

# Minicurso - Comunicação D2D para 5G de Arquiteturas de Redes Celulares: Da Teoria à Prática

Alex Vidigal Bastos<sup>1,2</sup>, Diógenes Cecílio da Silva Júnior<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) – MG – Brasil

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)  
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

{alexvbh}@ufsj.edu.br, diogenes@ufmg.br

**Abstract.** *This short course present the possibility of using D2D communication technology in cellular networks, which includes the state of the art, as well as an overview of works that illustrate the research trends and the main challenges of the area. The proposed work has a theoretical and practical profile, through the explanation about D2D communication and SimuLTE (OMNet++) presentation.*

**Resumo.** *Essa proposta de minicurso tem o objetivo de apresentar a possibilidade de utilização da tecnologia de comunicação D2D em redes celulares, o que inclui o estado da arte, bem como uma visão geral de trabalhos que ilustram as tendências de pesquisa e os principais desafios da área. O trabalho proposto possui perfil teórico e prático, através da explanação sobre comunicação D2D e apresentação do SimuLTE (OMNet++).*

## 1. Introdução

Para a próxima geração da telefonia móvel (5G), alguns requisitos como escalabilidade, resiliência e energia são necessários para uma arquitetura de comunicação prover uma comunicação que forneça qualidade de serviço ao usuário. No LTE<sup>1</sup> Avançado (LTE-A)<sup>2</sup>, a comunicação D2D (Dispositivo para Dispositivo) é uma tecnologia candidata para satisfazer aos requisitos necessários e estender a cobertura da rede em situações de falhas. Oportunidades significativas para criar e explorar alianças entre redes de segurança pública e redes comerciais LTE-A têm sido discutidas no 3GPP<sup>3</sup> (*3rd Generation Partnership Project*) para permitir um aumento na capacidade agregada e uma melhora na capacidade da cobertura da rede [Lin et al. 2014]. Com a necessidade de reestruturação das arquiteturas de comunicação para atender aos novos requisitos, novas propostas de implementação e utilização de novas tecnologias têm surgido com o objetivo de diminuir custos operacionais, buscando uma arquitetura que seja mais dinâmica e com uma melhor eficiência energética [Agiwal et al. 2016].

---

<sup>1</sup>Long Term Evolution.

<sup>2</sup>LTE-A é um padrão de redes celulares que permite banda larga móvel com altas taxas de transmissão, possibilitando uma maior abrangência de comunicações de voz e transferência de dados.

<sup>3</sup>3GPP é uma associação que reúne uma série de órgãos normativos de telecomunicações, abrangendo tecnologias de redes de telecomunicações celulares.

A comunicação D2D em redes celulares é definida como uma comunicação direta entre dois dispositivos móveis sem passar pela estação base (BS) ou núcleo da rede. Comunicação D2D não é transparente para a rede celular e pode ocorrer dentro (*Inband*) ou fora (*Outband*) do espectro celular. Contudo, usuários móveis das redes celulares de hoje utilizam serviços que necessitam de altas taxas de dados que podem ser atingidos através de uma comunicação direta entre os dispositivos, tendo a comunicação D2D não limitada apenas à eficiência espectral, mas permitindo a potencialização no aumento da taxa de transferência, eficiência energética, diminuição dos atrasos e conformidade da rede em diferentes cenários para diferentes casos de uso [Asadi et al. 2014].

Como principal contribuição, esse trabalho apresenta a tecnologia de comunicação D2D em redes celulares, o que inclui o estado da arte, bem como uma visão geral dos trabalhos que ilustram as tendências de pesquisa e os principais desafios da área. Algumas das principais perguntas que o texto irá responder: Quais os desafios da comunicação D2D nas redes celulares? Quais as tendências? Quais os desafios da área? Quais as oportunidades? O trabalho proposto possui perfil teórico e prático, através da explanação sobre comunicação D2D e apresentação do simulador SimuLTE [Virdis et al. 2014]. Será apresentado o funcionamento de uma rede LTE-A com suporte para comunicação D2D, através de simulações utilizando o simulador SimuLTE. SimuLTE permite implementar uma rede celular LTE-A em que os dispositivos móveis tem a possibilidade de realizar uma comunicação D2D, permitindo a avaliação do comportamento de protocolos e funcionalidades da rede.

Esse trabalho encontra-se organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta a quinta geração (5G) de arquiteturas de redes celulares. A seção 3 apresenta a comunicação D2D em redes celulares. A seção 4 apresenta o SimuLTE e a seção 5 conclui o trabalho.

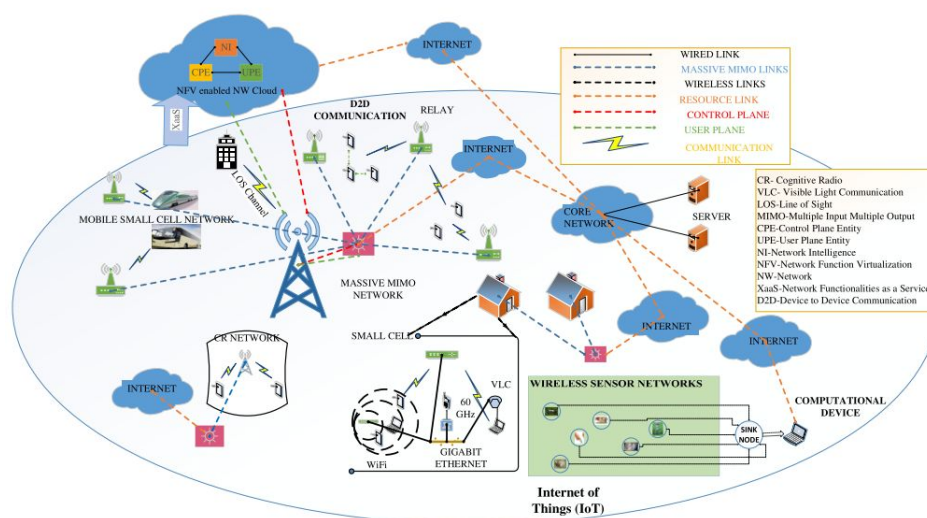
## **2. Quinta geração (5G) de arquiteturas de redes celulares**

O estudo das comunicações celulares para a 5G é um tema recente de pesquisa que aborda às necessidades de comunicação para os seres humanos e dispositivos muito além de 2020. Diferentemente das mudanças realizadas nas gerações anteriores, a arquitetura celular para a 5G será heterogênea, com foco em aplicações direcionadas para realidade aumentada [Li et al. 2005], Internet das Coisas (IoT) [Li et al. 2015], Internet de Veículos (IoV) [Li et al. 2007], Comunicação D2D, Comunicação M2M (máquina com máquina) [Hussain et al. 2017] e Tecnologias Financeiras [Shahrokhi 2008].

Nesse cenário, a comunicação se move além da comunicação entre pessoas, incluindo a comunicação entre máquinas, o que gera um impacto fundamental na arquitetura da rede. Antigos problemas se tornam possíveis para serem resolvidos e soluções antigas são substituídas por novas. Surgirão novas oportunidades de negócios e reformulação dos processos industriais existentes. Arquiteturas de Redes Celulares para a 5G irão desempenhar um papel importante nessa mudança, uma vez que fornece a base de comunicação para uma melhor integração entre as tecnologias envolvidas. O principal desafio na concepção da 5G, ao contrário das gerações de comunicações anteriores, é que não será construída para um caso de uso claramente especificado (tal como foi a 4G, que desde o início foi adaptada para dados de pacote de banda larga móvel), mas ao invés disso, é previsto servir uma vasta gama de casos de uso, para os quais os modelos de negócios nem sempre são totalmente abrangentes.

A 5G é uma nova proposta que irá fornecer todas as aplicações possíveis, utilizando apenas um dispositivo universal, interligando as diferentes infraestruturas de comunicação existentes [Gupta and Jha 2015]. Os terminais 5G serão um multimodo reconfigurável com rádio cognitivo habilitado, sendo equipado com esquemas de modulação de rádio definidos por software (SDR) [Mitola 1995]. Todo o software reconfigurável deverá ser obtido através da Internet. Os terminais dos usuários terão acesso a diferentes tecnologias sem fio ao mesmo tempo e irão combinar diferentes fluxos de diferentes tecnologias. Além disso, o terminal terá a possibilidade de fazer a escolha final entre os diferentes provedores *wireless*/móveis de acesso à rede para um determinado serviço. O núcleo das tecnologias 5G tende a ser uma tecnologia reconfigurável, construído a partir da convergência de novas tecnologias como a nanotecnologia [Staggers et al. 2008], computação em nuvem [Dinh et al. 2013] e rádio cognitivo [Akyildiz et al. 2008], tendo como base as plataformas IP<sup>4</sup> (*Internet Protocol*).

Conforme [Hossain and Hasan 2015], se compararmos com outras gerações de telefonia móvel, as tecnologias de quinta geração terão características e vantagens, tais como: melhor área de cobertura e alta taxa de dados na borda da célula; baixo consumo de bateria; disponibilidade de vários caminhos de transferência de dados; aproximadamente 1 Gbps de taxa de transferência de dados; maior segurança; eficiência energética e eficiência espectral. A figura 1 representa uma arquitetura geral da 5G de uma rede celular [Gupta and Jha 2015].



**Figura 1. Arquitetura Geral de 5G de redes celulares [Gupta and Jha 2015].**

Essas novas tecnologias e requisitos acima mencionados direcionam para os desafios ao desenvolvimento da 5G, tendo como principais desafios de desenvolvimento: a) Rádio Cognitivo (CR) - novas formas de uso do espectro; b) Rádio Definido por Software (*Software Defined Radio* - SDN) - habilitar reconfiguração; c) Interoperabilidade Reconfigurável entre muitos tipos de redes de acesso sem fio; d) Eficiência Energética da Rede; e) Nanotecnologia; f) Comunicação Máquina-Máquina (M2M); g) Toda a rede sobre o IP

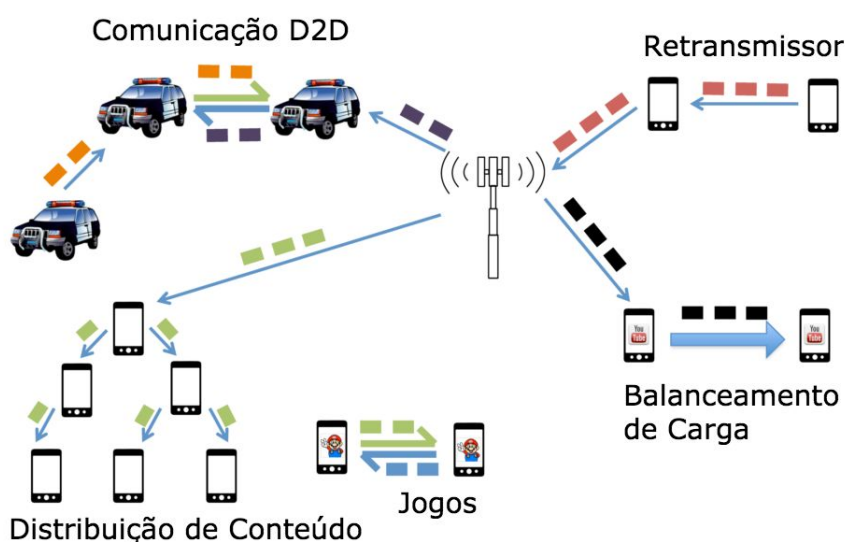
<sup>4</sup>IP é um protocolo de comunicação usado entre todas as máquinas em rede para encaminhamento dos dados.

e h) Computação nas Nuvens (*Cloud Computing*).

