachusetts, USA, Branden Books, 2010.
- [33] RABOY, M. **Marconi: The Man Who Networked the World.** 1 ed. USA, Oxford University Press, 2016.
- [34] CROWLEY, D., HEYER, P. **Communication in History: Technology, Culture, Society.** 6 ed. New York, USA, Routledge, 2010.
- [35] HOLMA, H., TOSKALA, A. **HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications.** 1 ed. England, John Wiley & Sons, 2009.
- [36] NETO, V. S. **Redes de Telecomunicações. Sistemas Avançados.** 1 ed. Brasil, Érica, 2015.
- [37] SVERZUT, J. U. **Redes Convergentes - Entenda a Evolução das Redes de Telecomunicações a Caminho da Convergência.** 1 ed. Brasil, Artliber, 2008.
- [38] RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice.** 2 ed. USA, Prentice Hall, 2002.
- [39] TANENBAUM, A. S., WETHERALL, D. **Redes de computadores.** 5 ed. Brasil, Pearson, 2011.
- [40] KUROSE, J. F., ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet. Uma Abordagem Top-Down.** 6 ed. Brasil, Pearson, 2015.
- [41] FOROUZAN, B. A. **Comunicação de dados e redes de computadores.** 4 ed. Brasil, AMGH, 2008.
- [42] COMER, D. E. **Redes de Computadores e Internet.** 6 ed. Brasil, Bookman 2016.
- [43] WISNIEWSKI, S. **Wireless and Cellular Networks.** 1 ed. United Kingdom, Prentice Hall, 2004.
- [44] NETO, V. S. **Sistemas de Telefonia - Fundamentos, Tecnologias e Funcionamento de Redes.** 1 ed. Brasil, Érica, 2015.
- [45] NOLL, E. **Introduction to Telephones and Telephone Systems.** 3 ed. USA, Artech House Print on Demand, 1999.

- [46] MIAO, G., ZANDER, J., KI, W. S., SLIMANE, B. S. **Fundamentals of Mobile Data Networks**. 1 ed. USA, Cambridge University Press, 2016.
- [47] AGAR, J. **Constant Touch: A Global History of the Mobile Phone (Revolutions in Science)**. 1 ed. United Kingdom, Icon Books, 2004.
- [48] REGAN, G.O. **Introduction to the History of Computing: A Computing History Primer**. 1 ed. USA, Springer, 2016.
- [49] VORA J., LOPA M. S. "Evolution of mobile generation technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology 5G", **International Journal of Modern Trends in Engineering and Research**, vol. 2, pp. 284-285, 2015.
- [50] BODIC, L. G. **Mobile Messaging Technologies and Services: SMS, EMS and MMS**. 1 ed. USA, John Wiley & Sons, 2003.
- [51] GLISIC, S. G. Savo G., LEPPÄNEN P. A. **Wireless Communications: TDMA versus CDMA**. 1 ed. Netherlands, Springer, 1997.
- [52] MOULY M. **The GSM System for Mobile Communications**. 1 ed. USA, Telecom Publishing, 1992.
- [53] FURUSKÄR, A., MAZUR, S., MULLER, F., et al. "EDGE: enhanced data rates for GSM and TDMA/136 evolution". **IEEE Personal Communications**, vol. 6, no.3, pp. 56-66, 1999.
- [54] GARG V. K. **Wireless Network Evolution: 2G to 3G**. 1 ed. Chicago, USA, Prentice Hall, 2001.
- [55] STAVROULAKIS, P. **Third Generation Mobile Telecommunication Systems: UMTS and IMT-2000**. 1 ed. Germany, Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [56] KARIM, M. R., SARRAF, M. **W-CDMA and cdma2000 for 3G Mobile Networks**. 1 ed. USA, McGraw-Hill Education, 2002.
- [57] WALKE, B. H., SEIDENBERG, P., ALTHOFF, M. P. **UMTS: The Fundamentals**. 1 ed. Germany, Wiley, 2003.
- [58] SMITH, C., COLLINS, D. **3G Wireless Networks**. 2 ed. USA, McGraw-Hill Professional Publishing, 2006.
- [59] SMITH, C. **3G Wireless Networks**. 2 ed. New York, USA, McGraw-Hill, 2007.

