

Alocação de Potência e de Blocos de Recurso no Uplink de Redes Sem Fio Considerando Comunicação D2D e Compartilhamento Múltiplo

Marcus V. G. Ferreira, Leonardo A. Melo e Flávio H. T. Vieira

Resumo—Este artigo investiga a alocação de recursos no uplink de redes sem fio com comunicações dispositivo-para-dispositivo (D2D) em um cenário de compartilhamento múltiplo. É proposto um algoritmo de alocação de recursos que otimiza a potência alocada aos dispositivos de modo a maximizar vazão e busca reduzir o retardo utilizando conceitos de Cálculo de Rede, como processo envelope e curva de serviço. Os blocos de recursos ociosos são compartilhados com equipamentos de usuário D2D considerando grafos de conflito no algoritmo proposto. Simulações em um cenário 5G com ondas milimétricas são realizadas para avaliar a eficácia da proposta em termos de vazão e retardo, comparando com algoritmos existentes na literatura.

Palavras-Chave—5G, D2D, alocação.

Abstract—This paper investigates resource allocation in the uplink of wireless networks with device-to-device (D2D) communications in a multi-sharing scenario. A resource allocation algorithm is proposed to optimize the power allocated to devices in order to maximize throughput and reduce delay, leveraging Network Calculus concepts such as the envelope process and service curve. Idle resource blocks are shared with D2D user equipments using conflict graphs within the proposed algorithm. Simulations in a 5G millimeter waves scenario are conducted to assess the effectiveness of the proposal in terms of throughput and delay, in comparison with existing algorithms in the literature.

Keywords—5G, D2D, allocation.

I. INTRODUÇÃO

O aumento exponencial da demanda por tráfego sem fio tem impulsionado a busca por soluções que melhorem a vazão e reduzam o retardo das redes, visando suportar aplicações emergentes como internet das coisas, comunicação máquina-a-máquina e realidade aumentada. Uma das técnicas de destaque é a comunicação dispositivo-para-dispositivo (*device-to-device*, D2D), introduzida no LTE-A (*long term evolution - advanced*, evolução a longo prazo - avançado) e incorporada ao 5G, que permite a comunicação direta entre dispositivos com pouca interferência do nó evoluído B (*evolved node B*, eNodeB), aliviando sua sobrecarga. Essa abordagem aproveita a assimetria do tráfego de dados, caracterizada por maior carga no downlink em comparação ao uplink [Mishra et al. 2016].

Diversos estudos abordam o cenário de comunicação D2D no uplink. Em [Sun et al. 2013], os autores propuseram uma heurística denominada algoritmo de alocação de recursos gananciosa (*greedy resources allocation*, GRA), visando maximizar o número de pares D2D com interferência mínima.

Marcus V. G. Ferreira, Leonardo A. Melo e Flávio H. T. Vieira, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, e-mail: marcus@tjgo.jus.br, leoalvesdemelo@gmail.com e flavio_vieira@ufg.br.

Adicionalmente, apresentaram um algoritmo ótimo baseado no método húngaro para resolução do problema de alocação de recursos. No entanto, a abordagem de [Sun et al. 2013] não contempla cenários com elevada densidade de dispositivos e assume um modelo de compartilhamento único, em que cada bloco de recurso (*resource block*, RB) pode ser reutilizado por apenas um par D2D. Em contraste, redes 5G demandam modelos de compartilhamento múltiplo, onde um mesmo RB pode ser reutilizado por múltiplos dispositivos simultaneamente.

No trabalho de [Ciou et al. 2015], os autores expandiram os resultados de [Sun et al. 2013] propondo o algoritmo GTM+ (*greedy throughput maximization plus*, maximização gananciosa da vazão mais), voltado à alocação eficiente de recursos no cenário de compartilhamento múltiplo. O algoritmo visa maximizar a vazão do sistema e atender aos requisitos de relação sinal-interferência-mais-ruído (*signal-to-interference-plus-noise ratio*, SINR). Os autores propuseram uma abordagem baseada em grafos de conflito e conjuntos independentes de peso máximo para obter soluções eficientes.