Dentre algumas tecnologias que serão importantes para o futuro dos padrões sem fio, comunicação D2D tem vantagens que não são limitadas apenas a eficiência espectral, podendo potencializar o aumento da taxa de transferência, eficiência energética, diminuição dos atrasos e equidade da rede em diferentes cenários.

### 3. Comunicação D2D em redes celulares

Comunicação D2D é um dos paradigmas que aparecem como sendo promissores para a próxima geração de tecnologias celulares. A necessidade de novas aplicações tais como distribuição de conteúdo e propaganda ciente de localização têm introduzido novos casos de uso nas redes celulares. A figura 2 representa os novos casos de uso para comunicação D2D em redes celulares.



**Figura 2. Novos Casos de Uso para comunicação D2D em Redes Celulares [Asadi et al. 2014].**

Nas redes celulares, a comunicação D2D é definida como uma comunicação direta entre dois dispositivos móveis sem passar pela estação base (BS) ou núcleo da rede [Cao et al. 2015]. Comunicação D2D é geralmente não transparente para a rede celular e pode ocorrer no espectro celular (*Inband*) ou fora do espectro celular (*Outband*). Contudo, usuários móveis nas redes celulares de hoje utilizam serviços com altas taxas de dados (ex: compartilhamento de vídeo, games, redes sociais cientes de localização) que podem ser potencializados através de uma comunicação direta.

A comunicação D2D é uma nova tendência em redes celulares, de uma perspectiva de arquitetura, D2D é similar a MANETs (*Mobile Ad-hoc NETWORKS*) [Dow et al. 2005] e CRAN (*Cognitive Radio Ad Hoc Networks*) [Kamruzzaman et al. 2011]. Todavia, existem algumas diferenças entre as arquiteturas que não podem ser ignoradas. Apesar de não existir um padrão para comunicação D2D, é esperado que as comunicações D2D em redes celulares sejam controladas por uma entidade central (ex: envolvendo a estação base), podendo os usuários D2D comunicarem de forma autônoma somente quando a

infraestrutura estiver indisponível. O envolvimento das redes celulares no plano de controle é a diferença chave entre D2D, MANET e CRN. A disponibilidade de supervisão/gerenciamento central em comunicação D2D, resolve muitos desafios existentes em MANETs e CRN, tal como, detecção de espaço em branco, anulação de colisão e sincronização [Lien et al. 2016].

Para classificar as diferentes formas de comunicação para comunicação D2D, foi proposto em [Asadi et al. 2014] conforme figura 3, uma taxonomia que categoriza diferentes formas de comunicação sem fio. Na categoria de comunicação *Inband D2D*, é proposto o uso do espectro compartilhado para ambos D2D e o enlace celular. A categoria *Inband D2D* é dividida em duas subcategorias: *Underlay* em que celular e comunicação D2D compartilham os mesmos recursos e *Overlay* em que enlace celular e D2D são dedicados. Na comunicação *Inband D2D*, um problema que pode ocorrer é a interferência causada por usuários D2D na comunicação celular e vice e versa. Na categoria de comunicação *Outband D2D*, é explorado os enlaces D2D fora do espectro celular. A motivação por trás do uso da comunicação D2D *Outband*, refere-se a eliminação das questões de interferências entre o enlace D2D e celular. Utilizando espectros fora do espectro celular, são necessários interfaces extras e adaptações usuais para outras tecnologias sem fio como *WifiDirect*, *ZigBee* ou *Bluetooth*. Nessa categoria, podemos dividi lá em duas subcategorias: *Controlled* em que é sugerido dar o controle da segunda interface / tecnologia para a rede celular e *Autonomous*, em que propõe deixar as comunicações D2D para os usuários. A figura 4 representa o esquemático para as comunicações *Inband* e *Outband*.

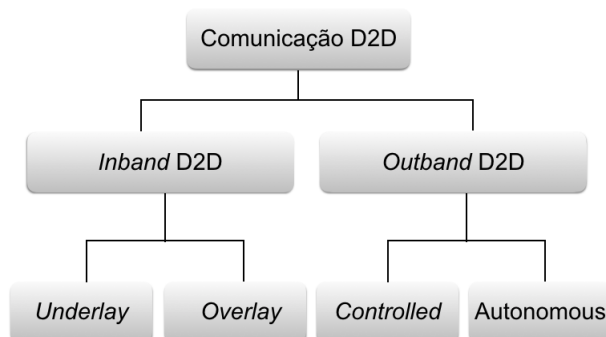


Figura 3. Taxonomia para comunicação D2D [Asadi et al. 2014].

### 3.1. Visão dos tipos de comunicação D2D e principais desafios técnicos

Conforme [Tehrani et al. 2014], a rede celular de 5G é visualizada em duas camadas, sendo denominadas de níveis de macrocélulas e dispositivos. O nível de macrocélula envolve comunicações das estações base (BS) para o dispositivo como em um sistema celular convencional. O nível do dispositivo envolve comunicações D2D. Se um dispositivo conecta a rede celular através de uma BS, esse dispositivo está falando em operação na camada de macrocélula. Se um dispositivo se conectar diretamente a outro dispositivo ou perceber sua transmissão através da assistência de outros dispositivos, esses dispositivos são ditos na camada do dispositivo. Em tal sistema, as BSs continuarão a atender os dispositivos como de costume. No entanto, nas bordas das células ou áreas congestionadas, os dispositivos poderão se comunicar entre si, criando uma rede de malha *ad hoc*.

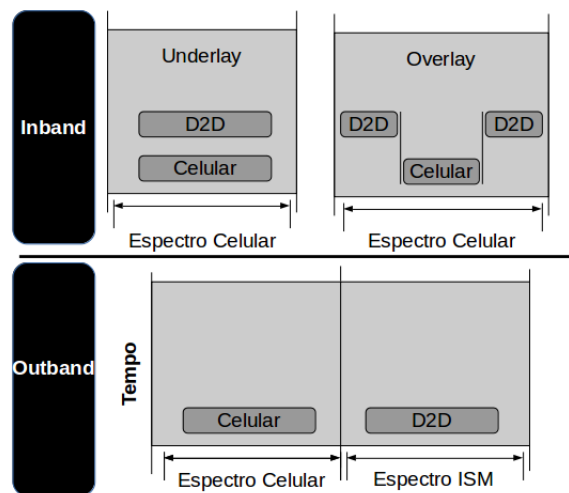


Figura 4. Esquemático para as comunicações *Inband* e *Outband*.

Na realização de comunicações no nível de dispositivo, o operador pode ter diferentes níveis de controle. Com base no modelo de negócios, ele exerce controle total / parcial sobre a alocação de recursos entre dispositivos de origem, destino e retransmissão, ou prefere não ter controle. Portanto, podemos definir os seguintes quatro principais tipos de comunicações no nível de dispositivo, conforme abaixo (figuras 5, 6, 7 e 8):

**Dispositivo retransmite com estabelecimento de ligação controlada pelo operador (DR-OC):** Um dispositivo na borda de uma célula ou em uma área de cobertura pobre pode se comunicar com a BS através da retransmissão de suas informações através de outros dispositivos. Isso permite que o dispositivo alcance uma QoS (Qualidade de Serviço) maior ou uma maior vida útil da bateria. O operador se comunica com os dispositivos de retransmissão para o estabelecimento parcial ou total do enlace de controle.

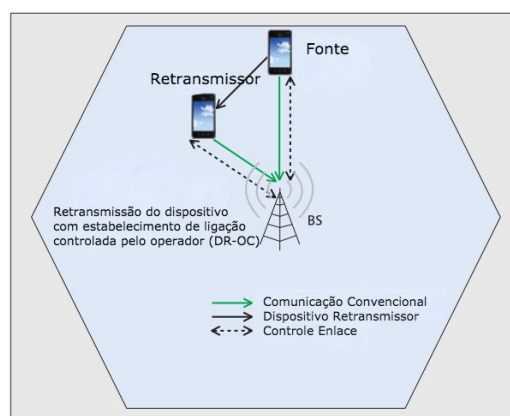
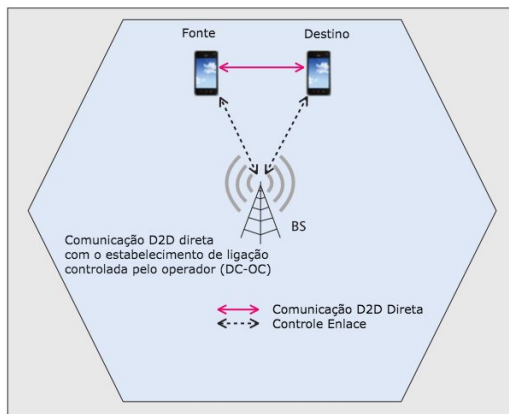


Figura 5. Ilustração da comunicação de retransmissão do dispositivo com estabelecimento de ligação controlada pelo operador (DR-OC). Um dispositivo se comunica com a BS através da retransmissão de suas informações através de outros dispositivos.

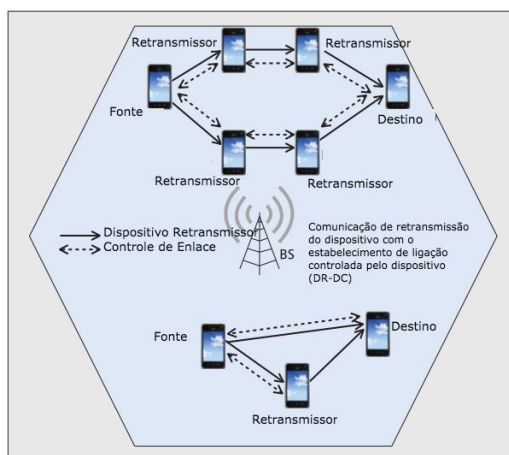
**Comunicação D2D direta com o estabelecimento de ligação controlada pelo operador (DC-OC):** os dispositivos de origem e de destino conversam e trocam dados

uns com os outros sem a necessidade de uma BS, mas são atendidos pelo operador para estabelecer o enlace.



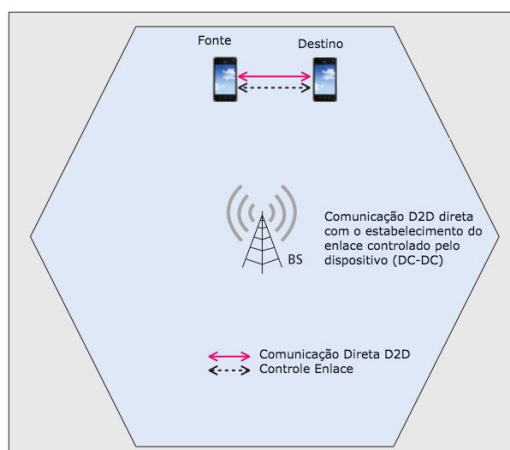
**Figura 6. Ilustração da comunicação D2D direta com o estabelecimento de ligação controlada pelo operador (DC-OC). Os dispositivos de origem e de destino podem conversar e trocar dados uns com os outros sem a necessidade de uma BS, mas são atendidos pela BS através de um enlace de controle.**

**Dispositivo com estabelecimento de ligação controlado pelo dispositivo (DR-DC):** o operador não está envolvido no processo de estabelecimento de enlace. Portanto, os dispositivos de origem e de destino são responsáveis pela coordenação da comunicação usando retransmissões entre si.



