

ARTIGO ORIGINAL

Uma avaliação do consumo de energia da comunicação D2D em redes celulares

Towards energy consumption on D2D communications over LTE networks

Joelias Silva Pinto Júnior¹ and Igor Monteiro Moraes²

¹Instituto Federal de Mato Grosso, ²Universidade Federal Fluminense

*joelias.junior@ifmt.edu.br; igor@ic.uff.br

Recebido: 10/08/2021. Revisado: 17/04/2022. Aceito: 21/10/2022.

Resumo

Os últimos anos têm apresentado um crescimento maciço em quantidade de dispositivos, tráfego de dados e quantidade de informações produzidas na Internet. A nova geração de telefonia móvel, a 5G, tem sido pensada para viabilizar este crescimento e proporcionar a interoperabilidade necessária. Para isto, várias tecnologias serão necessárias neste novo padrão, dentre elas, a comunicação Dispositivo-a-Dispositivo (D2D), pela qual dispositivos podem atuar como intermediários na comunicação entre a estação base e um outro nó. Isto possibilita aumento de vazão e extensão de conectividade da rede, mas gera aumento nas transmissões. Este trabalho realizou simulações que demonstraram como este aumento impactará no consumo energético dos nós encaminhadores. Foi possível perceber que a velocidade de mobilidade e quantidade de nós participantes dos encaminhamentos afetaram o comportamento de consumo energético. Identificamos que em experimentos com VoIP e *streaming* de vídeo não houve uma linearidade no aumento ou decréscimo de consumo. Os cenários apresentaram resultados dinâmicos, em que ora se tinha maior consumo energético com uma quantidade de nós, ora menor, dependendo da variação de mobilidade e tamanhos de pacote, para o caso de *streaming* de vídeo.

Palavras-Chave: Comunicação dispositivo-a-dispositivo; sistemas de comunicação móvel; gerenciamento de energia; computação móvel.

Abstract

In the last years we have seen a massive growth in the number of devices, data traffic and amount of information produced in the Internet. The new generation of mobile communication, the 5G, has been designed to enable this growth and provide the necessary interoperability. Several technologies will be needed in this new standard, among them, Device-to-Device (D2D) communication, whereby devices can act as relay in the communication between the base station and the device. This increases the throughput and extends network connectivity, but increases transmissions. This work carried out simulations that demonstrated how this increase will impact the energy consumption of the forwarding nodes. We noticed mobility speed and number of nodes participating in the referrals affected the energy consumption behavior. We identified that in experiments with VoIP streaming video there was no linearity in the increase or decrease in consumption. The scenarios presented dynamic results, in which sometimes there was greater energy consumption with a number of nodes, sometimes less, depending on the variation of mobility and packet sizes, in the case of video streaming.

Keywords: Device-to-device communication; mobile communication systems; power management; mobile computing.

1 Introdução

Os últimos anos têm apresentado um acelerado ritmo de crescimento em número de dispositivos, tráfego de dados e quantidade de informações produzidas na Internet. De 2007 à 2017, por exemplo, o tráfego global da Internet cresceu de 2 TB/s para 46.6 TB/s (Cisco, 2019). A categoria de dispositivos que mais cresceu neste período foi a de telefones móveis e, a previsão, é que até 2022 mais de 50% do tráfego da Internet seja proveniente somente de dispositivos móveis (Cisco, 2019). Com estas características de crescimento, em breve as redes celulares de quarta geração (4G) excederão suas capacidades de quantidade de dispositivos conectados e tráfego de dados. Além disso, a 4G oferece outras limitações que impossibilitam a implantação de novos serviços. Por exemplo, estima-se que um veículo autônomo precise enviar dados a uma taxa de 1 GB/s, com latência próxima de zero. A 4G torna inviável este tipo de aplicação pois, tecnicamente, pode atingir velocidade de apenas 100 Mb/s, com alta latência e com necessidade de melhorar a eficiência energética, crítica para os dispositivos móveis. Por isto, a nova geração de telefonia móvel, a 5G (3GPP, 2015), tem sido pensada para atingir altas velocidades de conexão, com baixa latência e para permitir a interconexão de milhões de dispositivos.

Ainda não há um consenso sobre a arquitetura das redes 5G. Pelo menos desde 2016, a 3GPP (3rd Generation Partnership Project) tem concentrado esforços para guiar o mercado em busca de tais soluções para 5G (3GPP, 2015). Porém, para que a 5G resolva necessidades eminentes, como ser uma solução de comunicação viável para Internet das Coisas e Redes Veiculares (Dua et al., 2015) (Vukobratovic et al., 2016), além de atender ao crescimento de número de usuários e da banda demandada por esses usuários, é desejável que a taxa de transmissão seja até 1000 vezes maior que na 4G (Gupta and Jha, 2015) e que a latência seja da ordem de poucos milissegundos, comumente chamada de latência zero (Panwar et al., 2016). O aumento da taxa de transmissão e redução da latência se darão em virtude do uso de diferentes tecnologias, que vão desde a camada física até a camada de rede. Entre essas tecnologias, estão o desenvolvimento de novos padrões LTE (Long Term Evolution) e IEEE 802.11, o uso de pequenas células (small cells), transmissão em ondas milimétricas (mmWave), MIMO maciço, compartilhamento de espectro licenciado e não licenciado, entre outras (Borges et al., 2015) (Gupta and Jha, 2015) (Panwar et al., 2016) (Wang et al., 2014).

Uma tecnologia presente na maioria das arquiteturas de rede propostas para a 5G é a comunicação Dispositivo-a-Dispositivo (Device-to-Device – D2D) (Gandotra and Jha, 2016). Com a comunicação D2D, dispositivos são capazes de se comunicar diretamente sem a necessidade do uso da estação base. Assim, podem experimentar maior vazão e menor latência em virtude da proximidade dos dispositivos, bem como, podem reduzir a carga de tráfego na estação base.