- [60] DAHLMAN, E., PARKVALL, S., SKÖLD, J. **3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband**. 2 ed. USA, Academic Press, 2010.
- [61] KORHONEN, J. **Introduction to 3G Mobile Communications**. 2 ed. USA, Artech House, 2007.
- [62] KLEMENS, G. **The Cellphone: The History and Technology of the Gadget That Changed the World**. 1 ed. North Carolina, USA, McFarland, 2013.
- [63] ISLAM, G. Z. **IEEE 802.11 Wireless LAN**. 1 ed. USA, LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
- [64] PRASAD, R., VELEZ, F. J. **WiMAX Networks: Techno-Economic Vision and Challenges**. 1 ed. Spain, Springer, 2010.
- [65] HANZO, L., AKHTMAN, Y., LI, W., et al. **MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX: Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo Transceivers**. 1 ed. United Kingdom, Wiley-IEEE Press, 2010,
- [66] BIANZINO, A. P., CHAUDET, C., ROSSI, D., et al. "A Survey of Green Networking Research". **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol. 14, no.1, pp. 3-20, 2012.
- [67] DAVID, A., DAHLMAN, E., FURUSKÄR, A. "LTE: the evolution of mobile broadband". **IEEE Communications Magazine**, vol. 47, no.4, pp. 44-51, 2009.
- [68] HOLMA, H., TOSKALA, H., REUNANEN, J. **LTE Small Cell Optimization: 3GPP Evolution to Release 13**. 1 ed. United Kingdom, Wiley, 2016.
- [69] TAFERNER, M., BONEK, E. **Wireless Internet Access over GSM and UMTS (Signals and Communication Technology)**. 1 ed. USA, Springer, 2002.
- [70] MISHRA A. R. **Advanced Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G.Evolution to 4G**. 1 ed. England, Wiley, 2006.
- [71] SAUTER, M. **From GSM to LTE-Advanced: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband**. 2 ed. United Kingdom, Wiley, 2014.
- [72] SCHWARZ, S., IKUNO J. C. SIMKO, M., et al. "Pushing the Limits of LTE: A Survey on Research Enhancing the Standard", **IEEE Access**, vol. 1, pp.51-62, 2013.
- [73] GOLAU, A., MUSTAPHA, M., PATANAPONGPIBUL, L. B. "Femtocell access control strategy in UMTS and LTE", **IEEE Communications Magazine**, Vol. 47, no. 9, pp. 117-123, 2009.

- [74] XENAKIS, D., PASSAS, N., MERAKOS, L., et al. "Mobility Management for Femtocells in LTE-Advanced: Key Aspects and Survey of Handover Decision Algorithms", **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, Vol. 16, no. 1, pp. 64-91, 2013.
- [75] AHMADI, S. **LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies**. 1 ed. USA, Academic Press, 2013.
- [76] SACRITÁN, D. M., MONSERRAT J. F., PEÑUELAS. "On the way towards fourth-generation mobile: 3GPP LTE and LTE-advanced". **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking - 3GPP LTE and LTE Advanced**, vol. 2009, no. 4, pp. 1-10, 2009.
- [77] KANCHI, S., SANDILYA, S., BHOSALE, D. et al. "Overview of LTE-A technology". **Global High Tech Congress on Electronics (GHTCE)**, 6767272, Shenzhen, China, 17-19 Nov. 2013.
- [78] TECHNOLOGIES, A., RUMNEY, M. **LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges**. 2 ed. United Kingdom, Wiley, 2013.
- [79] PEREZ, A. **LTE & LTE Advanced: 4G Network Radio Interface (Networks and Telecommunications)**. 1 ed. United Kingdom, Wiley, 2015.
- [80] DAHLMAN, E., PARKVALL, S., SKÖLD, J. **4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband**. 1 ed. USA, Academic Press, 2011.
- [81] SARKAR, S. K., BASAVARAJU, T. G., PUTAMADAPPA, C. **Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Principles, Protocols and Applications**. 1 ed. USA, Auerbach Publications, 2007.
- [82] MISRA, S., WOUNGANG, I., MISRA, S. C. **Guide to Wireless Ad Hoc Networks**. 1 ed. England, Springer, 2009.
- [83] SAFDAR, G. A., REHMAN, M. U., MUHAMMAD, M., et al. "Interference Mitigation in D2D Communication Underlying LTE-A Network", **IEEE Access**, vol. 4, pp. 7967-7987, 2016.
- [84] DONGHAN, K., YONGJUN, K., JINYOUNG, O. "Discovery resource grouping for D2D discovery for mitigation of in-band emission in LTE-Advanced". **Globecom Workshops**, 7063542, Austin, TX, USA, 8-12 Dec. 2014.