**Figura 7. Ilustração da comunicação de retransmissão do dispositivo com o estabelecimento de ligação controlada pelo dispositivo (DR-DC). Os dispositivos de origem e de destino interagem diretamente entre si e não usam nenhum enlace de controle do operador.**

**Comunicação direta D2D com estabelecimento de ligação controlada pelo dispositivo (DC-DC):** os dispositivos de origem e de destino têm comunicação direta entre si sem nenhum controle do operador. Portanto, os dispositivos de origem e de destino devem usar o recurso de forma a garantir interferências limitadas com outros dispositivos na mesma camada e na camada de macrocélula.



**Figura 8. Ilustração da comunicação D2D direta com o estabelecimento do enlace controlado pelo dispositivo (DC-DC).**

Em um sistema celular de duas camadas, se cuidadosamente projetado, pode trazer melhorias significativas em relação à arquitetura clássica do sistema celular. Antes da introdução da funcionalidade D2D, vários desafios técnicos, particularmente em questões de gerenciamento de segurança e interferência, devem ser superados. Como os dados do usuário são encaminhados através de dispositivos de outros usuários, a segurança deve ser mantida para privacidade. Uma solução possível para garantir a segurança é o acesso fechado para os dispositivos que desejam operar na camada do dispositivo. Em acesso fechado, um dispositivo possui uma lista de dispositivos "confiáveis", e os dispositivos que não estão nesta lista devem usar o nível da macrocélula para se comunicar com ele. Por exemplo, os usuários em uma vizinhança ou local de trabalho que se conhecem ou os usuários que foram autenticados por meio de uma parte confiável, como uma organização, podem se comunicar diretamente entre si, satisfazendo um nível de privacidade. Os dispositivos em um grupo podem configurar uma criptografia apropriada entre si para evitar divulgar suas informações para outros dispositivos. Em acesso aberto, por outro lado, cada dispositivo pode atuar como um retransmissor para outros dispositivos sem restrições. Uma vez que não há nenhum tipo de supervisão, a segurança nesse caso é um problema de pesquisa desafiador em aberto. Os problemas de segurança na comunicação D2D envolvem a identificação de potenciais ataques, ameaças e vulnerabilidade do sistema. Trabalhos anteriores sobre os problemas de segurança da comunicação M2M podem ser explorados para resolver problemas de segurança em D2D de acesso aberto.

Outra preocupação significativa em um sistema de duas camadas é o gerenciamento de interferências. Em DR-OC e DC-OC, a atribuição de recursos e a configuração das chamadas são realizadas pela BS. Portanto, o BS pode aliviar o problema da gestão de interferências, até certo ponto, usando métodos centralizados, uma área de pesquisa bem estabelecida em comunicações sem fio. Por outro lado, em DR-DC e DC-DC, não existe uma entidade centralizada para superar a alocação de recursos entre dispositivos. Operando na mesma faixa licenciada, os dispositivos afetarão inevitavelmente os usuários das macrocélulas. Para garantir um impacto mínimo sobre o desempenho das BS nas macrocélulas existentes, uma rede de dois níveis precisa ser projetada com estratégias inteligentes de gerenciamento de interferências e esquemas apropriados de alocação de



recursos. Além da interferência entre as camadas da macrocélula e do dispositivo, também há interferência entre os usuários na camada do dispositivo. Para abordar a alocação de recursos para este tipo de comunicação, diferentes abordagens, como o *pool* de recursos, o jogo não cooperativo ou o jogo de barganha, controle de admissão e alocação de poder, particionamento de *cluster* e a seleção de retransmissão podem ser empregadas.

Em DR-OC, como ilustrado na figura 5, uma vez que a BS é uma das partes comunicantes, alguns dos desafios acima mencionados podem ser abordados pelo controle da BS usando métodos existentes. A BS pode autenticar os dispositivos de retransmissão e usar a criptografia apropriada para manter uma privacidade suficiente para a informação dos dispositivos. A BS também pode gerenciar a alocação do espectro entre os dispositivos de retransmissão para evitar que eles interfiram com outros dispositivos.

Em DC-OC, como ilustrado na figura 6, os dispositivos se comunicam diretamente com o estabelecimento de ligação controlada pelo operador. Especificamente, o operador lida com autenticação de acesso, controle de conexão, alocação de recursos e interação entre dispositivos. Tem controle total sobre as conexões D2D, incluindo funções de plano de controle (por exemplo, configuração e manutenção de conexão) e funções de plano de dados (por exemplo, alocação de recursos). As conexões D2D na camada do dispositivo compartilham a banda licenciada celular com as conexões celulares normais no nível da macrocélula. A rede pode atribuir recursos dinamicamente a cada conexão D2D da mesma forma que uma conexão celular normal ou atribuir semi-estaticamente um *pool* de recursos dedicado a todas as conexões D2D.

Em DR-DC e DC-DC, não há BS ou servidor para controlar a comunicação entre dispositivos. Conforme apresentado nas figuras 7 e 8, vários dispositivos se comunicam entre si usando uma comunicação cooperativa ou não cooperativa, e um ou vários dispositivos podem desempenhar o papel de retransmissores para os outros dispositivos. Esse tipo de comunicação é mais desafiador do que os anteriores, uma vez que não existe uma supervisão centralizada da retransmissão. A configuração da conexão, o gerenciamento de interferências e a alocação de recursos devem, portanto, ser abordados usando métodos distribuídos. Antes da fase de transmissão de dados, dois dispositivos precisam encontrar um ao outro e os retransmissores adjacentes (ou seja, descoberta de pares e configuração de conexão D2D). Os dispositivos podem periodicamente transmitir informações de identidade para que outros dispositivos possam estar cientes de sua existência e decidir se podem ou não iniciar uma comunicação D2D direta ou de retransmissão de dispositivo.

### **3.2. Visão do 3GPP para Comunicação D2D**

O *release* 12 do 3GPP apresenta o suporte para D2D ou comunicações de modo direto no LTE-A, permitindo transmissões ponto a ponto (P2P) entre dispositivos próximos [Tehrani et al. 2014] e [Lin et al. 2014]. Com a popularidade dos dispositivos inteligentes e o enorme potencial do mercado baseados em proximidade (ProSe) [3GPP 2012] e aplicações, existe uma necessidade urgente de integrar as transmissões do modo D2D na rede celular da próxima geração para permitir uma descoberta e comunicação eficientes entre usuários próximos, e, eventualmente, fornecer conexões omnipresentes e uma vasta gama de serviços para usuários móveis.

Do ponto de vista técnico, explorar a natureza da proximidade pode fornecer múltiplos benefícios. Em primeiro lugar, os dispositivos móveis (UEs) D2D podem desfrutar

de alta taxa de dados e baixos atrasos de ponta a ponta. Segundo, se comparado com a comunicação celular normal, comunicações diretas economizam energia e melhoram a utilização dos recursos de rádio. Em terceiro lugar, mudar de um caminho de infraestrutura para um caminho direto descarrega o tráfego celular, aliviando o congestionamento. Finalmente, outros benefícios podem afetar diretamente as redes de segurança pública, como a extensão da faixa celular através da retransmissão UE para UE.

O 3GPP define diferentes métricas para avaliar a comunicação D2D, que são acordadas para avaliar o desempenho das **técnicas de descoberta e comunicação D2D**.

Para fins de descoberta, as seguintes métricas são definidas e podem ser usadas para casos de segurança na rede, rede parcial, fora da rede e não pública.

**Desempenho:** para a descoberta aberta, representa o número de UEs descobertos como função do tempo e a função de distribuição cumulativa (CDF) do número de UEs descobertos. Para a descoberta fechada, onde o UE a ser descoberto é conhecido, a probabilidade de descoberta como função do tempo é definida.

**Faixa e confiabilidade:** probabilidade de descoberta versus perda no caminho e probabilidade de falso alarme.

**Impacto na rede de área ampla (WAN):** quantidade de recursos utilizados.

**Consumo de energia:** modelado através de energia no tempo ou equivalente consumido.

Para comunicações D2D, as seguintes métricas de avaliação são definidas:

**Rendimento D2D e eficiência espectral:** *throughput* do usuário e *throughput* do usuário percebido para *buffer* completo e capacidade do sistema VoIP (Voz sobre IP).

**Faixa e confiabilidade:** desempenho vs *pathloss* ou distância do enlace D2D.

**Impacto na WAN:** mudanças na taxa de transferência de células/eficiência espectral celular e CDFs de *throughput* percebido por usuário com e sem D2D.

**Consumo de energia:** para cenários de cobertura e fora da cobertura.

### 3.3. Funções importantes para a comunicação D2D

Algumas das funções essenciais que permitem que o LTE D2D atenda aos serviços potenciais acima mencionados são:

**Descoberta D2D:** permite que dispositivos em proximidade física se descubram usando a tecnologia de rádio LTE. No caso geral, esse processo de descoberta é realizado dentro da cobertura da rede LTE e sob o controle do operador de rede. A descoberta em regiões com parcial e não cobertura também é desejada. Nesse caso, os UEs devem suportar um alcance de cobertura maior e, uma vez que não existe um controlador de rede, será necessário transmitir/receber periodicamente sinais de descoberta com informações básicas sobre identificação, localização, status do canal, etc., o que afeta diretamente a vida útil da bateria do UE. A descoberta D2D é de importância crítica, pois permite o início de qualquer comunicação D2D e permite serviços baseados em proximidade. No entanto, em ambientes de alta interferência (por exemplo, implementações *HetNets* [Hu et al. 2011]), a descoberta de UE para UE pode ser afetada pela influência de outras estações (ou seja, outros UEs, macro e pico células) que utilizam as mesmas bandas de

frequência. Normalmente, um limiar de relação sinal-ruído (SINR) define a região de descoberta de um UE em qualquer método de descoberta D2D proposto, portanto, é claro que a interferência entre D2D e as estações base afetará o processo de descoberta nos casos em que D2D ocorre na banda celular.

**Comunicação de dados D2D:** permite que o caminho dos dados ocorra diretamente entre os UE D2D próximos em vez de passar pelas estações base. No entanto, algum controle do operador pode ser necessário para proteção de dados/tráfego e transmissões seguras. Além disso, o controle do operador permite uma estrutura de qualidade de serviço (QoS) que ofereça tratamento de comunicação diferencial com base em serviços D2D, condições de canais, assinantes, tecnologia de dispositivos, etc.

**Retransmissão D2D:** permite que as ligações *multi-hop* sejam formadas entre dois dispositivos D2D ou entre a infraestrutura celular e um terminal UE. D2D com UE retransmissor aumenta a taxa de transferência de dados de usuários de células e também pode ser usado para conectar UEs distantes sem cobertura celular às estações base, de modo que ele irá ampliar a cobertura celular.

### 3.4. Introdução ao Processo de Comunicação do Dispositivo para Dispositivo

Contrariamente ao sinal de descoberta D2D, que contém apenas alguns bits, os dados de comunicação D2D geralmente envolvem transmissão de dados, jogos locais etc. e, portanto, podem ser muito mais pesados. Além disso, o tráfego total varia muito no tempo. Portanto, o uso de recursos dedicados é ineficiente para comunicações de dados D2D. A superposição de recursos com transmissão celular é altamente desejada para melhor aproveitar o espectro.