Usar um nó como intermediário em uma comunicação pode aumentar a vazão e estender a conectividade da rede mas, por outro lado, também aumenta o consumo de energia naquela rede, porque mais transmissões serão feitas (Ma et al., 2016). Desta forma, é preciso avaliar o compromisso da comunicação D2D em termos de consumo de

energia e entender até quando se vale gastar mais energia em troca de melhor conectividade para alguns nós e aumentar a vazão da rede.

Por isto, este trabalho realiza simulações de comunicação D2D no simulador de redes móveis SimuLTE (Virdis et al., 2014). São definidos 6 experimentos com diferentes tipos de aplicações e mobilidade entre eles. Para cada experimento, fizemos 6 variações no cenário, referentes à quantidade de nós encaminhadores, variando na forma de 0, 10, 25, 50, 75 e 100% de encaminhadores, dentre aqueles nós que estão habilitados para serem encaminhadores, os nós do tipo Tx. Para cada uma das variações, dentro de cada cenário, executamos 10 rodadas. Consideramos uma rede com 1 célula, com a comunicação D2D gerenciada pela operadora (estação base) e os dispositivos são distribuídos nesta de forma estacionária e aleatória. Dos resultados obtidos nas simulações analisamos a quantidade de mensagens enviadas e recebidas por nó e por cada configuração de rede. Estes resultados possibilitam compreender o consumo energético neste tipo de rede, com e sem encaminhamento. Identificamos alguns cenários em que a inserção dos encaminhadores aumenta o consumo energético da rede e, outros, em que inclusive se consegue reduzir o consumo energético, dependendo da combinação de quantidade. Os resultados que demonstram maior consumo energético já são úteis para analisar, principalmente, o perfil de consumo energético da rede conforme a quantidade de encaminhadores inseridos na mesma.

No restante deste artigo podemos verificar uma contextualização sobre as redes móveis na Seção 2, seguida da apresentação de alguns Trabalhos Relacionados na Seção 3. Discutimos sobre as simulações realizadas e os resultados obtidos, nas Seções 4 e 5, respectivamente, e concluímos na Seção 6.

2 Redes Móveis

O padrão LTE (Long Term Evolution) foi a arquitetura proposta para a quarta geração de telefonia celular (Nohrborg, 2011). Com a evolução do LTE após seu lançamento, vários releases de melhoria foram lançados. Se começou a pensar o LTE como uma evolução contínua que pudesse durar por um prazo maior que o intervalo entre as gerações anteriores e aguardar até a chegada de sua sucessora, a 5G, em 2020. Neste caminho para a sucessão, o papel da 4G era convergir para dar base e compatibilidade a tecnologias da quinta geração.

O LTE foi lançado então, como uma rede mais simplificada, baseada em Estações Base, aqui chamadas de *evolved NodeB* (eNB¹). Não há controladores centralizados e as eNBs podem ser interconectadas entre si e com o núcleo da rede (Nohrborg, 2011). As estações base se conectam por redes cabeadas e toda a rede é baseada em IP. A rede também é composta por UEs (*User Equipments* – Equipamentos de Usuários), que são todos os tipos de dispositivos móveis que os usuários eventualmente utilizam para se conectar à rede, como notebook, *smartphones*, *tablets*, etc. Estes

¹eNodeB, eNB ou Evolved Node B é um elemento do padrão LTE que corresponde ao elemento Node B do padrão UMTS ou à BS (Base Station) do GSM.

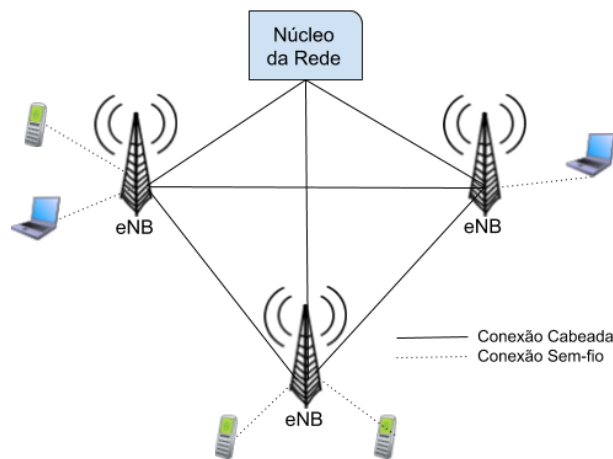


Figura 1: Esquema de conexão entre em redes 4G.

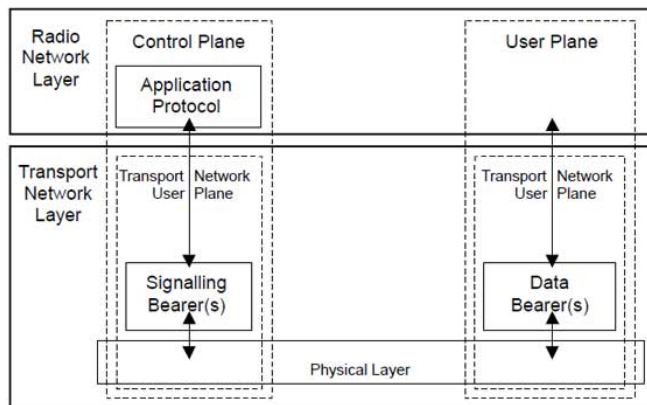


Figura 2: Arquitetura do protocolo de rádio LTE. Adaptado de TutorialPoint (2019).

dispositivos, por sua vez, se conectam apenas às estações, por meio de uma interface de rede móvel (Carvalho et al., 2019). A Fig. 1 demonstra como se dão estas conexões.

No LTE os pacotes de dados e de controle são transmitidos em canais diferentes. A diferenciação desta informação não está nos cabeçalhos, como em outros padrões. A arquitetura do protocolo do rádio LTE é separada em *control plane* e *user plane*, como se pode ver na Fig. 2. No *user plane* a aplicação cria pacotes de dados que são processados por protocolos como TCP, UDP e IP. Já no *control plane*, o protocolo NAS (*Non-Access Stratum*) promove autenticação e registro dos dispositivos, enquanto o protocolo de controlador de recursos de rádio (*Radio Resource Control - RRC*) cria as mensagens de sinalização que são trocadas entre a estação base e o dispositivo móvel. Em ambas as situações a informação é processada pelo protocolo de convergência de pacotes de dados (*Packet Data Convergence Protocol - PDCP*), o protocolo de controle do canal de rádio (*Radio Link Control - RLC*) e o protocolo de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control - MAC*), antes de ser entregue à camada física para transmissão (TutorialPoint, 2019).