Neste trabalho, propomos a utilização de um método de alocação ótima de potência em conjunto com o algoritmo DMCG (*delay minimization conflict graph*), uma abordagem baseada em grafos de conflito e voltada à minimização de retardo, anteriormente introduzida por nós em [Ferreira and Vieira 2021]. Esta proposta visa resolver, de forma eficiente, o problema de alocação de recursos em cenários complexos de compartilhamento múltiplo reduzindo o retardo dos equipamentos de usuário D2D (*D2D user equipments*, DUEs). A metodologia empregada um método de alocação de potência que aprimora o desempenho do algoritmo DMCG, ao integrar técnicas de estimativa de limite de retardo com base no processo envelope multifractal e na curva de serviço, além de utilizar grafos de conflito e conjuntos independentes de peso máximo.

As simulações realizadas consideram um cenário com comunicações por ondas milimétricas na frequência de 26 GHz, uma das características esperadas para redes 5G, projetadas para melhorar a vazão e reduzir a latência percebida pelos usuários. Embora o algoritmo proposto seja aplicável a outras faixas de frequência, optou-se pelas ondas milimétricas devido à sua elevada disponibilidade de largura de banda, o que permite análises mais precisas em regimes de alta taxa de transmissão, característicos do 5G. Os resultados obtidos demonstram que o algoritmo proposto proporciona melhorias significativas em termos de vazão e retardo no cenário simulado.

II. MODELO DO SISTEMA

O modelo de sistema para comunicações D2D considerado neste trabalho é representado pela Figura 1. Nesse sistema, existem pares DUEs que reutilizam os recursos de rádio alocados aos equipamentos de usuário celular (*celular user equipments*, CUEs), comunicando-se diretamente entre si.

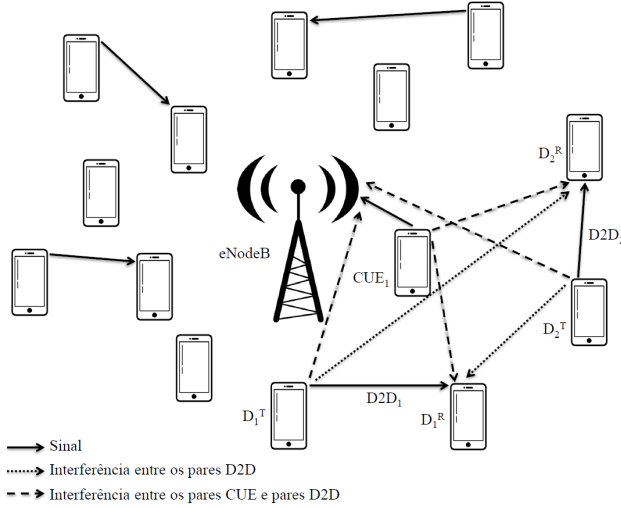


Fig. 1

MODELO DE SISTEMA PARA COMUNICAÇÕES D2D COM DUEs
REUTILIZANDO RECURSOS NO UPLINK DE CUEs.

Assumimos neste trabalho que os CUEs reais não utilizam RBs ociosos. Mais especificamente, consideramos que cada RB ocioso, que não está sendo usado por nenhum CUE real, está relacionado a um CUE virtual com potência de transmissão zero e sem a exigência de um valor mínimo para a SINR. O sistema D2D é composto por N DUEs, M CUEs, que inclui CUEs reais e virtuais, K RBs ociosos agendados para transmissão durante um intervalo de tempo de transmissão (*transmission time interval*, TTI) e $M - K$ CUEs reais. Um RB representa a unidade mínima de alocação no sistema de comunicação sem fio. Os CUEs são denotados por $C_1, C_2, \dots, C_M$ e os DUEs são denotados por $D_1, D_2, \dots, D_N$. O receptor do par de DUE é denotado por $D_{n,Rx}$ e o transmissor por $D_{n,Tx}$.

Um conjunto de RBs no uplink para cada CUE é pré-alocado antes de compartilhar os RBs com os DUEs durante a transmissão. A largura de banda alocada, denotada por W_m , para cada CUE m é proporcional ao número de RBs alocados.

O conjunto denotado como Θ_n especifica a relação CUE e DUE e representa o conjunto de CUEs que compartilham seus RBs com o par de DUE n . Outro conjunto, denotado como Δ_m , representa o conjunto dos pares de DUEs que reutilizam os RBs alocados para o CUE m . Os conjuntos $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_M$ são subconjuntos de $\{1, 2, \dots, N\}$.