O problema principal na sobreposição do uso de recursos é o gerenciamento de interferências. A interferência D2D para transmissões celulares precisa ser rigorosamente controlada pela rede para proteger a transmissão celular quando os UEs D2D estão em cobertura ou em cobertura parcial.

Em geral, coordenar a comunicação D2D com a rede celular para reduzir a interferência e conseguir uma eficiente reutilização de recursos, as seguintes técnicas podem ser utilizadas:

**Alocação de recursos:** os recursos podem ser ortogonais entre D2D e transmissões celulares e/ou entre transmissões D2D, a fim de reduzir a interferência intracelular. No entanto, o espectro pode ser subutilizado, o que leva a problemas de eficiência geral. A reutilização de recursos intracelulares com base em informações de localização e/ou estimativa SINR é mais promissora no uso ideal de recursos.

**Controle de potência:** aproveitando a proximidade dos UEs D2D, o controle de energia é outro elemento que pode ser usado para gerenciar interferências. Reduzir o poder de transmissão de UEs D2D próximos pode reduzir a interferência com a rede celular e/ou outras comunicações D2D, garantindo a qualidade de serviço desejada.

**Solicitação de repetição automática híbrida (HARQ):** pode melhorar o desempenho D2D no esquema de reutilização espacial por simples repetição de transmissões D2D em quadros múltiplos. Essa técnica é especialmente benéfica durante as transições D2D fora da cobertura da rede, onde a interferência pode ser severa, e a faixa de transmissão necessária de aplicações de segurança pública pode ser longa.

**Modo de Seleção:** os modos de seleção permitem uma interrupção suave entre o modo D2D e as comunicações de modo UL/DL convencionais, a fim de obter um uso eficiente dos recursos.

### 3.5. Algoritmos de roteamento para comunicação D2D

Uma vez que o processo de descoberta define possíveis redes D2D, o uso de técnicas de *multihop* irá garantir a comunicação entre fonte e destino usando usuários intermediários como retransmissões sem fio. O roteamento *multihop* é um fator chave nas comunicações D2D, uma vez que, como mencionadas anteriormente, várias métricas relacionadas ao algoritmo de múltiplos saltos podem afetar o desempenho da comunicação D2D.

O roteamento *multihop* foi amplamente estudado para comunicações sem fio no passado e vários algoritmos foram propostos para apoiar as comunicações D2D. No entanto, dependendo de suas características específicas, esses algoritmos podem ou não ser aplicados em cenários de comunicação específicos [Goratti et al. 2013] e [Parvez et al. 2014].

Em geral, o principal desafio para o roteamento em redes D2D incluem três diferentes camadas. Em primeiro lugar, as restrições de transmissão de dados devido à limitação da vida útil da bateria nos UEs afetam significativamente a seleção da rota, bem como o rendimento sustentável. Em segundo lugar, as informações geométricas da rede D2D, as restrições de interferência e os requisitos de taxa D2D (com base nos serviços de proximidade suportados) devem ser considerados conjuntamente para aperfeiçoar as estratégias de roteamento. Em terceiro lugar, a complexidade computacional dos algoritmos D2D deve ser levada em consideração, uma vez que isso afeta significativamente a eficiência energética e os requisitos rápidos de encaminhamento de dados [Ren et al. 2013]. O número total de saltos, distância do salto, capacidade total de comunicação suportada, eficiência energética e probabilidade de sucesso de roteamento são alguns exemplos de medidas que podemos usar para comparar diferentes algoritmos de roteamento. Alguns desses algoritmos de roteamento também consideram o ângulo do salto para selecionar o próximo retransmissor [Parvez et al. 2014].

Alguns exemplos de algoritmos de roteamento *multihop* adequados para serem usados para comunicação LTE D2D:

**Algoritmo *Shortest-Path-Routing* (SPR):** no SPR, cada UE D2D conhece sua localização usando o sistema de posição global (GPS) ou outros meios de localização sem fio. O algoritmo SPR para um par de UE genérico (s, d) primeiro solicita a comunicação de UEs de origem para a UE de destino. Em seguida, os UEs de origem enviam solicitação de retransmissão a todos os UEs vizinhos em sua faixa de comunicação R. Depois de receber a resposta dos possíveis UEs de retransmissão disponíveis, os UEs de origem enviam o pacote de dados ao UE retransmissor que é o mais próximo do destino UE [Yuan et al. 2014].

**Algoritmo *Interference-Aware-Routing* (IAR):** a ideia por trás do IAR é reduzir a interferência as BSs para os enlaces D2D [Yuan et al. 2014]. Nesse caso, a rota *multihop* tenta viajar ao longo da circunferência de uma área de cobertura das BSs. Essa é uma modificação do algoritmo SPR, uma vez que nos três estágios diferentes do IAR, o algoritmo SPR é usado da seguinte maneira:

1. **Escapar:** *multihop* do UE de origem para o UE de limite mais próximo;
2. **Migrar:** *multihop* do UE de fronteira para um UE de limite que é mais próximo do destino UE.
3. **Retorno:** *multihop* do limite UE para o destino UE.

O algoritmo IAR aumenta significativamente o comprimento do caminho em comparação com SPR, mas as vantagens são que a interferência da BS pode ser reduzida consideravelmente devido ao aumento da distância das BSs.

**FlashLinQ e Two-Hop FlashLinQ:** introduzido pela Qualcomm, essa tecnologia baseia-se em um novo sinal analógico de tom único (alta energia). FlashLinQ (FQL) permite que D2D descubra em áreas com mais de 1 km de raio e requer um número menor de saltos [Bae et al. 2014]. Por outro lado, os sinais de tom único não podem garantir o desempenho mínimo da transferência de dados através de sinais multitonos (de baixa energia). O FLQ de dois saltos é uma variante do FLQ, proposto para superar a limitação do FlashLinQ. Em vez de um longo salto, a nova técnica propõe uma nova comunicação de dois saltos com a ajuda de um dispositivo intermediário.

**Algoritmo Maximum Rate Towards Destination (MR-D):** essa é uma modificação do algoritmo SPR. Algoritmo MR-D para alcançar o UE de destino em um enlace D2D usando a menor quantidade de saltos. Isso reduziria o atraso e a complexidade, garantindo a taxa mínima sustentável para o destino da QoS requerida [Ren et al. 2013].

**Algoritmo Farthest Neighbor (FN):** o algoritmo FN é uma técnica de roteamento típica usada em ambientes com restrição de interferência. A ideia por trás do FN é alcançar o nó, na medida do possível da posição atual, desde que os requisitos de taxa para as comunicações D2D possam ser satisfatórios [Ren et al. 2013].

**Algoritmo Farthest Neighbor (FN):** o algoritmo FN é uma técnica de roteamento típica usada em ambientes com restrição de interferência. A ideia por trás do FN é alcançar o nó, na medida do possível da posição atual, desde que os requisitos de taxa para as comunicações D2D possam ser satisfatórios [Ren et al. 2013].

**Algoritmo Farthest Neighbor (FN):** o algoritmo FN é uma técnica de roteamento típica usada em ambientes com restrição de interferência. A ideia por trás do FN é alcançar o nó, na medida do possível da posição atual, desde que os requisitos de taxa para as comunicações D2D possam ser satisfatórios [Ren et al. 2013].

**Algoritmo de Roteamento Assistido pela Rede (NAR):** o algoritmo NAR define múltiplas rotas entre a BS e os UEs, de acordo com o caminho mais curto e com o melhor indicador de qualidade do canal (CQI), sendo iniciado quando a BS recebe uma solicitação (*RROUTE*) de um UE para realizar uma comunicação D2D. Portanto, a BS estabelece uma rota para conectar-se ao UE. O algoritmo *Dijkstra* é aplicado para encontrar o menor caminho entre a BS e o UE [Bastos and Júnior 2017].

#### 4. SimuLTE (Omnet++)

Conforme citado em [Asadi et al. 2014], a maioria dos trabalhos avaliados na literatura são baseados em simulações numéricas ou simuladores próprios. Embora tipos de simulações nesse formato serem adequados para estudar os potenciais ganhos de uma dada proposta, ainda estão longe da realidade devido aos pressupostos simplificados. Para esse

minicurso, é proposto a apresentação do simulador SimuLTE (OMnet++) que representa uma arquitetura mais próxima da realidade, permitindo avaliar de forma experimental o desempenho e os novos desafios para comunicação D2D em redes celulares.

Nessa seção, iremos analisar e realizar implementações no SimuLTE, com foco nos aspectos do modelo que podem afetar a implementação das funcionalidades da comunicação D2D. SimuLTE é um simulador a nível de sistema, baseado no *framework* OMNet++ ([Varga and Hornig 2008]), que é construído sob o conceito de módulos, uma modelagem básica em que os módulos se comunicam através de mensagens e são organizados de forma hierárquica através de módulos compostos. Cada módulo é caracterizado por uma estrutura definido via arquivos .NED (*Network Description*) e os comportamentos implementados através de classes C++.

Como características do SimuLTE para comunicação D2D, podemos destacar: a) **Um-para-Um**: Comunicação direta entre os dispositivos móveis; b) Módulos PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), RLC (*Radio link control*), MAC (*Medium Access Control protocol*) e PHY (*physical layer*) extensivos para fluxos D2D; c) Especificação das capacidades D2D para estação base e dispositivos móveis; d) Informações de Indicador de Qualidade de Canal (CQI) para os enlaces D2D; e) Diferentes potências para TX (transmissão) para UL (*uplink*) e transmissões D2D e f) Suporte para comunicação D2D:**Um-para-Muitos**;

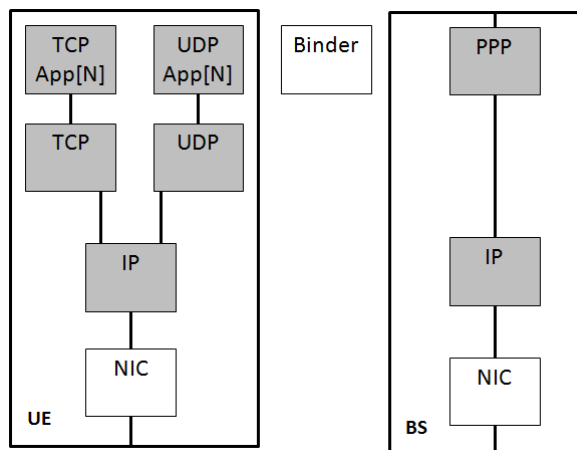
SimuLTE simula o plano de dados do LTE/LTE-A *Radio Access Network* e *Evolved Packet Core* [Raza 2013], consistindo de aproximadamente 40.000 linhas de código. SimuLTE permite simular o modo FDD (*Frequency Division Duplexing*), com estações (BSs) heterogêneas (macro, micro, pico, etc), utilizando antenas omnidirecionais e anisotrópicas, possibilitando comunicação via interface X2. Modelos de canais realísticos, MAC (*Media Access Control*) e programação de recursos em ambas às direções são suportados.

#### 4.1. Funcionamento do SimuLTE

A estrutura geral dos três principais nós é exibido na figura 9. SimuLTE implementa as estações base (BSs) e os dispositivos móveis (UEs) como módulos compostos. Esses módulos podem ser conectados entre eles ou com outros módulos (ex.: roteadores, aplicações, etc) a fim de constituir uma rede. O módulo *Binder* é visível por todos os outros módulos no sistema, armazenando informações sobre eles, tais como referências para os nós, sendo utilizado, por exemplo, para localizar interferências entre as BSs de modo a calcular a interferência entre as células que seja perceptível por um UE em sua célula. UE e BS são compostos de módulos. Cada módulo tem um arquivo de descrição associado (.ned) definindo sua estrutura, podendo ter um arquivo de definição de classe (.cpp, .h) que implementa as funcionalidades do módulo.