- [85] YANG, W. B., SOURYAL, M., GRIFFITH, D. "LTE uplink performance with interference from in-band device-to-device (D2D) communications". **Wireless Communications and Networking Conference**, 7127550, New Orleans, LA, USA, 9-12 March, 2015.
- [86] LI, W., HUAN, T. **Device-to-Device Communications in Cellular Networks**. 1 ed. Switzerland, Springer, 2016.
- [87] JAE, H. L., MYONG, S. P., SAYED, C. S. "Computer and Communication Systems". **Computer and Communication Systems**, 8075279, Krakow, Poland, 11-14 July, 2017.
- [88] MUR, C. D., SAAVEDRA, A. G., SERRANO, P. "Device-to-device communications with Wi-Fi Direct: overview and experimentation", **IEEE Wireless Communications**, vol. 20, no. 3, pp. 96-104, 2013.
- [89] CHONGGANG, W., TAO, J., QIAN, Z. **ZigBee Network Protocols and Applications**. 1 ed. USA, Auerbach Publications, 2016.
- [90] FOUKAS, X., PATOUNAS G., ELMOKASHFI, A., et al. "Network Slicing in 5G: Survey and Challenges". **IEEE Communications Magazine**, vol. 55, no. 5, pp. 94-100, 2017.
- [91] FEI, H. **Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective**. 1 ed. USA, Wiley, 2015.
- [92] MUIRHEAD, D., IMRAN, M. A., ARSHAD, K. "A Survey of the Challenges, Opportunities and Use of Multiple Antennas in Current and Future 5G Small Cell Base Stations". **IEEE Access**, vol. 4, pp. 2952-2964, 2016.
- [93] RAHNEMA, M., DRYJANSKI, M. **From Lte to Lte-Advanced Pro and 5G (Mobile Communications)**. 1 ed. England, Artech House, 2017.
- [94] XUEMIN, S. "Device-to-device communication in 5G cellular networks". **IEEE Network**, vol. 29, no. 2, pp. 2-3, 2015.
- [95] OSSEIRAN, A., MONSERRAT, J. F., MARSCH, P., et al. **5G Mobile and Wireless Communications Technology**. 1 ed. United Kingdom, Cambridge University Press, 2016.
- [96] AKPAKWU, G. A., SILVA, J. B., HANCKE, G. P., et al. "A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges". **IEEE Access**, vol. PP, no. 99, pp. 1 - 24, 2017.

- [97] LIN, Z., MING, X., GANG, W., et al. "A Survey of Advanced Techniques for Spectrum Sharing in 5G Networks". **IEEE Wireless Communications**, vol. 24, no. 5, pp. 44 - 51, 2017.
- [98] AGIWLA, M., ROY, A., SAXENA, N. "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey". **IEEE Communications Magazine**, vol. 18, no. 3, pp. 1617 - 1655, 2016.
- [99] FNENG, H., BING, C., KUN, Z. "Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks toward 5G: A Survey". **IEEE Access**, vol. PP, no. 99, pp. 1 - 24, 2018.
- [100] HOSNY, S., ERYILMAZ, A., GAMAL, H. E. "Impact of User Mobility on D2D Caching Networks" **Global Communications Conference**, 7841886, Washington, DC, USA, 4-8 Dec. 2016.
- [101] ORSINO, A., MOLTCHANOV, D., GAPEYENKO, M., et al. "Direct Connection on the Move: Characterization of User Mobility in Cellular-Assisted D2D Systems". **IEEE Vehicular Technology Magazine**, vol. 11, no. 3, pp. 38-48, 2016.
- [102] YILMAZ, N. C., LI, Z., VALKEALAHTI, K., et al. "Smart mobility management for D2D communications in 5G networks", **Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)**, 6934889, Istanbul, Turkey, 6-9 April 2014.
- [103] XENAKIS, B., KOUNTOURIS, M., MERAKOS, L., et al. "Performance Analysis of Network-Assisted D2D Discovery in Random Spatial Networks", **IEEE Transactions on Wireless Communications**, vol. 15, no. 8, pp. 5695-5707, 2016.
- [104] JARRAY, C., GIOVANIDIS, A. "The effects of mobility on the hit performance of cached D2D networks". **Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks**, 7492958, Tempe, AZ, USA, 9-13 May. 2016.
- [105] CHAKRABARTI, S., DAS, S. "Poisson point process based performance analysis of D2D enabled heterogeneous wireless network". **India Conference (INDICON)**, 469370, Bangalore, India, 16-18 Dec. 2016.
- [106] LIU, J., ZHANG, S., NISHIYAMA, H., et al. "A stochastic geometry analysis of D2D overlaying multi-channel downlink cellular networks". **Computer Communications (INFOCOM)**, 7218366, Kowloon, Hong Kong, 26 April-1 May, 2015.
- [107] MOURA, H. P., CAMPOS, C. A. V. "Análise de performance da comunicação D2D em redes LTE-A". **XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais**, São Pedro, SP, Brasil, 3-6 set. 2017.