Consideramos neste trabalho que a interferência restringe a alocação de RBs para os DUEs no uplink. Os valores de ganho de canal G_{mB} do CUE m para eNodeB e de ganho de canal G_{nB} do par DUE n para eNodeB variam dependendo do modelo de canal utilizado e das condições de propagação

do sinal. Analogamente, existem exigências de SINR para os pares de DUEs. Os valores de ganho de canal G_{mn} entre dois pares DUE n , de ganho de canal G_{mn} do CUE m para par DUE n e de ganho de canal $G_{n'Tx}$ de $D_{n',Tx}$ para $D_{n,Rx}$ variam dependendo da modelagem de canal utilizada e das condições de propagação do sinal.

Neste trabalho, o modelo de canal CDL-D (*clustered delay line* - D, linha de retardo agrupada - D) é utilizado para gerar os valores desses ganhos [3gp 2017], e assume-se que o eNodeB conhece a informação do estado do canal e o limiar de SINR para cada usuário. O conhecimento desses parâmetros pelo eNodeB é assumido em vários trabalhos relacionados à alocação de recursos em redes sem fio, como [Sun et al. 2013], [Ciou et al. 2015] e [Ferreira and Vieira 2021], com o propósito de simplificar cenários de simulação.

III. ALGORITMO PROPOSTO PARA MINIMIZAÇÃO DE RETARDO EM COMUNICAÇÃO D2D COM ALOCAÇÃO ÓTIMA DE POTÊNCIA

Nesta seção, propomos alocar recursos para usuários D2D utilizando um método de alocação ótima de potência em conjunto com o algoritmo DMCG apresentado em [Ferreira and Vieira 2021].

A. Alocação Ótima de Potência em Sistemas D2D

O problema de maximização da vazão de um sistema D2D pode ser expresso da seguinte forma [Yu and Zhu 2016]:

$$\max_{\{p_{i,k}^c, p_{j,k}^d\}} \sum_{k \in S} \sum_{j \in D} \log_2 \left(1 + \frac{p_{j,k}^d \cdot g_j^k}{N_0 + p_{i,k}^c \cdot h_{i,j}^k} \right), \quad (1)$$

sujeito a:

$$0 \leq p_{i,k}^c \leq P_{max}^c, \forall i \in C, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in S} \sum_{j \in D} p_{j,k}^d \leq P_{tot}, \quad (3)$$

$$p_{j,k}^d \cdot h_{j,B}^k - \frac{p_{i,k}^c \cdot g_{i,B}^k}{\gamma_{th}^c} + N_0 \leq 0, \quad (4)$$

onde $p_{i,k}^c$ e $p_{j,k}^d$ são as potências de transmissão do usuário i e do par D2D j no canal k , g_j^k é o ganho de canal entre o eNodeB e o par j , $h_{i,j}^k$ é o ganho de canal entre o usuário i e o par D2D j , N_0 é a potência do ruído, P_{max}^c e P_{tot} são as restrições de potência máxima de transmissão de cada usuário e par D2D, S é o conjunto de canais ocupado pelos usuários D2D e γ_{th}^c é a SINR limite dos usuários.

A função Lagrange do problema (1) em relação a (3) pode ser escrita como [Yu and Zhu 2016]:

$$L(\{p_{i,k}^c, p_{j,k}^d\}, \lambda) = \sum_{k \in S} \sum_{j \in D} \log_2 \left(1 + \frac{p_{j,k}^d \cdot g_j^k}{N_0 + p_{i,k}^c \cdot h_{i,j}^k} \right) - \lambda \left(\sum_{k \in S} \sum_{j \in D} p_{j,k}^d - P_{tot} \right), \quad (5)$$

onde λ é o multiplicador de Lagrange.

As variáveis $p_{i,k}^c$ e $p_{j,k}^d$ no problema acima podem ser divididas por um método de decomposição. Desta forma, o valor ótimo de $p_{i,k}^c$ pode ser escrito como [Yu and Zhu 2016]:

$$\hat{p}_{i,k}^c = \frac{\gamma_{th}^c}{g_{i,B}^k} (p_{j,k}^d \cdot h_{j,B}^k + N_0). \quad (6)$$

O problema formulado é do tipo convexo, então as soluções ótimas são obtidas por método ótimo convexo. Podemos obter o valor ótimo de $p_{j,k}^d$ pelas condições Karush-Kuhn-Tucker (KKT) [Yu and Zhu 2016]:

$$\hat{p}_{j,k}^d = \left[\frac{\sqrt{\Delta}}{2(g_{i,B}^k)^2 \cdot B(g_j^k + B)} - \frac{A}{2B} - \frac{A}{2(g_j^k + B)} \right]_0^\tau, \quad (7)$$

onde $[\cdot]_x^y = \min(\max(\cdot, x), y)$ e Δ pode ser escrito como:

$$\Delta = g_j^k (g_{i,B}^k)^2 A \left(g_j^k (g_{i,B}^k)^2 A + \frac{4}{\lambda \ln 2} \cdot (g_{i,B}^k)^2 B (g_j^k + B) \right). \quad (8)$$

Os valores ótimos de potência de transmissão $p_{i,k}^c$ e $p_{j,k}^d$ são então obtidas por um método de otimização iterativo que converge para os valores ótimos com base no gradiente λ .