As redes LTE foram pensadas para conseguir comutar pacotes mesmo com a movimentação dos usuários, sem prejuízo a seus critérios de funcionamento. O LTE opera com as tecnologias FDD (*Frequency Division Duplex*), que transmite os pacotes de *Downlink* (DL) e *Uplink* (UL) ao mesmo tempo, em frequências diferentes, e TDD (*Time Division Duplex*), que transmite pacotes UL e DL na mesma frequência, dividindo o tempo. A Fig. 4 ilustra este procedimento. Estas tecnologias foram lançadas no Release 12 do 3GPP (Sekijima and Fonseca, 2018).

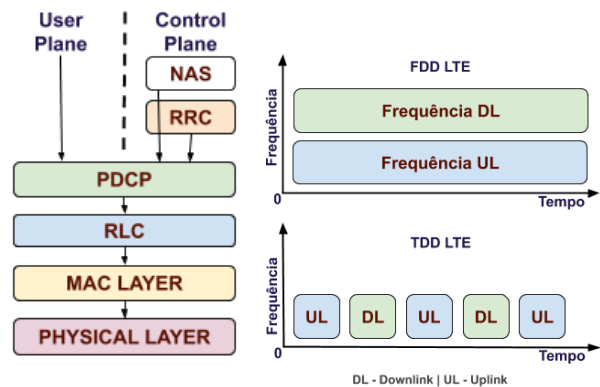


Figura 3: Arquitetura do User Plane e do Data Plane.

Figura 4: Demonstração das técnicas FDD e TDD.

A frequência utilizada pelo LTE tem seu espectro dividido em vários canais e estes canais são utilizados para, separadamente, transmitirem mensagens de dados ou mensagens de controle de rede. São transmitidos quadros (*frames*) de 10 ms, onde para cada um destes quadros há a divisão em outros 10 sub-quadros, cada de 1 ms. Estes sub-quadros são mais uma vez divididos em frações menores, chamadas de *slots*, que duram 0,5 ms.

São utilizadas técnicas de acesso ao meio diferentes, sendo que para *downlink* é utilizado o esquema de modulação digital OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) e para *uplink* a SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access*). Todas as alocações de recursos são controladas pela eNB. Ela identifica todos os dispositivos que fazem parte de sua célula (aqueles que estão conectados a ela) e controla seus recursos para que possam enviar e receber dados.

O OFDMA foi uma das novas tecnologias introduzidas nos sistemas 4G para aumentar as taxas de transmissão. Outra é o uso de múltiplas antenas tanto pelo transmissor como pelo receptor para explorar o fenômeno de múltiplos caminhos na propagação do sinal (*Multiple-Input and Multiple-Output*, - MIMO). Para a solução da interoperabilidade, é proposto o uso da comutação de pacotes através do IP, o qual atua como uma tecnologia comum entre os ecossistemas no acesso de serviços como vídeo por IP, voz sobre IP (VoIP) e dados multimídia (Gupta and Jha, 2015).

3 Trabalhos Relacionados

Para explicar o funcionamento da comunicação Dispositivo-a-Dispositivo, façamos uma analogia

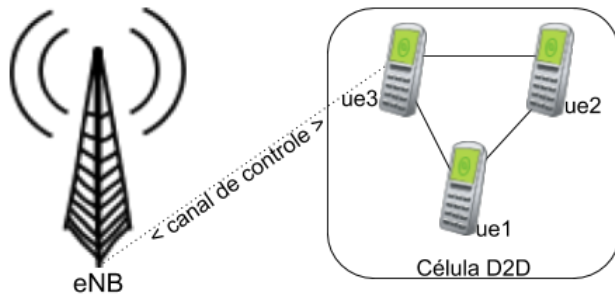


Figura 5: Célula D2D controlada pela eNB.

com a tecnologia LTE-Advanced (LTE-A) (3GPP, 2011). Nela, os UEs comunicam-se somente com a Estação Base, chamada de eNB, a que estão associados, tanto para comunicação em direção *downlink* (DL) quanto *uplink* (UL) (Nardini et al., 2016). D2D é um novo paradigma de comunicação que possibilita que dois ou mais terminais de uma rede celular se comuniquem diretamente, sem intermédio da eNB. Esse caminho de troca de dados direta é chamado de *sidelink* (SL) e tem como vantagem não precisar fazer dois saltos, passando pelo eNB, para realizar sua comunicação. Sua comunicação é direta, em apenas um salto, o que reduz a latência e economiza recursos.

Devido a proximidade dos nós, tornam-se possíveis serviços de comunicação *unicast* e *multicast* em diversos cenários (Nardini et al., 2016). E apesar de a comunicação poder ser feita direta, o eNB ainda pode ser responsável por estabelecer um canal que controle a alocação de recursos (Mohsen Nader Tehrani and Yanikomeroglu, 2014). A Fig. 5 exemplifica esta situação. Há uma célula de comunicação D2D, na qual os UEs se comunicam entre si. No entanto, a eNB, baseada em algum critério, como o de proximidade, escolheu o ue3 como aquele que estabeleceria um canal de controle. Ele gerenciará aquela célula e a ela enviará as informações de alocação de recursos.

Assim, Whitbeck et al. (2012) discute a elegibilidade de nós a partir da utilização de funções objetivo que escolhem aleatoriamente quando um nó deve se tornar encaminhador. Ainda, é considerada a participação compulsória dos usuários como encaminhadores, se assim forem escolhidos. Já em Rebecchi et al. (2016) é considerada, para eleição de nós, a diferença entre eles, que podem ser consumidores ou encaminhadores. Também, é usada uma função matemática para determinar qual fração dentre os nós consumidores deve ser promovida a encaminhadores, e quando isso deve acontecer. Há em comum entre ambas propostas, o fato de serem soluções encontradas a partir de pequenos cenários, de uma célula só.