- [108] DOMINGUES, H. H. **Espaços Métricos e Introdução à Topologia**. 1 ed. São Paulo, Brasil, 1982.
- [109] MENDELSON, B. **Introduction to Topology**. 3 ed. New York, USA, Dover Publication, 1990.
- [110] YATES, R. D., GOODMAN, D. J. **Probabilidade e Processos Estocásticos**. 3 ed. Brasil, Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2016.
- [111] CLARKE, A. B., DISNEY, R. L., **Probabilidade e Processos Estocásticos**. 1 ed. Brasil, Livros Técnicos e Científicos (LTC), 1979.
- [112] ALBUQUERQUE, J., FORTES, J. P., FINAMORE, W. **Probabilidade, Variáveis Aleatórias e Processos Estocásticos**. 1 ed. Brasil, Interciencia, 2008.
- [113] PAPOULIS, A., PILLAI, S. U. **Probability, random variables, and stochastic processes**. 4 ed. United Kingdom, Taylor & Francis Group, 2002.
- [114] KINGMAN, J. F. C. **Poisson Processes**. 1 ed. USA, Clarendon Press, 1993.
- [115] STOYAN, D., KENDALL W. S., MECKE, J. **Stochastic geometry and its applications**. 3 ed. USA, Wiley, 1995.
- [116] PECCATI, G., REITZNER, M. **Stochastic Analysis for Poisson Point Processes: Malliavin Calculus, Wiener-Itô Chaos Expansions and Stochastic Geometry**. 1 ed. Switzerland, Springer, 2016.
- [117] KLEINROCK, L. **Queueing Systems. Volume 1: Theory**. 1 ed. Wiley-Interscience, 1975.
- [118] BADDELEY, A., BÁRÁNY, I., SCHNEIDER, R. **Spatial point processes and their applications. Stochastic Geometry**, Lectures given at the CIME Summer School held in Martina Franca, Italy, September 13–18, pages 1-75, 2007.
- [119] MOLLER, J., WAAGEPETERSEN, R. P. **Statistical inference and simulation for spatial point processes**. 1 ed. USA, CRC Press, 2003.
- [120] ALEZ, G. **Poisson Process: Introduction, Homogenous and Non-homogenous Process, Properties, Examples, and More**. 1 ed. Webster's Digital Services, 2012.
- [121] GALL, J. F. L. **Brownian Motion, Martingales, and Stochastic Calculus**. 1 ed. French, Springer, 2016.