O módulo UDP (*User Datagram Protocol*) e TCP (*Transmission Control Protocol*) do *framework* INET, implementam os respectivos protocolos da camada de transporte, e conecta a pilha LTE para as aplicações TCP/UDP. A figura 9 exhibe as aplicações TCP e UDP (TCP App e UDP App) sendo implementadas como vetores de N módulos, permitindo assim múltiplas aplicações para cada UE. Cada aplicação TCP/UDP representa uma extremidade da conexão, cuja outra extremidade pode estar localizada dentro de outro UE ou em qualquer outro lugar da topologia. SimuLTE disponibiliza modelos

de aplicações do mundo real (VoIP *Voice over Internet Protocol* e Vídeos sob Demanda), mas qualquer outra aplicação TCP/UDP baseada no OMNeT++ pode ser utilizada, sendo o módulo IP pertencente ao pacote INET.



**Figura 9. Módulos SimuLTE.**

Conforme [Viridis et al. 2016], os nós UE e BS são organizados no módulo NIC por camadas, nomeadamente PDCP, RLC, MAC e PHY, com uma correspondência um-para-um com a pilha de protocolo LTE. Cada camada inclui funcionalidades comuns e específicas. Na verdade, o OMNeT++ permite a herança da estrutura e do comportamento dos módulos. Considerando a camada MAC como exemplo, temos as classes *MacUe* e *MacEnb*, estendendo a classe *MacBase* às funções específicas do nó, como o escalador de recursos no lado da BS.

No SimuLTE, a transmissão dos dados e o gerenciamento de recursos são separados. O gerenciamento de recursos é feita por um módulo central, o *Binder*, que monitora os blocos de recursos (RBs) no sistema em uma base TTI. O *Binder* é, portanto, um módulo núcleo, em que possui visibilidade completa de todos os nós no sistema e pode ser chamado por cada nó para obter informações compartilhadas. Mais detalhadamente, ele controla quais RBs são usados por qual nó (BSs em DL e UEs em UL), permitindo um gerenciamento de interferência correto. O fluxo de dados é modelado por meio da troca de mensagens entre módulos. A correspondência entre mensagens e recursos é mantida pelo *Binder*, que associa uma certa quantidade de RBs a cada mensagem, com base no comprimento da PDU MAC e no esquema de modulação e codificação utilizado pelo transmissor.

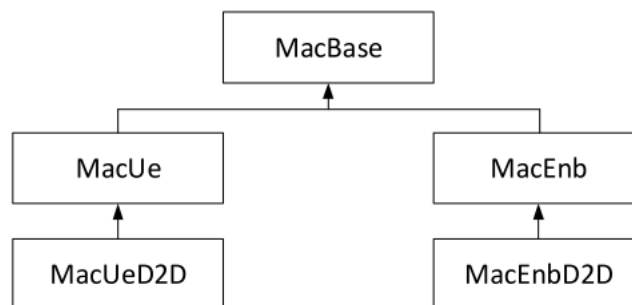
Os canais de controle, como o *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH), que é usado para transportar atribuições de agendamento, não são implementados diretamente, em vez disso, eles são modelados usando mensagens separadas e os recursos associados são novamente mantidos consistentes pelo *Binder*. Permitindo simular e avaliar seu comportamento de uma perspectiva de recursos, sem pagar a complexidade adicional de uma emulação completa.

Finalmente, cada módulo NIC tem uma classe *ChannelModel*, que coopera com a camada PHY e modela o estado do canal de ar como é percebido pelo próprio módulo NIC. É usado principalmente para calcular o SINR de um sinal recebido pelo nó, que

por sua vez é usado pela camada PHY para calcular os CQIs e avaliar erros de transmissão. Cada *ChannelModel* interage também com o *Binder* para saber exatamente quais recursos são realmente usados por cada nó no sistema. Isso nos permite avaliar SINRs, e conseqüentemente CQIs e erros de transmissão em uma estação base. SimuLTE define o *ChannelModel* como uma interface, ou seja, uma classe abstrata C++ com funções virtuais puras e também fornece uma implementação de um modelo realista, que explica a perda de caminho, o desvanecimento e o sombreamento. No entanto, essa interface pode ser facilmente estendida implementando as duas funções `getSINR()` e `error()`, usadas para as funções acima.

## 4.2. Modelagem D2D

Essa seção detalha como o suporte D2D é executado na arquitetura SimuLTE. Isso significa que a maioria das operações D2D são realizadas usando funções SimuLTE, alavancando a herança e modularidade pré-existentes. As funcionalidades específicas de D2D em cada camada da pilha LTE são introduzidas estendendo os módulos correspondentes. Por exemplo, com referência à figura 10, as classes *MacUeD2D* e *MacEnbD2D* herdam a estrutura das classes *MacUe* e *MacEnb*, respectivamente.



**Figura 10. Exemplo de Herança.**

O módulo *Binder* armazena as relações das estruturas de dados que contém o conjunto de destinos diretamente acessíveis, para cada UE compatível com D2D. Além disso, é definida uma nova direção de fluxo, ou seja, D2D, além das DL / UL existentes. Do ponto de vista do UE, os datagramas IP atingem a camada PDCP e o fluxo correspondente pode ser associado às direções D2D ou UL, dependendo se o destino estiver na tabela do módulo *Binder* ou não. Observe que a direção UL é sempre viável, enquanto o D2D pode ou não ser, e isso podem mudar ao longo do tempo (por exemplo, devido à mobilidade) e conter o modo de comutação.

Para a camada PDCP é atribuído um identificador de conexão lógica (LCID) para o fluxo de dados recebido, de acordo com uma 5-tupla definida pelo endereço IP / destino da fonte / destino e direção do fluxo. Isso cria diferentes LCIDs para fluxos com diferentes direções de transição, permitindo que as camadas mais baixas distingam os fluxos UL e D2D. A figura 11 representa o fluxo de dados, em que os datagramas que vêm da camada IP são forçados a uma das duas ramificações na camada PDCP e tratados de acordo com as camadas inferiores.

No que diz respeito à camada RLC, não são necessárias funcionalidades adicionais, portanto, são realizadas operações comuns. Na camada MAC, o UE deve notificar



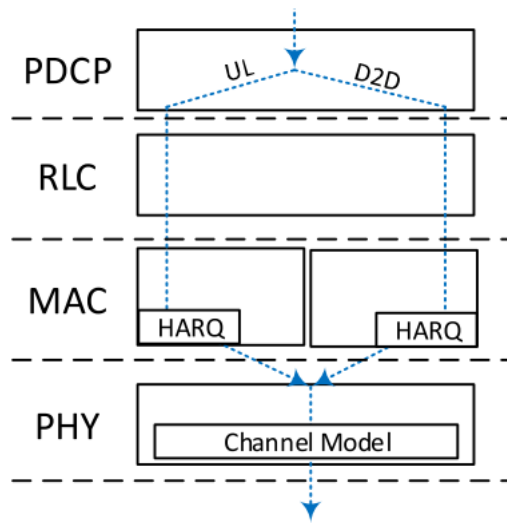


Figura 11. Fluxo de Dados.

a presença de novos dados para um fluxo D2D enviando um *Buffer Status Reports* (BSR) para a BS. Como o último precisa saber se o BSR se refere ao tráfego UL ou D2D, o BSR vem com um LCID específico. Isso permite que a BS emita a concessão certa para transmissão UL ou D2D. Quando o UE recebe uma concessão D2D, ele constrói uma PDU MAC de acordo com o *sidelink* (SL) Indicador de Qualidade de Canal (CQI), conforme explicado mais adiante e lida com a camada PHY. Uma vez que cada nó LTE é identificado por um ID MAC, a *Protocol Data Unit*(PDU) MAC contém a identificação MAC do UE de destino, em vez da identificação MAC da BS, como uma PDU UL. A transmissão do tempo de antena é simulada enviando mensagens OMNeT diretas para o módulo PHY do nó identificado pelo MAC ID na PDU MAC.

No lado do receptor, para calcular a interferência corretamente, os procedimentos para decodificação de transmissão e reporte do CQI precisam ser modificados. Consideremos a sequência de eventos OMNeT relacionados a uma transmissão PHY. Com referência a figura 12, UE1 e UE2 transmitem dados para seus pares em TTI  $t$  via mensagens OMNeT diretas. No TTI  $t + 1$ , UE3 e UE4 recebem a mensagem OMNeT correspondente e calculam se o último foi recebido com sucesso, através da função `getSinr()`. Para fazer isso, UE3 (UE4) precisam saber quem mais está transmitindo no TTI.

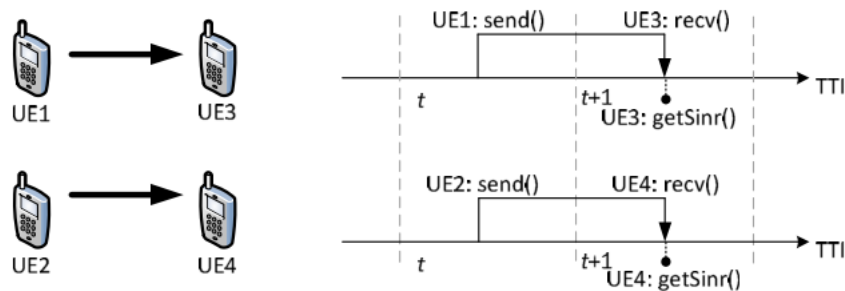


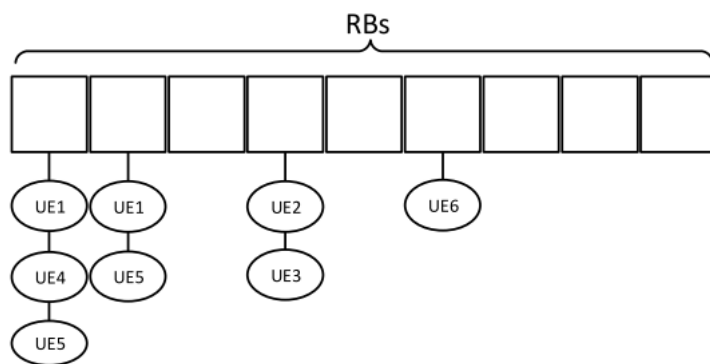
Figura 12. Transmissão e recepção direta de mensagens.

Por outro lado, uma medida CQI que ocorre em TTI  $t + 1$ , é baseado no status

do canal no mesmo TTI. Assim, é necessário que o UE armazene o mapa de RBs usados e mantenha-o para pelo menos dois TTIs. Dessa forma, é possível verificar o estado de ocupação do RB para cada UE durante o TTI atual e anterior, tanto para o relatório de CQI quanto para a decodificação, respectivamente.