Karunakaran et al. (2012) produziram um trabalho que traz uma solução para esta problemática. Elaboraram estratégias cooperativas centradas em conteúdo para redução do consumo energético. Consideraram nos cenários analisados para formar grupos comuns (*mobile cloud*) de consumidores, o tipo de conteúdo consumido por aqueles usuários. Demonstraram que nestes grupos a cooperação gera redução de consumo energético. Quando todos usuários de um grupo requisitam os mesmos conteúdos, a taxa de transferência é maior entre o grupo cooperativo do que

deles para com a rede celular. Isto aumenta os tempos de transmissão ociosos, proporcionando redução energética.

O trabalho de Feng et al. (2020) propõe um novo modelo que combina Comunicação D2D com tecnologia de transformação energética. Eles objetivam maximizar a eficiência energética, no entanto, o contexto utilizado é o de redes de rádios cognitivos. Eles realizam simulações que consideram a otimização de consumo energético, mas não utiliza baterias e o processo de descarga.

Um trabalho que pode ser verificado para compreender a otimização de consumo energético para esquemas de *multicas* em D2D é o de Xiaoyao et al. (2019). O experimento se restringe apenas a *multicast* e não está contextualizado em 5G.

Li et al. (2021) aponta que na ambiência de sistemas de comunicação móvel de quinta geração, 5G, é considerável o aumento de informação que os nós consomem. Neste contexto, que também agrega aplicações de IoT, estratégias de comunicação direta entre os nós são praticadas, mas encontram dificuldade relacionadas ao consumo de energia. Os autores propõem uma estratégia D2D baseada em arquitetura 5G com alguns melhoramentos (*beyond-5G*), aplicando algoritmo de roteamento D2D para comunicação IoT sem fio ponto-a-ponto. A pesquisa realiza uma análise teórica e simulação numérica, que chega a um resultado estimado de possibilidade de redução de consumo energético de até 93%.

Apesar de algumas referências que margeiam o contexto, escopo e objetivo deste trabalho, ainda se encontram poucos trabalhos publicados com discussões específicas a respeito da avaliação do consumo energético dos nós encaminhadores em comunicação D2D. Ainda não foram encontrados trabalhos que, por exemplo, estabeleçam os critérios de elegibilidade baseado na disponibilidade de recursos físicos dos nós, como memória, CPU, bateria e vazão de rede.

4 Simulações

A rede foi configurada com 80 dispositivos móveis, distribuídos de forma estacionária e aleatória em uma área de 200 m². Foram realizados 6 tipos de experimentos. Cada um foi executado aleatoriamente 10 vezes e os valores apresentados neste trabalho serão uma média destas rodadas. A quantidade de nós encaminhadores foi variada em 100%, 75%, 50%, 25% e 10% dos nós Tx, do primeiro ao quinto experimento, respectivamente. Os nós da rede foram distribuídos de forma aleatória, usando o modelo de mobilidade *Linear Mobility* do OMNeT++ (OMNeT API, 2019). Consideramos uma rede com 1 célula, como na classificação DR-OC (Mohsen Nader Tehrani and Yanikomeroglu, 2014), com a comunicação D2D gerenciada pela estação base, com todos os nós comunicando dentro da banda licenciada. A escolha do encaminhador é feita a partir de um algoritmo de cálculo de CQI (*Channel Quality Indicator*), que prefere aquele de melhor CQI. Os parâmetros adotados para realizar as simulações estão especificados na Tabela 1.

Utilizamos os resultados das simulações para fazer uma modelagem matemática de consumo energético, considerando o seguinte. O consumo energético de uma interface LTE para realizar transmissão e recepção de pacotes se

Tabela 1: Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Largura da Banda	5 MHz
Frequência da Portadora	2 GHz
Modelo de perda	ITU Urban Macro
Modelo de desvanecimento	Jakes
Modelo de mobilidade	Linear Mobility ²
Velocidade	2 m/s
Ruído	5 dB
Distância eNB – UE	500, 1000, 1500, 2000 m
Tempo de simulação	1000 s

diferem. De acordo com Höyhty et al. (2017) para recepção de pacotes o consumo é de 51, 97(mW/Mbps) e para transmissão de 438, 39(mW/Mbps).

Considerando o tempo total de transmissão de uma simulação e a quantidade de pacotes que a interface de um dispositivo enviou e recebeu naquele período, é possível modelar o consumo energético desta forma:

$$C(p_{rx}) = \left(\frac{Q_B(p_{rx})}{t_{rx}} \right) * \alpha \quad \alpha = 51, 97 \text{ mW/Mbps} \quad (1)$$

A Eq. (1) apresenta o consumo energético para um nó receptor ($C(p_{rx})$) em mW/Mbps, onde $Q_B(p_{rx})$ é a quantidade, em grandeza de armazenamento computacional, de dados recebidos por um nó p receptor (r_x). Os resultados de simulação retornam este dado em Bytes, o qual dividimos por $1e - 6$ para transformar em Megabit. Como o consumo desejado para o nó é dado por mW por Mb por segundo, dividimos por t_{rx} que é o tempo pelo qual o nó p receptor rx recebeu pacotes. Por fim, multiplicamos por α para ter o consumo total do nó de acordo com a quantidade de Megabit transmitidos no intervalo de tempo Höyhty et al. (2017).