- [122] AHMED, N. U. **Generalized Functionals of Brownian Motion and Their Applications: Nonlinear F**World Scientific Pub Co Inc. 1 ed. World Scientific Pub Co Inc, 2011.
- [123] NETTO, B., OSWALDO, P. **Teoria, Modelos, Algoritmos**. 1 ed. São Paulo, Brasil, Edgard Blücher Ltda, 2003.
- [124] SZWARCFITER, J. L. **Grafos e Algoritmos Computacionais**. 1 ed. Rio de Janeiro, Brasil, Campus LTDA, 1984.
- [125] TOSCANI, L. V., VELOSO, P. A. S. **Complexidade de Algoritmos**. 2 ed. Porto Alegre, Brasil, Sagra Luzzatto, 2005.
- [126] SIMOES, J. M. S. P. **Grafos e Redes: Teoria e Algoritmos Básicos**. 1 ed. Brasil, Interciência, 2014.
- [127] GOLDBARG, E., GOLDBARG, M. **Grafos: Conceitos, algoritmos e aplicações**. 1 ed. Brasil, Elsevier Academic, 2012.
- [128] CASELLA, G., BERGER, R. **Inferência Estatística**. 1 ed. São Paulo, Brasil, Cengage, 2010.
- [129] COSTA, G. G. O. C. **Curso de Estatística Inferencial e Probabilidades: Teoria e Prática**. 1 ed. São Paulo, Brasil, Atlas, 2012.
- [130] BOX, G. E. P., HUNTER J. S., HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters - An Introduction to design, data analysis, and model building**. 1 ed, New York, John Wiley & Sons, 1978.
- [131] CHIA H. L., CHENG, Y. S., YU, S. C. "Stochastic geometry based models for modeling cellular networks in urban areas". **Wireless networks**, vol. 19, no. 6, pp. 1063–1072, 2012.
- [132] DENG, N., ZHOU, W., Haenggi, M. "The Ginibre Point Process as a Model for Wireless Networks With Repulsion". **IEEE Transactions on Wireless Communications**, vol. 14, no. 1, pp. 107-121, 2014.
- [133] NASRI, R., JAZIRI, A. "Tractable Approach for Hexagonal Cellular Network Model and Its Comparison to Poisson Point Process". **Global Communications Conference (GLOBECOM)**, 7417227, San Diego, CA, USA, 6-10 Dec. 2015.
- [134] ANDREWS, J. G., GANTI, R. K., HAENGGI, M. et al. "A primer on spatial modeling and analysis in wireless networks". **Communications Magazine**, vol. 48, no. 11, pp.156-163, 2010.

- [135] BACCELLI, F., BLASZCZYSZYN, B. "Stochastic Geometry and Wireless Networks, Volume I - Theory", **Foundations and Trends in Networking**, vol. 3, no. 3-4, 2009.
- [136] HAENGGI, M. **Stochastic geometry for wireless networks**. 1 ed. USA, Cambridge University Press, 2012.
- [137] STREIT, R. L. **Poisson Point Processes: Imaging, Tracking, and Sensing**. 1 ed. USA, Springer Science & Business Media, 2010.
- [138] MEDEIROS, J. C. O. **Princípios de Telecomunicações. Teoria e Prática**. 5 ed. Brasil, Érica, 2015.
- [139] CAMPOS, A, V. S., MORAES, L. F. M. "A Markovian model representation of individual mobility scenarios in ad hoc networks and its evaluation". **Journal on Wireless Communications and Networking**, vol. 2007, no. 1, pp. 33-35, 2007.
- [140] NICOLETTI, M. C., HRUSCHKA, E. R. **Fundamentos da Teoria Dos Grafos Para Computação**. 3 ed. Rio de Janeiro, Brasil, LTC, 2018.
- [141] LIH, H. H., CHENG, K. L. **Graph theory and interconnection networks**. 1 ed. CRC Press, USA, 2009.
- [142] BRASIL. DECRETO Nº 3.847, DE 25 DE JUNHO DE 2001. **Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997**, Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/leis/2-lei-9472>>. Acesso em: 10 Fev 2018.
- [143] CAVALCANTE, J. R. R. **Gestão de Telecomunicações - Uma Abordagem para Grandes Usuários**. 1 ed. Rio de Janeiro, Brasil, LTC, 2014.
- [144] GOKHALE, A. **Introduction to Telecommunications**. 2 ed. USA, Delmar Cengage Learning, 2004.

A. Código Implementado em PYTHON

A.1 Criação da Classe e Funções

```
# criacao da classe Ponto (x,y).
```

```
class Point:
    def __init__(self, x, y):
        self.x = x
        self.y = y
    def dist(p1, p2):
        return ((p1.x-p2.x)**2+(p1.y-p2.y)**2)**(0.5)
    def __repr__(self):
        return "p(" + "{:.4f}".format(self.x) + "," + "{:.4f"
            ↪ "f}".format(self.y) + ")"
```

```
# criacao de funcao para geracao de pontos PPP
```

```
def genPPP(density):
    import numpy
    qtd_pontos = numpy.random.poisson(density*4)

    vetx = numpy.random.uniform(-1, 1, qtd_pontos)
    vety = numpy.random.uniform(-1, 1, qtd_pontos)
    vetpoint = [Point(x, y) for x, y in zip(vetx, vety)]
    return vetpoint
```