Uma vez que uma transmissão foi realizada, uma resposta H-ARQ (ACK / NACK) deve ser enviada. Isto é modelado através de uma mensagem de controle que flui do UE de recepção para o UE do remetente. No entanto, a BS deve ter conhecimento dessa resposta para agendar possíveis retransmissões: lembre-se de que o UL H-ARQ é síncrono, portanto, se a transmissão D2D falhar, a BS deve reagendar oito TTI mais tarde. Para esse objetivo, fortalecemos a BS com uma estrutura de dados que reflete o status de cada *buffer* D2D H-ARQ no remetente (ou seja, ocioso ou em espera de retransmissão). Essa estrutura de dados é atualizada em cada TTI via chamada de método direto, o que simula o fato de que a BS é capaz de ouvir a resposta H-ARQ enviado pelos receptores dos fluxos D2D. Observe que isso não implica que a BS escute a transmissão de dados no SL (o que é falso) e, no entanto, é uma condição necessária para a alocação de recursos controlada pela rede de acordo com o padrão H-ARQ atual.

Do ponto de vista da BS, a operação principal do nível MAC é a alocação de recursos, que é aprimorada para permitir o agendamento dos fluxos UL e D2D no mesmo TTI. Para fazer isso, a BS explora i) o conhecimento dos *buffers* H-ARQ dos UEs D2D para agendar retransmissões, e ii) os CQIs reportados pelos UEs para os links D2D. Além disso, a função de agendamento do SimuLTE está sobrecarregada, de modo que a alocação simultânea do mesmo RB para vários fluxos D2D é permitida. Isto é realizado explorando uma estrutura de dados contendo o conjunto de UEs alocados para cada RB, como exemplificado na figura 13. Com base nas informações contidas nessa estrutura, a BS emite concessões de transmissão para os UEs. O algoritmo segundo o qual a estrutura de dados da figura 13 é definido pelo usuário.



**Figura 13. Representação dos RBs com reuso de frequência.**

### 4.3. Configuração de um cenário D2D no SimuLTE

Para a realização da simulação de um cenário D2D no SimuLTE, é necessário conhecimentos prévios sobre o funcionamento do simulador OMNeT++ e o SimuLTE.

Nessa seção, realizamos uma simulação para verificar o comportamento das comunicações D2D no simulador. Consideramos um sistema com uma BS e cinco UEs que

se comunicam usando D2D, colocados em uma distância aleatória. Os UEs transmitem com uma potência de 26 dB e o canal é afetado pelo desvanecimento. Os principais parâmetros da simulação estão resumidos na tabela 1 e a figura 14 representando o cenário de simulação no SimuLTE.

Parâmetros	Valor
Frequência da Portadora	2 GHz
Largura de Banda	5 MHz (25 RBs)
Modelo de Perda	ITU Urban Macro
Modelo de Desvanecimento	Jakes
Potência dispositivo móvel Tx	26dB
Ruído	5dB
Perda no Cabo	2dB
Tempo de Simulação	3600s

Tabela 1. Parâmetros da Simulação no SimuLTE ([Virdis et al. 2014]).

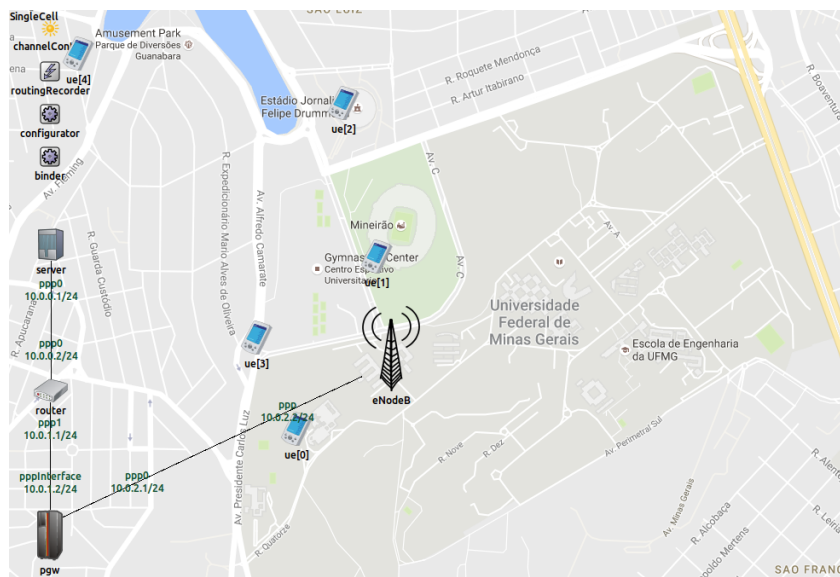


Figura 14. Cenário no SimuLTE.

### 4.3.1. Ambiente de Desenvolvimento no SimuLTE

A figura 15 representa o ambiente de desenvolvimento do OMNet++. Para o funcionamento do SimuLTE, é necessário ter configurado o *framework* INET++. Ambos os diretórios do SimuLTE e do inet devem estar dentro do diretório *workspace* do OMNet++, conforme figura 16.

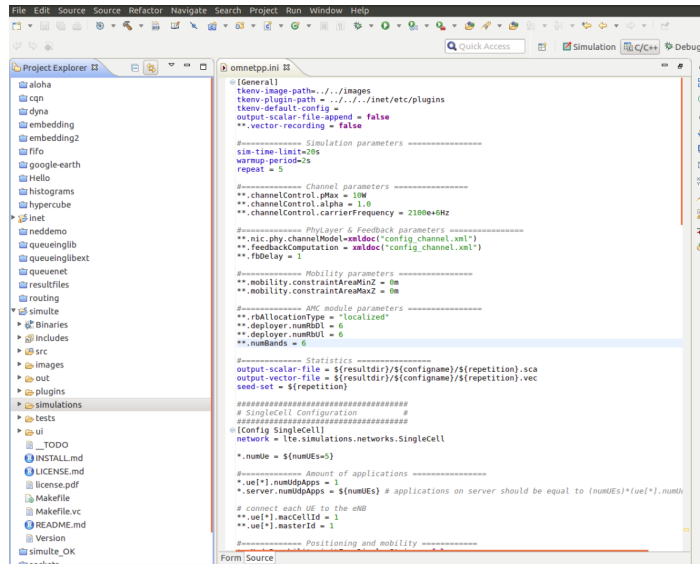


Figura 15. Ambiente de desenvolvimento do OMNet++.

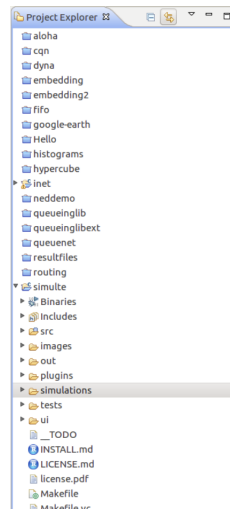


Figura 16. Diretórios inet e simulte no workspace do OMNet++.

### 4.3.2. Arquivos de Configuração no SimuLTE

Conforme o funcionamento do simulador OMNet++ (documentação em <https://omnetpp.org/documentation>), o arquivo **.ini** padrão é o arquivo **omnetpp.ini** e é sempre carregado se nenhum outro arquivo **.ini** for fornecido na linha de comando.

Vários arquivos **.ini** podem ser fornecidos, e seus conteúdos serão mesclados. Isso permite dividir a configuração em arquivos separados, por exemplo, para opções de simulação, parâmetros do módulo e opções de gravação de resultados.

As figuras 17 e 18 representam as configurações no arquivo **omnetpp.ini** para o cenário acima proposto.

```
omnetpp.ini [x]
[General]
tkenv-image-path=../images
tkenv-plugin-path = ../inet/etc/plugins
tkenv-default-config =
output-scalar-file-append = false
**.vector-recording = false

##### Simulation parameters #####
sim-time-limit=20s
warmup-period=2s
repeat = 5

##### Channel parameters #####
**.channelControl.pMax = 10W
**.channelControl.alpha = 1.0
**.channelControl.carrierFrequency = 2100e+6Hz

##### Phylayer & Feedback parameters #####
**.nic.phy.channelModel=xmldoc("config_channel.xml")
**.feedbackComputation = xmldoc("config_channel.xml")
**.fbDelay = 1

##### Mobility parameters #####
**.mobility.constraintAreaMinZ = 0m
**.mobility.constraintAreaMaxZ = 0m

##### AMC module parameters #####
**.rbAllocationType = "localized"
**.deployer.numRbDL = 6
**.deployer.numRbUL = 6
**.numBands = 6

##### Statistics #####
output-scalar-file = ${resultdir}/${configname}/${repetition}.sca
output-vector-file = ${resultdir}/${configname}/${repetition}.vec
seed-set = ${repetition}
```

Figura 17. Arquivo omnetpp.ini.

```
omnetpp.ini [x]
#####
# SingleCell Configuration #
#####
[Config SingleCell]
network = lte.simulations.networks.SingleCell

*.numUe = ${numUEs=5}

##### Amount of applications #####
*.ue[*].numUdpApps = 1
*.server.numUdpApps = ${numUEs} # applications on server should be equal to (numUEs)*(ue[*].numUdpApps)

# connect each UE to the eNB
**.ue[*].macCellId = 1
**.ue[*].masterId = 1

##### Positioning and mobility #####
*.eNodeB.mobility.initFromDisplayString = false
*.eNodeB.mobility.initialX = 300m
*.eNodeB.mobility.initialY = 300m
*.ue[*].mobility.constraintAreaMaxX = 600m
*.ue[*].mobility.constraintAreaMaxY = 600m
*.ue[*].mobility.constraintAreaMinX = 0m
*.ue[*].mobility.constraintAreaMinY = 0m
*.ue[*].mobility.initFromDisplayString = false
*.ue[*].mobility.initialX = uniform(0m,600m)
*.ue[*].mobility.initialY = uniform(0m,600m)
*.ue[*].mobility.speed = 1mps
*.ue[*].mobilityType = "LinearMobility"
#-----#
```

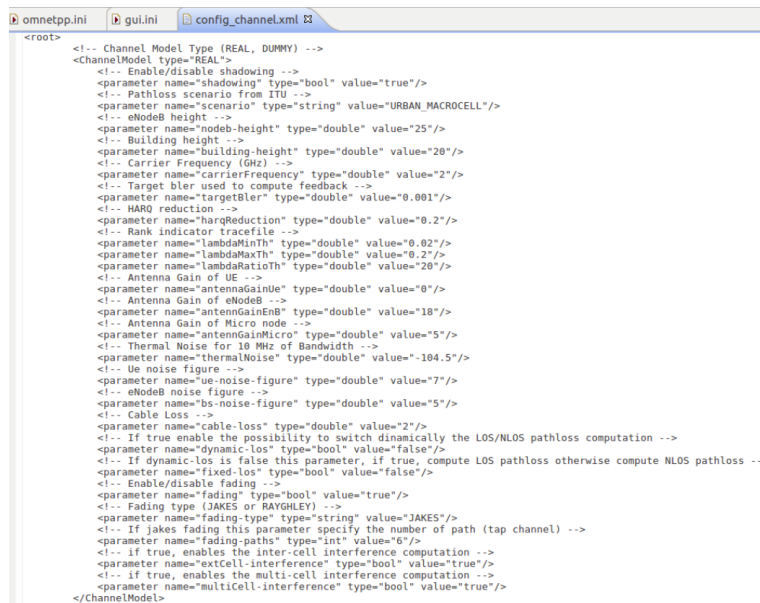
Figura 18. Arquivo omnetpp.ini.