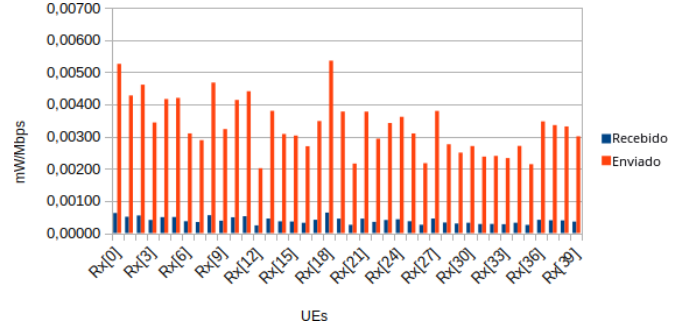
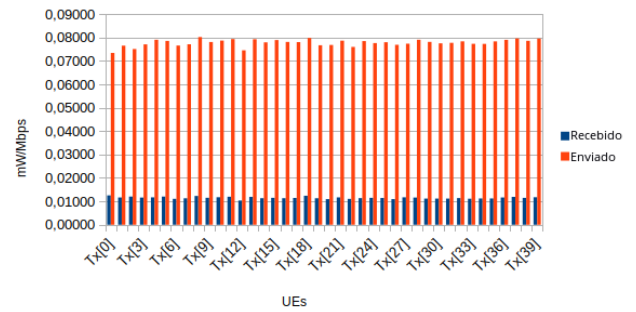
$$C(p_{tx}) = \left(\frac{Q_B(p_{tx})}{t_{tx}} \right) * \beta \quad \beta = 438, 39 \text{ mW/Mbps} \quad (2)$$

Na Eq. (2) o princípio é o mesmo que na Eq. (1), alterando apenas os nós receptores (p_{rx}) para transmissores (p_{tx}), o tempo de consumo na recepção (t_{rx}), para o tempo de consumo na transmissão (t_{tx}) e a taxa de consumo, também para a de transmissão (β).

$$C(R) = \sum_{C(p_{rx_0})}^{C(p_{rx_{n-1}})} + \sum_{C(p_{tx_0})}^{C(p_{tx_{n-1}})} \quad (3)$$

Assim, podemos calcular o consumo energético total da rede $C(R)$ realizando uma adição da somatória do consumo de cada nós receptor [$C(p_{rx_1})..C(p_{rx_n})$], com a somatória de consumo dos nós transmissores [$C(p_{tx_1})..C(p_{tx_n})$], como demonstrado na Eq. (3).

Os resultados dos experimentos, bem como a análise

**Figura 6:** Caso base para os nós Rx no experimento VoIP 2 m/s.**Figura 7:** Caso base para os nós Tx no experimento VoIP 2 m/s.

de consumo são detalhados na seção à seguir.

5 Resultados

Os experimentos são descritos à seguir: 1. Protocolo UDP com utilização de aplicação VOIP transmitindo de nós Tx para Rx, com velocidade de 1 m/s; 2. Semelhante ao anterior, com velocidade de 2 m/s; 3. Semelhante ao 3, mas com velocidade de 5 m/s; 4. Streaming de arquivo de vídeo com tamanho de 4Mib dos nós Tx para o Rx correspondente, utilizando pacotes de 256 Bytes; 5. Semelhante ao anterior, mas utilizando pacotes de 512 Bytes; 6. Semelhante ao 6, alterando o tamanho dos pacotes para 1024 Bytes.

5.1 Experimento VoIP com velocidade de 2 m/s

Para simular um caso no qual pessoas se comunicam por chamada telefônica através da Internet, simulamos uma aplicação VoIP (OMNeT API, 2019). A velocidade dos nós neste experimento é de 2 m/s, que é compatível à velocidade de uma pessoa caminhando (Mammeri, 2010). Em todos os cenários deste experimento há 80 nós, variando-se a quantidade de possíveis encaminhadores em cada um dos 6 cenários: 0, 4, 10, 20, 30 e 40 encaminhadores.

O caso base deste experimento pode ser visto nas Figs. 6 e 7. O caso base é aquele com 0 nós encaminhados, em que não há nenhum tipo de comunicação D2D, foi o que a rede

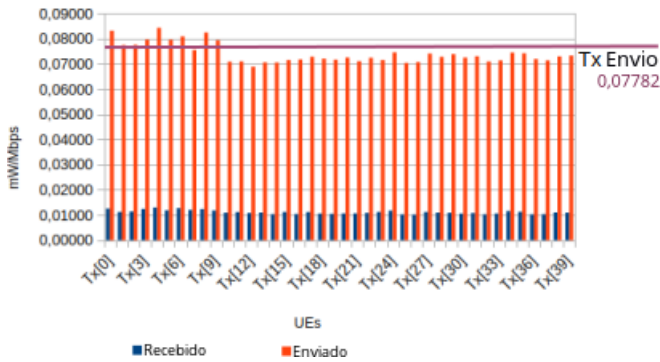


Figura 8: Consumo dos UEs Tx no experimento UDP 2 m/s com 10 encaminhadores.

mais consumiu energia total. Os experimentos possuem nós do tipo Tx, que encaminham a comunicação D2D da estação base para nós do tipo Rx e dos nós Rx para estação base. A origem da comunicação parte sempre de um nó Tx para um Rx, passando pela estação base e eventualmente, pelos encaminhadores. Os Para os nós do tipo Tx pudemos notar uma pequena diferença de consumo energético, sendo que todos se situam entre 0,07 e 0,08 mW/Mbps para envio e entre 0,01 e 0,015 para recepção. Já entre os nós Rx não há tal linearidade na energia consumida para envio, que varia de 0,002 a 0,0053 mW/Mbps. Já com a energia gasta para recepção a variação é menor e fica entre 0,0002 a 0,0006 mW/Mbps. Analisando os demais cenários com encaminhamentos, verificamos uma redução no consumo energético da rede, em relação ao caso base. O cenário com 30 encaminhadores é o que atinge os menores valores de consumo de energia, mas não conseguimos identificar um padrão de evolução entre os cenários.