criacao de funcao para estabelecimento do movimento

↪ browniano

```
def moveBrownian(p1, tempo_de_observacao, velocidade_do_ponto  
↪ ):
```

```
    import numpy
```

```
    var = tempo_de_observacao*velocidade_do_ponto
```

```
    p1.x = p1.x+numpy.random.normal(0, var)
```

```
    p1.y = p1.y+numpy.random.normal(0, var)
```

```
    if p1.x > 1:
```

```
        p1.x = 2-p1.x
```

```
    if p1.x < -1:
```

```
        p1.x = -2-p1.x
```

```
    if p1.y > 1:
```

```
        p1.y = 2-p1.y
```

```
    if p1.y < -1:
```

```
        p1.y = -2-p1.y
```

criacao de funcao para o grafo de conectividade

```
def genConnectGraph(antenas, users, reachAU, reachUU):
```

```
    import networkx
```

```
    vet_paresAU = [(ant, us) for ant in antenas for us in  
↪ users if Point.dist(ant, us) <= reachAU]
```

```
    vet_paresUU = [(us1, us2) for us1 in users for us2 in  
↪ users if us1 != us2 and Point.dist(us1, us2) <=  
↪ reachUU]
```

```
    G = networkx.Graph()
```

```
    G.add_nodes_from(antenas)
```

```
    G.add_nodes_from(users)
```

```
    G.add_edges_from(vet_paresAU)
```

```
    G.add_edges_from(vet_paresUU)
```

```
    return G
```

criacao da funcao para analise do grafo

```
def analyseConnectGraph(G, antenas, users):
```

```

import networkx
usersinrange = []
for ant in antenas:
    usersinrange.extend(G.adj[ant].keys())
usersinrange = set(usersinrange)
usersD2D = []
for ant in antenas:
    usersD2D.extend(networkx.dfs_preorder_nodes(G, ant)
        ↪ )
usersD2D = set(usersD2D)
usersD2D -= set(antenas)
usersD2D -= set(usersinrange)
return len(usersinrange), len(usersD2D), len(users)-len
    ↪ (usersinrange)-len(usersD2D)

```

A.2 Parametrização com valores reais de rede

Insercao de parametros

```

lado_regiao_km = 3
alcance_antena_km = 0.5
densidade_antenas_por_km2 = 1.0
densidade_usuarios_por_km2 = 500
velocidade_media_km_h = 3
alcance_d2d_km = 0.025
intervalo_observacao_s = 1
tempo_simulacao_s = 1200

```

A.3 Conversões para a área do modelo

Conversoes

```
km_para_ue = 2.0/lado_regiao_km
s_para_ut = intervalo_observacao_s
h_para_ut = 3600*s_para_ut
.
```

A.4 Normalizações

```
# normalizacoes

velocidade_media = (velocidade_media_km_h*km_para_ue)/
    ↪ h_para_ut
alcance_antena = alcance_antena_km*km_para_ue
alcance_d2d = alcance_d2d_km*km_para_ue
densidade_antenas = densidade_antenas_por_km2/km_para_ue**2
densidade_usuarios = densidade_usuarios_por_km2/km_para_ue
    ↪ **2
tempo_simulacao = tempo_simulacao_s*s_para_ut
.
```

A.5 Código principal - Em função dos parâmetros

```
# Codigo principal (MAIN) – Avaliacao de parametros

iteracao = 0
maxIter = 20
while iteracao < maxIter:
    import numpy
    eNodeB = genPPP(densidade_antenas)
    UE = genPPP(densidade_usuarios)

    Medidas_Users_CEL_D2D = []
    Medidas_Users_CEL = []
```

```

Medidas_Users_D2D = []
Medidas_Users_OFF = []

for t in range(int(tempo_simulacao)):
    for user in UE:
        moveBrownian(user, intervalo_observacao_s,
            ↪ velocidade_media)

    Grafo_Global = genConnectGraph(eNodeB, UE,
        ↪ alcance_antena, alcance_d2d)

    metricas_no_tempo = analyseConnectGraph(
        ↪ Grafo_Global, eNodeB, UE)

    Medidas_Users_CEL_D2D.append(metricas_no_tempo[0]+
        ↪ metricas_no_tempo[1])
    Medidas_Users_CEL.append(metricas_no_tempo[0])
    Medidas_Users_D2D.append(metricas_no_tempo[1])
    Medidas_Users_OFF.append(metricas_no_tempo[2])

    print("QTD Users: ", sum(metricas_no_tempo), " |
        ↪ QTD Users Cel: ", metricas_no_tempo[0], " |
        ↪ QTD Users D2D: ", metricas_no_tempo[1], " |
        ↪ QTD Users OFF: ", metricas_no_tempo[2], " |
        ↪ Tempo = ", t)

    mediaN_users_CEL_D2D = numpy.mean(Medidas_Users_CEL_D2D
        ↪ )/sum(metricas_no_tempo)
    mediaN_users_CEL = numpy.mean(Medidas_Users_CEL)/sum(
        ↪ metricas_no_tempo)
    mediaN_users_D2D = numpy.mean(Medidas_Users_D2D)/sum(
        ↪ metricas_no_tempo)
    mediaN_users_OFF = numpy.mean(Medidas_Users_OFF)/sum(
        ↪ metricas_no_tempo)