Nesse arquivo, alguns parâmetros são importantes para definir o funcionamento da simulação, como:

- **\*.numUe = \$numUEs=5** - define o número de UEs da simulação;
- **\*.eNodeB.mobility.initialX = 300m** - define a posição das estações base;
- **\*.ue[\*].mobility.constraintAreaMaxX = 600m** - define as restrições da cobertura das estações base;

- **\*.ue[\*].mobilityType = "LinearMobility"** - define o tipo de mobilidade;

A figura 19 representa as configurações referentes ao canal de comunicação, definindo valores como: frequência da portadora, ganhos da antena, ruído no UE, tipo de desvanecimento, interferência entre células, ou seja, configurações pertinentes a camada física das simulações, que são realizadas no arquivo `config_channel.xml`.



```
<!-- Channel Model Type (REAL, DUMMY) -->
<ChannelModel type="REAL">
<!-- Enable/disable shadowing -->
<parameter name="shadowing" type="bool" value="true"/>
<!-- Pathloss scenario from ITU -->
<parameter name="scenario" type="string" value="URBAN_MACROCELL"/>
<!-- eNodeB height -->
<parameter name="nodeb-height" type="double" value="25"/>
<!-- Building height -->
<parameter name="building-height" type="double" value="20"/>
<!-- Carrier Frequency (GHz) -->
<parameter name="carrierFrequency" type="double" value="2"/>
<!-- Target bler used to compute feedback -->
<parameter name="targetBlr" type="double" value="0.001"/>
<!-- HARQ reduction -->
<parameter name="harcReduction" type="double" value="0.2"/>
<!-- Rank indicator tracefile -->
<parameter name="lambdaMinTh" type="double" value="0.02"/>
<parameter name="lambdaMaxTh" type="double" value="0.2"/>
<parameter name="lambdaRatioTh" type="double" value="20"/>
<!-- Antenna Gain of UE -->
<parameter name="antennaGainUe" type="double" value="0"/>
<!-- Antenna Gain of eNodeB -->
<parameter name="antennGainEnB" type="double" value="18"/>
<!-- Antenna Gain of Micro node -->
<parameter name="antennGainMicro" type="double" value="5"/>
<!-- Thermal Noise for 10 Mhz of Bandwidth -->
<parameter name="thermalNoise" type="double" value="-104.5"/>
<!-- Ue noise figure -->
<parameter name="ue-noise-figure" type="double" value="7"/>
<!-- eNodeB noise figure -->
<parameter name="bs-noise-figure" type="double" value="5"/>
<!-- Cable Loss -->
<parameter name="cable-loss" type="double" value="2"/>
<!-- If true enable the possibility to switch dynamically the LOS/NLOS pathloss computation -->
<parameter name="dynamic-los" type="bool" value="false"/>
<!-- If dynamic-los is false this parameter, if true, compute LOS pathloss otherwise compute NLOS pathloss -->
<parameter name="fixed-los" type="bool" value="false"/>
<!-- Enable/disable fading -->
<parameter name="fading" type="bool" value="true"/>
<!-- Fading type (JAKES or RAYGHEV) -->
<parameter name="fading-type" type="string" value="JAKES"/>
<!-- If jakes fading this parameter specify the number of path (tap channel) -->
<parameter name="fading-paths" type="int" value="6"/>
<!-- if true, enables the inter-cell interference computation -->
<parameter name="extCell-interference" type="bool" value="true"/>
<!-- if true, enables the multi-cell interference computation -->
<parameter name="multiCell-interference" type="bool" value="true"/>
</ChannelModel>
```

Figura 19. Arquivo `config channel.xml`.

Após as configurações definidas, ao executar o arquivo `omnetpp.ini`, a figura 20 é exibida para selecionarmos qual cenário queremos executar, visto que, é possível configurar vários cenários para serem simulados.

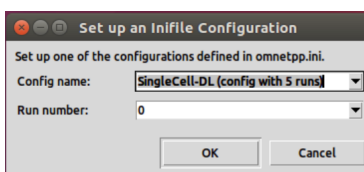


Figura 20. Tela de abertura para seleção do cenário a ser simulado.

Ao ser selecionado o cenário, é exibido a tela de abertura do simulador para dar início a simulação, conforme figura 21, sendo possível seguir os acontecimentos através de logs que podem ser customizados para visualizar possíveis problemas, conforme figura 22.

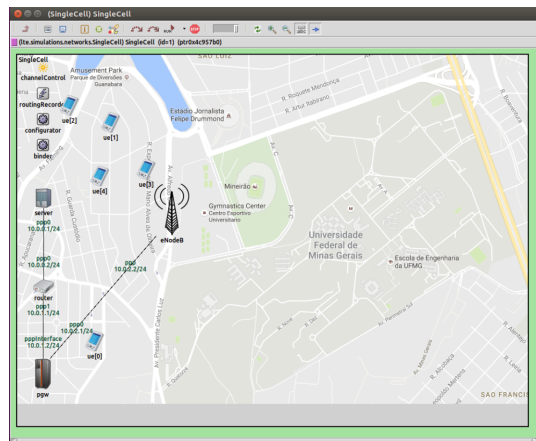


Figura 21. Tela principal da simulação.

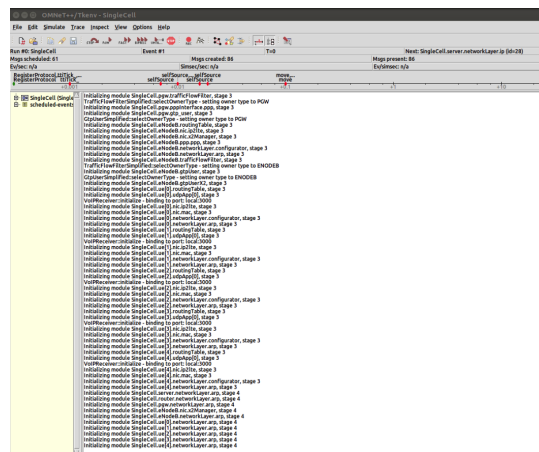


Figura 22. Tela de logs.

## 5. Desafios da Comunicação D2D nas Redes Celulares

Acreditamos que a comunicação D2D em redes celulares é um tema relativamente novo e há muito a ser realizado nesse campo. É preciso investigar as técnicas analíticas e os métodos de avaliação que são utilizados na literatura disponível, de forma a serem utilizados na comunicação D2D.

### 5.1. Técnicas analíticas

Em comparação com outros campos, como agendamento oportunista, o número de técnicas utilizadas na literatura e sua popularidade é muito baixa. A maioria da literatura apenas propõe ideias, arquiteturas ou algoritmos heurísticos simples. Alguns dos documentos formulam seus objetivos como problemas de otimização, deixando os não resolvidos devido à dificuldade dos problemas NP-Completo. Portanto, existem espaços para investigar soluções ótimas para coordenação de interferência, gerenciamento de energia e modos de seleção.

### 5.2. Métodos de Avaliação

Outra métrica para a maturidade de um campo é o método de avaliação. Quanto mais realizada for o método de avaliação, mais maduro o estudo desse campo. A maioria dos papéis

usa avaliação numérica e alguns usam simuladores caseiros simples. Isto se deve principalmente ao fato de que os bancos de teste experimentais para a rede celular são extremamente caros e ainda não possuem suporte para a comunicação D2D. A literatura raramente usa simuladores de rede popular, como NS3 (*Network Simulator*) [Baldo et al. 2013], OPNET (*OPNET Technologies*) [Xian et al. 2008], OMNet++ [Varga and Hornig 2008]. Por sua vez, os simuladores de rede atualmente disponíveis não suportam as comunicações D2D, exceto o SimuLTE que permite criar uma comunicação D2D em redes LTE-A.

### **5.3. Desafios de Implementação D2D no mundo real**

Embora a comunicação D2D desencadeou muita atenção e interesse na academia, indústria e organismos de padronização, ela não será integrada na atual infraestrutura de comunicação até que os desafios de implementação sejam resolvidos. Aqui, descrevemos alguns dos principais desafios enfrentados pelas comunicações D2D.

#### **5.3.1. Gerenciamento de Interferência**

Dado a necessidade dos dispositivos móveis utilizarem os canais tanto para *uplink / downlink* na mesma célula, é importante projetar mecanismos D2D de forma que os usuários D2D não interfiram nos serviços celulares. O gerenciamento de interferências geralmente é abordado por esquemas de alocação de recursos, embora as características da interferência D2D ainda não estejam bem compreendidas. Em [Melki et al. 2016] é proposto uma alocação de recursos de rádio para rotas D2D *multi-hop* com base na abordagem de prevenção de interferência.

#### **5.3.2. Alocação de Potência**

O poder de transmissão deve ser devidamente regulado de modo que o transmissor D2D não interfira com a comunicação do dispositivo celular enquanto mantém o requisito mínimo do SINR (*signal-to-noise-plus-interference ratio*) do receptor D2D. Na saída D2D, a interferência entre o D2D e o usuário celular não é motivo de preocupação. Portanto, a alocação de energia pode parecer irrelevante na comunicação externa D2D. No entanto, com o aumento da ocupação das bandas ISM (*Industrial Scientific and Medical*), a alocação eficiente de energia torna-se crucial para evitar congestionamentos, problemas de colisão e interferência entre os sistemas. Em [Maghsudi and Stanczak 2015] é considerado um modelo realista em relação à disponibilidade de informações e proposto um esquema de controle e distribuição de canais conjunta usando a teoria dos jogos e teoria dos grafos.

#### **5.3.3. Alocação de Recursos**

A interferência pode ser gerenciada eficientemente se os usuários D2D se comunicarem através de blocos de recursos que não são usados por dispositivos móveis vizinhos. A alocação de recursos para a comunicação D2D simplesmente consiste em evitar bandas ISM que atualmente são usadas por outros usuários D2D, *hotspots* sem fio, etc. Em [Nardini and Stea 2016] é alocado os fluxos D2D separados espacialmente e simultaneamente, aumentando assim o rendimento celular. É apresentada uma estrutura para: a)



selecionar quais comunicações devem usar o modo D2D e quando, e b) alocar recursos para usuários D2D e não D2D, explorando a reutilização.

#### 5.3.4. Formato Modulação

Os dispositivos móveis LTE existentes usam um receptor OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) em *downlink* e SC-FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) para *uplink*. Assim, para o uso de recursos de *downlink* (resp. *uplink*), o dispositivo D2D deve ser equipado com o transmissor OFDMA (ou receptor SC-FDMA) [Lin et al. 2014].

#### 5.3.5. Medição do Canal

A informação precisa do canal é indispensável para executar gerenciamento eficiente de interferências, alocação de energia e alocação de recursos. Os sistemas celulares convencionais só precisam da informação do canal *downlink* dos dispositivos móveis e a informação do canal de *uplink* é prontamente calculada na estação base. Infelizmente, a comunicação D2D requer informações sobre o ganho de canal entre os pares D2D, o ganho de canal entre transmissor D2D e UE celular e o ganho de canal entre transmissor celular e receptor D2D. A troca de tais informações de canal extra pode se tornar uma sobrecarga intolerável para o sistema se o sistema precisar de *feedback* instantâneo de CSI. O *trade-off* entre a precisão do CSI e seus gastos gerais decorrentes devem ser investigados. Em [Rappaport et al. 2013] é apresentado a motivação para novos sistemas celulares de ondas milimétricas (mm), metodologia e hardware para medições e é oferecido uma variedade de resultados de medição que mostram frequências de 28 e 38 GHz que podem ser usadas ao empregar antenas direcionais orientáveis em estações base e dispositivos móveis.