As Figs. 8 e 9 mostram os gráficos resultantes do experimento com 10 nós Tx, encaminhadores, e 10 nós Rx. Nestes gráficos destacamos na linha lilás horizontal a média de envio do caso base para cada um dos cenários. Este cenário foi o que a rede mais consumiu energia total. Para os nós do tipo Tx podemos notar uma pequena diferença de consumo energético, sendo que todos se situam entre 0,07 e 0,08 mW/Mbps para envio e entre 0,01 e 0,015 para recepção. Já entre os nós Rx não há tal linearidade na energia consumida para envio, que varia de 0,002 a 0,0053 mW/Mbps. Já com a energia gasta para recepção a variação é menor e fica entre 0,0002 a 0,0006 mW/Mbps.

A Fig. 10 demonstra a soma da energia consumida por transmissão e recepção para todos os nós do tipo Rx e Tx. Constatamos que o caso base, com 0 encaminhadores, só não foi superior para recepção nos nós Tx, pois no cenário com 40 nós a soma da energia consumida pelos nós Tx para recepção foi 0,003 mW/Mbps superior. No entanto, em relação ao consumo total da rede o caso base foi o que mais consumiu e superou todos os cenários.

5.2 Experimento VoIP com velocidade de 1 m/s

Em um outro experimento, usamos as mesmas configurações do anterior, variando a velocidade para 1 m/s. Em seus casos base, tanto os nós tipo Tx quanto os nós tipo Rx apresentaram pequenas variações de consumo entre si. No

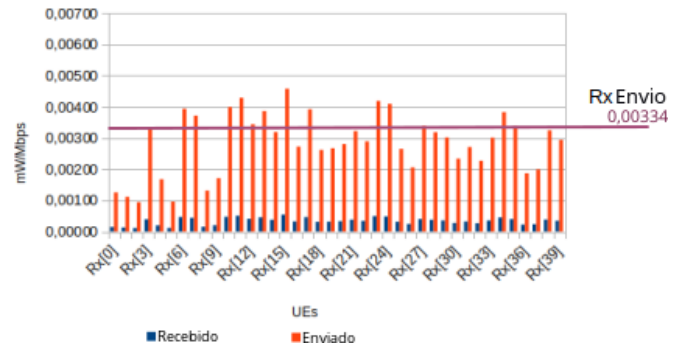


Figura 9: Consumo dos UEs Rx no experimento UDP 2 m/s com 10 encaminhadores.

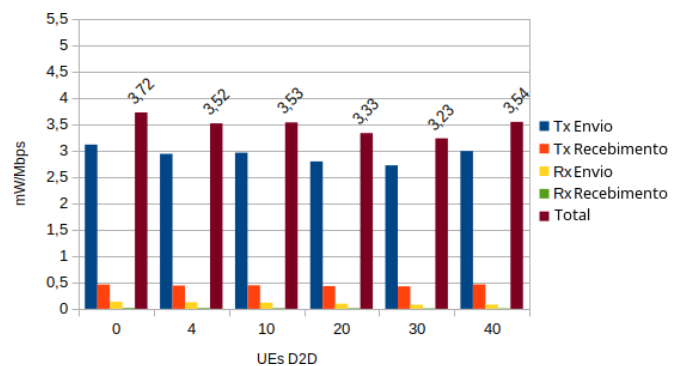


Figura 10: Consumo energético total da rede e dos UEs Rx e Tx no experimento UDP 2 m/s para cada cenário.

entanto, quando inserimos os nós encaminhadores, percebemos dois comportamentos diferentes: 1. aumenta-se o consumo dos nós Tx que participam dos encaminhamentos; e 2. reduz-se o consumo da maioria dos nós Rx que participam dos encaminhamentos.

Na Fig. 11 podemos ver o gráfico de consumo energético da rede para este experimento. Diferente do experimento com 2 m/s de velocidade de mobilidade, neste o cenário que menos consumiu energia foi o com 40 nós encaminhando. Os maiores consumo foram constatados no cenários com 10 e 30 encaminhadores, que se posicionaram como pontos de convergência. Foram o pico de consumo e após eles, o consumo só caiu.

5.3 Experimento VoIP com velocidade de 5 m/s

Em um novo experimento alterarmos a velocidade de mobilidade para 5 m/s. No caso base deste cenário os nós Rx se destoam um pouco mais do que no anterior. Analisando os nós do tipo Rx e Tx ao longo dos cenários, acontece algo semelhante ao do experimento anterior: podemos perceber redução do consumo entre a maioria dos nós Rx que participam do encaminhamento e aumento do consumo nos Tx.

Considerando a Fig. 12, que apresenta o gráfico de consumo total da rede nos cenários deste experimento, verificamos que novamente o maior consumo é do cenário sem encaminhamento. No entanto, agora a diferença total

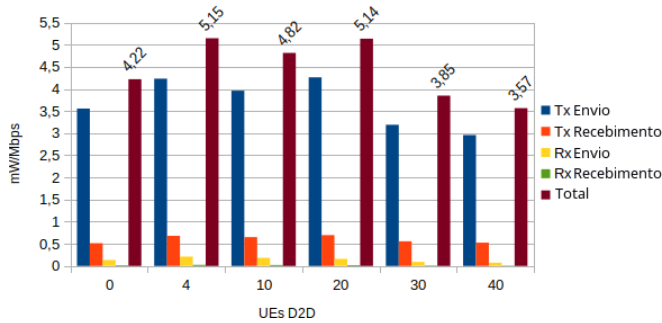


Figura 11: Consumo energético total da rede e dos UEs Rx e Tx no experimento VoIP 1 m/s para cada cenário.

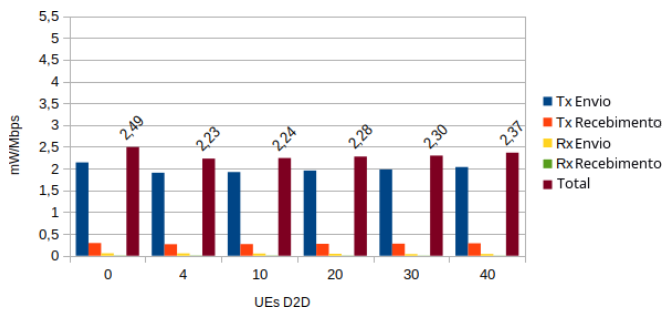


Figura 12: Consumo energético total da rede e dos UEs Rx e Tx no experimento VoIP 5 m/s para cada cenário.

de consumo entre os cenários com encaminhamento foi sensivelmente pequena, de apenas 0,14 mW/Mbps. Desta vez o cenário com menor consumo energético foi o que possuía 4 encaminhadores.