```

0 – Medidas para Usuarios CEL + D2D

```

arquivo = open('C:\mval_1.0e\CEL_D2D_0.025.txt', 'r')
conteudo = arquivo.readlines()
conteudo.append(str(mediaN_users_CEL_D2D))
conteudo.append("\n")
arquivo = open('C:\mval_1.0e\CEL_D2D_0.025.txt', 'w')
arquivo.writelines(conteudo)
arquivo.close()

```

1 – Medidas para Usuarios na cobertura Celular

```

arquivo = open('C:\mval_1.0e\CEL_0.025.txt', 'r')
conteudo = arquivo.readlines()
conteudo.append(str(mediaN_users_CEL))
conteudo.append("\n")
arquivo = open('C:\mval_1.0e\CEL_0.025.txt', 'w')
arquivo.writelines(conteudo)
arquivo.close()
iteracao += 1

```

.

A.6 Código principal - Em função do tempo

```

log = [] # inicializa um vetor de logs
eNodeB = genPPP(densidade_antenas) # antenas # Gera as
    ↪ antenas a partir do Point to Process Poisson (PPP)
D = [1, 2, 3, 4, 5] # define a variacao do vetor (exemplo
    ↪ de variacao do cenario D)
for i in range(len(D)):
    maxIter = 20
    iteracao = 0
    while iteracao < maxIter: # Define quantas simulacoes
        ↪ farei no meu codigo.
        import numpy
        import copy

```

```

eNodeBStatic = copy.deepcopy(eNodeB)
UE = genPPP(densidade_usuarios) # users # vetor a
    ↪ ser percorrido no passo do movimento
    ↪ browniano
Medidas_Users_CEL_D2D = [] # inicializa um vetor
    ↪ para colocar as medidas de interesse
Medidas_Users_CEL = [] # inicializa um vetor para
    ↪ colocar as medidas geradas a cada tempo t dos
    ↪ Users Celulares
Medidas_Users_D2D = [] # inicializa um vetor para
    ↪ colocar as medidas geradas a cada tempo t dos
    ↪ Users D2D
Medidas_Users_OFF = [] # inicializa um vetor para
    ↪ colocar as medidas geradas a cada tempo t dos
    ↪ Users OFF

for t in range(int(tempo_simulacao)): # loop usado
    ↪ para varrer a cada instante t as metricas.
    for user in UE:
        moveBrownian(user, intervalo_observacao_s,
            ↪ D[i]) # atualiza a posicao de um
            ↪ usuario em t.

Grafo_Global = genConnectGraph(eNodeBStatic, UE
    ↪ , alcance_antena, alcance_d2d) # gera o
    ↪ grafo de relacoes

metricas_no_tempo = analyseConnectGraph(
    ↪ Grafo_Global, eNodeBStatic, UE) # tira
    ↪ metricas de contagem

Medidas_Users_CEL_D2D.append(metricas_no_tempo
    ↪ [0]+metricas_no_tempo[1]) # cria uma
    ↪ lista com todas as medidas de CEL+D2D a
    ↪ cada t.
Medidas_Users_CEL.append(metricas_no_tempo[0])
    ↪ # cria uma lista com todas as medidas de