#### 5.3.6. Consumo de Energia

A comunicação D2D pode potencialmente melhorar a eficiência energética do dispositivo móvel. No entanto, isso depende muito do protocolo projetado para descoberta de dispositivo e comunicação D2D. Por exemplo, se o protocolo força o dispositivo móvel a acordar com muita frequência para ouvir solicitações de emparelhamento ou para transmitir frequentemente as mensagens de descoberta, a vida útil da bateria do dispositivo móvel pode reduzir significativamente. O *trade-off* entre o consumo de energia do dispositivo móvel e a velocidade de descoberta dos dispositivos móveis devem ser melhor avaliados. Em [Feng et al. 2015] investiga a eficiência de energia das comunicações D2D em redes celulares. Pretende-se maximizar a eficiência energética global dos usuários D2D e usuários celulares comuns, considerando o consumo de energia do circuito e os requisitos de qualidade de serviço (QoS) para ambos os tipos de usuários.

### 5.3.7. HARQ

Considerando a complexidade da interferência na comunicação D2D, HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) parece ser uma técnica viável para aumentar a robustez. O HARQ pode ser enviado diretamente (isto é, do receptor D2D ao transmissor) ou indiretamente (isto é, do receptor D2D a estação base e do transmissor da estação base para D2D). O modo direto representa menos sobrecarga para a estação base em comparação com o modo indireto. Além disso, os benefícios das mensagens ACK / NACK chegam ao transmissor com menor atraso [Babun 2015].

## 5.4. Potencial de Trabalhos Futuros

Conforme [Asadi et al. 2014], alguns problemas de pesquisa estão em aberto com relação as comunicações D2D em redes celulares. A seguir, são listados alguns problemas baseado em diferentes metodologias de pesquisa:

### 5.4.1. Trabalhos Teóricos

O uso de ferramentas matemáticas e técnicas de otimização no estado da arte são muito limitadas. A literatura atual definitivamente não possui técnicas ótimas de seleção de modos e mecanismos de interferência e controle de potência. A análise da estabilidade usando técnicas como otimização Estocástica de *Lyapunov* [Kojima and Takaba 2005] também pode ser uma questão interessante a enfrentar. Isso pode ser ampliado para fornecer utilidade baseada em *throughput*, *throughput-power tradeoff*, limites de atraso e análise de atraso de comunicações D2D em redes celulares.

### 5.4.2. Arquiteturas

Há muito pouco trabalho explicando as arquiteturas necessárias para suportar comunicações D2D em redes celulares. É interessante investigar ainda mais a capacidade da atual arquitetura celular centralizada para lidar com procedimentos D2D, como descoberta de dispositivo, configuração de conexão D2D, processo de registro de rede celular, controle de interferência, alocação de recursos, segurança e assim por diante. Da mesma forma, as arquiteturas orientadas para redes definidas pelo software em breve terão que incluir D2D na equação. De fato, D2D precisa ser estudado no contexto mais complexo das HetNets devido ao crescente interesse do mercado pela disponibilidade de várias tecnologias de rádio implantadas em dispositivos móveis.

### 5.4.3. Aplicações

Uma década atrás, o D2D foi proposto pela primeira vez para fins de retransmissão em redes celulares. Até à data, os pesquisadores propuseram novos casos de uso para comunicações D2D em redes celulares, como *multicast*, comunicação ponto a ponto, disseminação de vídeo, comunicação M2M e descarregamento celular, sendo interessante ver aplicações de comunicação D2D em redes sociais, serviços de localização, redes de veículos, redes inteligentes, etc.

#### 5.4.4. Análise de Performance

A maioria da literatura disponível é baseada em simulações numéricas ou domésticas. Embora esses tipos de método de avaliação sejam adequados para estudar os ganhos potenciais, eles ainda estão longe da realidade devido a hipóteses simplificadas. Acreditamos que uma avaliação de desempenho usando simuladores de redes existentes como NS3, OPNET, Omnet ++ ou uma avaliação experimental pode ajudar a revelar o desempenho real e os novos desafios das comunicações D2D nas redes celulares.

### 6. Conclusão

Esse trabalho tem o objetivo de apresentar a tecnologia Comunicação D2D, baseado na proposta do 3GPP, demonstrando os desafios, vantagens e desvantagens da utilização da tecnologia para dar suporte a próxima arquitetura de 5G das redes celulares. É apresentado o funcionamento de uma rede LTE-A com suporte para comunicação D2D, através de simulações utilizando o simulador SimuLTE. SimuLTE permite implementar uma rede celular LTE-A em que os dispositivos móveis tem a possibilidade de realizar uma comunicação D2D, permitindo a avaliação do comportamento de protocolos e funcionalidades da rede.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil.

### Referências

- 3GPP, T. . (2012). Feasibility study for Proximity Services (ProSe) (Release 12). (June):v. 12.2.0.
- Agiwal, M., Roy, A., and Saxena, N. (2016). Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 18(3):1617–1655.
- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., and Mohanty, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *Communications Magazine, IEEE*, 46(4):40–48.
- Asadi, A., Wang, Q., and Mancuso, V. (2014). A survey on device-to-device communication in cellular networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(4):1801–1819.
- Babun, L. (2015). Multi-hop and D2D Communications for Extending Coverage in Public Safety Scenarios. pages 912–919.
- Bae, S. J., Gu, J., and Chung, M. Y. (2014). Two-hop communication scheme for Flash-LinQ device-to-device communication system. *International Conference on Information Networking*, pages 85–90.
- Baldo, N., Requena-Esteso, M., Miozzo, M., and Kwan, R. (2013). An open source model for the simulation of LTE handover scenarios and algorithms in ns-3. *Proceedings of the 16th ACM international conference on Modeling, analysis & simulation of wireless and mobile systems - MSWiM '13*, pages 289–298.

- Bastos, A. V. and Júnior, D. C. S. (2017). Algoritmo de Roteamento Assistido para Comunicação D2D em Sistemas de Segurança Pública sobre Redes LTE Avançadas. *9º SBCUP - Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva*.
- Cao, Y., Jiang, T., and Wang, C. (2015). Cooperative device-to-device communications in cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 22(3):124–129.
- Dinh, H. T., Lee, C., Niyato, D., and Wang, P. (2013). A survey of mobile cloud computing: architecture, applications, and approaches. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 13(18):1587–1611.
- Dow, C. R., Lin, P. J., Chen, S. C., Lin, J. H., and Hwang, S. F. (2005). A Study of Recent Research Trends and Experimental Guidelines in Mobile Ad Hoc Networks. *19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05) Volume 1 (AINA papers)*, 1:72–77.
- Feng, D., Yu, G., Xiong, C., Yuan-Wu, Y., Li, G., Feng, G., and Li, S. (2015). Mode Switching for Energy-Efficient Device-to-Device Communications in Cellular Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, PP(99):1–1.
- Goratti, L., Gomez, K. M., Fedrizzi, R., and Rasheed, T. (2013). A novel device-to-device communication protocol for public safety applications. *2013 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2013*, pages 629–634.
- Gupta, A. and Jha, R. K. (2015). A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. *Access, IEEE*, 3:1206–1232.
- Hossain, E. and Hasan, M. (2015). 5G cellular: key enabling technologies and research challenges. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 18(3):11–21.
- Hu, R. Q., Qian, Y., Kota, S., and Giambene, G. (2011). Hetnets - A new paradigm for increasing cellular capacity and coverage. *IEEE Wireless Communications*, 18(3):8–9.
- Hussain, F., Anpalagan, A., and Vannithamby, R. (2017). Medium access control techniques in m2m communication: survey and critical review. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 28(1):e2869–n/a. e2869.
- Ii, J. E. S., Gabbard, J. L., and Hall, M. (2005). Survey of User-Based Experimentation in Augmented Reality Motivation for User-based Experimentation in Augmented Reality Survey Overview and Approach Description of method. pages 1–9.
- Kamruzzaman, S. M., Kim, E., and Jeong, D. G. (2011). Spectrum and Energy Aware Routing Protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks. *Communications Society*, pages 344–349.
- Kojima, C. and Takaba, K. (2005). A Generalized Lyapunov Stability Theorem for Discrete-time Systems. *Control*, 24(1):2911–2916.
- Li, F., Wang, Y., and Carolina, N. (2007). Routing in Vehicular Ad Hoc Networks : A Survey. *Ieee Vehicular Technology Magazine*, (June):12–22.
- Li, S., Xu, L. D., and Zhao, S. (2015). The internet of things: a survey. *Information Systems Frontiers*, 17(2):243–259.
- Lien, S.-y., Chien, C.-c., Tseng, F.-m., and Ho, T.-c. (2016). 3GPP Device-to-Device Communications for Beyond 4G Cellular Networks. (March):28–35.

- Lin, X., Andrews, J. G., Ghosh, A., and Ratasuk, R. (2014). An overview of 3GPP device-to-device proximity services. *IEEE Communications Magazine*, 52(4):40–48.
- Maghsudi, S. and Stanczak, S. (2015). Joint channel allocation and power control for underlay D2D transmission. *IEEE International Conference on Communications*, 2015-Sept:2091–2096.
- Melki, L., Najeh, S., and Besbes, H. (2016). Interference Management Scheme for Network-Assisted Multi-Hop D2D Communications.
- Mitola, J. (1995). The software radio architecture. *IEEE Communications Magazine*, 33(5):26–38.
- Nardini, G. and Stea, b. G. (2016). Resource allocation for network-controlled device-to-device communications in LTE-Advanced. *Wireless Networks*, (January):1–24.
- Parvez, I., Jamei, M., Sundararajan, A., and Sarwat, A. I. (2014). RSS based Loop-free Compass Routing Protocol for Data Communication in Advanced Metering Infrastructure (AMI) of Smart Grid. (MI).
- Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M., and Gutierrez, F. (2013). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! *IEEE Access*, 1:335–349.
- Raza, H. (2013). A brief survey of radio access network backhaul evolution: Part II. *IEEE Communications Magazine*, 51(5):170–177.
- Ren, P., Du, Q., and Sun, L. (2013). Interference-aware routing for hop-count minimization in wireless D2D networks. *2013 IEEE/CIC International Conference on Communications in China - Workshops, CIC/ICCC 2013*, pages 65–70.
- Shahrokhi, M. (2008). *E-finance: status, innovations, resources and future challenges*, volume 34.
- Staggers, N., McCasky, T., Brazelton, N., and Kennedy, R. (2008). Nanotechnology: The coming revolution and its implications for consumers, clinicians, and informatics. *Nursing Outlook*, 56(5):268–274.
- Tehrani, M. N., Uysal, M., and Yanikomeroglu, H. (2014). Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks Challenges, Solutions, and Future Directions \_ IEEE Communications Society. (May).
- Varga, A. and Hornig, R. (2008). An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment. *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*, pages 60:1—60:10.
- Virdis, A., Nardini, G., and Stea, G. (2016). Modeling unicast device-to-device communications with SimuLTE. *1st International Workshop on Link- and System Level Simulations (IWSLS)*.
- Virdis, A., Stea, G., and Nardini, G. (2014). SimuLTE – A Modular System-level Simulator for LTE / LTE-A Networks based on OMNeT ++. *Proceedings of SimulTech*, pages 28—30.

- Xian, X., Shi, W., and Huang, H. (2008). Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation. *2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2008*, pages 1439–1443.
- Yuan, H., Guo, W., and Wang, S. (2014). Emergency route selection for D2D cellular communications during an urban terrorist attack. *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC 2014*, pages 237–242.