5.4 Comparação entre os experimentos VoIP

Façamos agora uma comparação utilizando os experimentos que rodaram uma aplicação VoIP sob protocolo UDP. Uma vez que estes experimentos têm configurações de rede e de variações de quantidade de encaminhadores semelhantes, diferenciando entre si apenas a velocidade de mobilidade de 1, 2 e 5 m/s, utilizaremos essa variação para realizar uma comparação entre eles.

A Fig. 13 traz o gráfico comparativo das variações de velocidade de 1, 2 e 5 m/s. As barras em azul referem-se à quantidade total de energia que foi gasta nos cenários do experimento com velocidade de 1 m/s, as em laranja são referente ao experimento com velocidade de 2 m/s e as em amarelo do experimento de velocidade 5 m/s. O eixo X se refere aos diferentes cenários, com 0, 4, 10, 20, 30 e 40 encaminhadores, e o eixo Y se refere à quantidade de energia consumida, conforme a modelagem já apresentada. Analisando-o, podemos perceber que o cenário com maior velocidade de mobilidade, 5 m/s, foi o que obteve os menores consumos de energia. Nele, todos experimentos com encaminhamento obtiveram um menor consumo energético geral da rede, sendo o cenário com 4 encaminhadores o mais eficiente.

Comparando os experimentos de VoIP, com suas va-

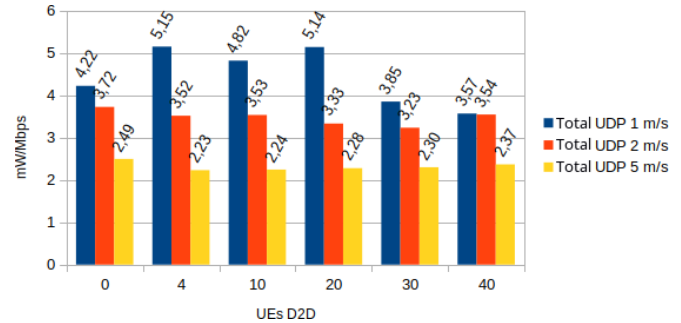


Figura 13: Consumo energético dos experimentos VoIP.

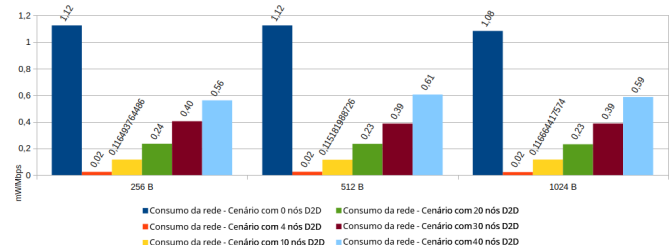


Figura 14: Consumo energético dos experimento de Streaming com 0 a 40 encaminhadores.

riações de velocidade de mobilidade, obteve destaque o experimento com velocidade de 5 m/s. Este, foi o que obteve os menores valores de consumo energético, inclusive no cenário sem encaminhadores, se comparado-o com os outros experimentos de velocidade de 1 e 2 m/s.

5.5 Experimentos UDP de Streaming de Vídeo

Nestes experimentos, utilizamos sob o protocolo UDP a aplicação de *streaming* de vídeo padrão do OMNeT++, variando além da quantidade de encaminhadores, o tamanho dos pacotes enviados entre 256, 512 e 1024 B. O arquivo transmitido foi de tamanho 4 MiB e não houve intervalo no envio. A velocidade de mobilidade foi mantida em 2 m/s para todos os casos. Para cada um dos três experimentos há um cenário com 40 nós sem nenhum encaminhador e outros 5 cenários que contêm apenas nós encaminhadores, cada um com 4, 10, 20, 30 e 40 nós.

A Fig. 14 apresenta o gráfico com os resultados do consumo da rede para cada um dos cenários dos experimentos de *streaming* de vídeo com tamanho dos pacotes enviados de 256, 512 e 1024 Bytes. Com exceção dos cenários com 10 e 30 nós encaminhadores, no experimento com pacotes de 512 B, nos demais casos podemos observar que o tamanho dos pacotes pouco influenciou o consumo de energia, já que os valores foram todos muito próximos.

6 Conclusão

Este trabalho destacou a importância de se considerar as questões energéticas em comunicações D2D no contexto de redes móveis. Assim, vemos que esta tecnologia se posiciona como uma solução não só para telefonia móvel

como para o aumento de tráfego da grande rede mundial de Internet como um todo.

Realizamos uma modelagem matemática, à partir da quantidade de dados trafegados ao longo do tempo, para inferir o consumo energético dos encaminhadores. Como resultados, pudemos perceber que a velocidade de mobilidade e quantidade de nós participantes dos encaminhamentos afetaram o comportamento de consumo energético.

Identificamos que em experimentos com VoIP e *streaming* de vídeo não houve uma linearidade no aumento ou decréscimo de consumo. Os cenários apresentaram resultados dinâmicos, em que ora se tinha maior consumo energético com uma quantidade de nós, ora menor, dependendo da variação de mobilidade e tamanhos de pacote, para o caso de *streaming* de vídeo.

Diante tantas nuances e variações nas análises destes resultados, é possível perceber que é grande a gama de simulações que se pode realizar para cada vez entender mais o consumo energético nestes contextos. Se poderia, por exemplo, realizar ainda mais variações em novas simulações com outros tipos de aplicação, outras velocidades de mobilidade e tamanhos de pacote e arquivos diferentes.

Como trabalhos futuros, identificamos tópicos como: realizar simulações considerando a geração de energia na rede; verificar o comportamento de consumo energético com outros modelos de mobilidade; considerar alocação de recursos para economizar energia.