```

```

    ↪ CEL a cada t.
Medidas_Users_D2D.append(metricas_no_tempo[1])
    ↪ # cria uma lista com todas as medidas de
    ↪ D2D a cada t.
Medidas_Users_OFF.append(metricas_no_tempo[2])
    ↪ # cria uma lista com todas as medidas de
    ↪ OFF a cada t.

print("D = ", D[i], "| QTD Users: ", sum(
    ↪ metricas_no_tempo), " | QTD Users Cel: ",
    ↪ metricas_no_tempo[0], " | QTD Users D2D:
    ↪ ", metricas_no_tempo[1], " | QTD Users
    ↪ OFF: ", metricas_no_tempo[2], " | Tempo =
    ↪ ", t)
log.append(metricas_no_tempo[0]+
    ↪ metricas_no_tempo[1])
log.append(metricas_no_tempo[0])
log.append(sum(metricas_no_tempo))
log.append(t)

if D[i] == 1:
    arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_1.0.
        ↪ txt', 'r') # Alterar o diretorio
        ↪ quando for em maquinas diferentes
    conteudo = arquivo.readlines()
    conteudo.append(str(log))
    conteudo.append("\n")
    arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_1.0.
        ↪ txt', 'w') # Alterar o diretorio
        ↪ quando for em maquinas diferentes
    arquivo.writelines(conteudo)
    arquivo.close()
    log = [] # limpa o vetor para receber
        ↪ novos dados

elif D[i] == 2:

```

```

arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_2.0.
    ↪ txt', 'r') # Alterar o diretorio
    ↪ quando for em maquinas diferentes
conteudo = arquivo.readlines()
conteudo.append(str(log))
conteudo.append("\n")
arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_2.0.
    ↪ txt', 'w') # Alterar o diretorio
    ↪ quando for em maquinas diferentes
arquivo.writelines(conteudo)
arquivo.close()
log = [] # limpa o vetor para receber
    ↪ novos dados

```

elif D[i] == 3:

```

arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_3.0.
    ↪ txt', 'r') # Alterar o diretorio
    ↪ quando for em maquinas diferentes
conteudo = arquivo.readlines()
conteudo.append(str(log))
conteudo.append("\n")
arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_3.0.
    ↪ txt', 'w') # Alterar o diretorio
    ↪ quando for em maquinas diferentes
arquivo.writelines(conteudo)
arquivo.close()
log = [] # limpa o vetor para receber
    ↪ novos dados

```

elif D[i] == 4:

```

arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_4.0.
    ↪ txt', 'r') # Alterar o diretorio
    ↪ quando for em maquinas diferentes
conteudo = arquivo.readlines()
conteudo.append(str(log))
conteudo.append("\n")

```

```

arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_4.0.
    ↪ txt', 'w') # Alterar o diretorio
    ↪ quando for em maquinas diferentes
arquivo.writelines(conteudo)
arquivo.close()
log = [] # limpa o vetor para receber
    ↪ novos dados

```

elif D[i] == 5:

```

arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_5.0.
    ↪ txt', 'r') # Alterar o diretorio
    ↪ quando for em maquinas diferentes
conteudo = arquivo.readlines()
conteudo.append(str(log))
conteudo.append("\n")
arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_5.0.
    ↪ txt', 'w') # Alterar o diretorio
    ↪ quando for em maquinas diferentes
arquivo.writelines(conteudo)
arquivo.close()
log = [] # limpa o vetor para receber
    ↪ novos dados

```

elif D[i] == 6:

```

arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_6.0.
    ↪ txt', 'r') # Alterar o diretorio
    ↪ quando for em maquinas diferentes
conteudo = arquivo.readlines()
conteudo.append(str(log))
conteudo.append("\n")
arquivo = open('C:\mval_1.0d\log_1.0_6.0.
    ↪ txt', 'w') # Alterar o diretorio
    ↪ quando for em maquinas diferentes
arquivo.writelines(conteudo)
arquivo.close()
log = [] # limpa o vetor para receber
    ↪ novos dados

```

```
mediaN_users_CEL_D2D = numpy.mean(  
    ↪ Medidas_Users_CEL_D2D)/sum(metricas_no_tempo)  
mediaN_users_CEL = numpy.mean(Medidas_Users_CEL)/  
    ↪ sum(metricas_no_tempo)  
mediaN_users_D2D = numpy.mean(Medidas_Users_D2D)/  
    ↪ sum(metricas_no_tempo)  
mediaN_users_OFF = numpy.mean(Medidas_Users_OFF)/  
    ↪ sum(metricas_no_tempo)  
  
iteracao += 1
```