Acknowledgments

Os autores agradecem o Instituto Federal de Mato Grosso e a Universidade Federal Fluminense por apoiarem este projeto.

Referências

- 3GPP (2011). 3GPP Release 10, Disponível em <https://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10>. Acessado em: 03/19.
- 3GPP (2015). 3GPP Release 12, Disponível em <https://www.3gpp.org/specifications/releases/68-release-12>. Acessado em: 03/19.
- Borges, V. C. M., Cardoso, K. V., Cerqueira, E., Nogueira, M. and Santos, A. (2015). Aspirations, challenges, and open issues for software-based 5G networks in extremely dense and heterogeneous scenarios, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2015(1): 164. <https://doi.org/10.1186/s13638-015-0380-8>.
- Carvalho, M., Britto, E. D., Silva, V. F. and Macedo, D. F. (2019). QD4G : QoE para Vídeo em Redes D2D / 4G com Aprendizado de Máquina, *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC 2019* pp. 188–201. <https://doi.org/10.5753/sbrc.2019.7359>.
- Cisco (2019). Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022 White Paper, Disponível em <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/ser>
- vice-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html#{_}Toc532256795. Acessado em: 03/18.
- Dua, A., Kumar, N. and Bawa, S. (2015). QoS-aware data dissemination for dense urban regions in vehicular ad hoc networks, *Mobile Networks and Applications* 20(6): 773–780. <https://doi.org/10.1007/s11036-014-0553-4>.
- Feng, G., Qin, X., Jia, Z. and Li, S. (2020). Energy efficiency resource allocation for d2d communication network based on relay selection, *Wireless networks* 27(5): 3689–3699.
- Gandotra, P. and Jha, R. K. (2016). Device-to-device communication in cellular networks: A survey, *Journal of Network and Computer Applications* 71: 99–117. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.06.004>.
- Gupta, A. and Jha, R. K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies, *IEEE Access* 3: 1206–1232. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2461602>.
- Höyhty, M., Apilo, O. and Lasanen, M. (2017). Energy Consumption Analysis of D2D Communication in 5G Systems: Latest Advances in 3GPP Standardization 4. <https://doi.org/10.20944/preprints201712.0088.v1>.
- Karunakaran, P., Bagheri, H. and Katz, M. (2012). Energy efficient multicast data delivery using cooperative mobile clouds, *European Wireless, 2012. 18th European Wireless Conference* pp. 1–5.
- Li, J., Li, M., He, J., Shi, W. and Wang, C. (2021). D2d routing aided networking for efficient energy consumption management of wireless iot, *Ad hoc networks* 123: 102636.
- Ma, B., Shah-Mansouri, H. and Wong, V. W. S. (2016). A matching approach for power efficient relay selection in full duplex D2D networks, *2016 IEEE International Conference on Communications, ICC 2016* pp. 0–5. <https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7511462>.
- Mammeri, Z. (2010). *Wireless and Mobile Networking: IFIP Joint Conference on Mobile Wireless Communications Networks (MWCN'2008) and Personal Wireless Communications (PWC'2008)*, Toulouse, France, September 30 – October 2, 2008, IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer US.
- Mohsen Nader Tehrani, M. U. and Yanikomeroglu, H. (2014). Device-to-device communication in 5g cellular networks: Challenges, solutions, and future directions, *IEEE Communication Magazine* 52(5): 86–92. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815897>.
- Nardini, G., Virdis, A. and Stea, G. (2016). Simulating device-to-device communications in OMNeT++ with SimuLTE : scenarios and configurations, *OMNeT++ Community Summit 2016* pp. 2–5. https://www.researchgate.net/publication/308262769_Simulating_device-to-device_communications_in_OMNeT_with_SimuLTE_scenarios_and_configurations.

- Nohrborg, M. (2011). LTE Overview, Disponível em <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. Acessado em: 03/19.
- OMNeT API (2019). Mobility models, Disponível em <https://inet.omnetpp.org/docs/showcases/mobility/basic/doc/index.html>. Acessado em: 09/18.
- Panwar, N., Sharma, S. and Singh, A. K. (2016). A survey on 5G: The next generation of mobile communication, *Elsevier Physical Communication* 18(2): 64–84. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2015.10.006>.
- Rebecchi, F., de Amorim, M. D. and Conan, V. (2016). 2016 IEEE 17th international symposium on a world of wireless, mobile and multimedia networks (wowmom), IEEE, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2016.7523496>.
- Sekijima, L. R. F. and Fonseca, N. L. S. (2018). Estudo de simulações realistas em redes de acesso móveis LTE / LTE-A, *Technical report*, Universidade Estadual de Campinas.
- TutorialPoint (2019). LTE Radio Protocol Architecture, Disponível em https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_radio_protocol_architecture.htm. Acessado em: 05-2019.
- 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* pp. 28–30. <https://doi.org/10.5220/0005040000590070>.
- Vukobratovic, D., Jakovetic, D., Skachek, V., Bajovic, D., Sejdinovic, D., Kurt, G. K., Hollanti, C. and Fischer, I. (2016). CONDENSE: A reconfigurable knowledge acquisition architecture for future 5G IoT, *IEEE Access* 4: 3360–3378. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2585468>.
- Wang, C. X., Haider, F., Gao, X., You, X. H., Yang, Y., Yuan, D., Aggoune, H. M., Haas, H., Fletcher, S. and Hepsaydir, E. (2014). Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks, *IEEE Communication Magazine* 52(2): 122–130. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736752>.
- Whitbeck, J., Lopez, Y., Leguay, J., Conan, V. and De Amorim, M. D. (2012). Push-and-track: Saving infrastructure bandwidth through opportunistic forwarding, *Pervasive and Mobile Computing* 8(5): 682–697. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2012.02.001>.
- Xiaoyao, X., Zefeng, T. and Kaikai, C. (2019). Low energy consumption multicast scheme for d2d multicast in wireless cellular network, *Diànzǐ jìshù yīngyòng* 45(1): 72–75.