B. Algoritmo de Grafo de Conflito para Minimização de Retardo

O processo envelope para o tráfego de pacotes de entrada é um limite superior para o processo real acumulado de tráfego de pacotes. O processo de chegada limitado multifractal (*multifractal bounded arrival process*, MFBAP) é uma alternativa determinística para obter o processo envelope que limita o volume de tráfego em um dado intervalo de tempo, calculado conforme segue [Santos Jr and Vieira 2015]:

$$\hat{A}_{MFBAP}(t) = \bar{a}t + k\sigma t^{H(t)} + B_{buf}, \quad (9)$$

onde $H(t)$ é o expoente de Hölder [P et al. 2003], que representa o grau de singularidade da função, t é o instante de tempo, $\bar{a}$ e σ são, respectivamente, a média e o desvio padrão do tráfego de entrada, k é a constante relacionada à probabilidade de violação (para $\epsilon = 10^{-6}$) do processo envelope e B_{buf} é o tamanho do buffer.

O limite superior de retardo, denotado por $\hat{d}$, é dado por [Santos Jr and Vieira 2015]:

$$\hat{d} = \inf \{d \geq 0 | \forall t \geq 0 : A^*(t-d) \leq S(t)\}, \quad (10)$$

onde $\inf$ é um operador que retorna, neste caso, o menor valor de $d \geq 0$ que obedece $A^*(t-d) \leq S(t)$. A^* é o processo envelope MFBAP, calculado de acordo com a equação (9), e S é a curva de serviço generalizada de um sistema de multiplexação por divisão de frequência ortogonal (*orthogonal frequency division multiplexing*, OFDM) para qualquer usuário servido pelo mesmo intervalo de tempo T , e pode ser denotada como [Costa 2013]:

$$S(t) = cTP + cT \min \left\{ \frac{\max[t - PN_S T - (n_S - 1)T; 0]}{T}; 1 \right\}, \quad (11)$$

onde c é a taxa de serviço média no servidor do sistema e N_S é o número de intervalos de tempo T por ciclo completo P dado por $P = \left\lfloor \frac{t}{N_S T} \right\rfloor$. O operador representa o menor número inteiro mais próximo de $\frac{t}{N_S T}$.

Para facilitar a compreensão, **Algoritmos 1** e **2** mostram o pseudo-código para o algoritmo de alocação de recursos baseado no algoritmo DMCG e para o algoritmo de verificação de retardo, respectivamente. O algoritmo DMCG é iniciado pela alocação aleatória de RBs ociosos. Ou seja, um par de DUEs é escolhido aleatoriamente para cada RB ocioso. Em seguida, decide-se sobre a reutilização de RBs para todos os CUEs. Para otimizar a função de utilidade (10), um grupo de pares não marcados m é formado adicionando cada par de DUE não alocado n a ele, criando um conjunto denominado Γ_m . Um conjunto de pares de DUE que maximiza a utilidade total é contido no maior grupo m' com pares de DUE não alocados, tomando o maior conjunto independente de pesos do grafos de conflitos correspondente ao grupo m' . Os pares de DUE podem reutilizar RBs dos CUEs de m' . Os candidatos são removidos um a um até que os requisitos de SINR sejam atendidos. Então, após uma iteração, o conjunto de pares de DUEs que reutilizam RBs dos CUEs de m' , denotado como $\Delta_{m'}$, acaba sendo os candidatos restantes, e o grupo m' é marcado como "feito". Iterações adicionais são realizadas se houver grupos não marcados. Portanto, o algoritmo DMCG é iterativo e forma grafos de conflito $G_{m'}$, buscando atender aos requisitos de SINR a cada iteração.

Os pares de DUEs no grupo m' correspondem ao conjunto de vértices do grafo de conflito $G_{m'}$. A cada vértice do grafo de conflito é atribuído um valor de peso de acordo com a utilidade do par de DUE correspondente quando ele entra no grupo m' . No grafo de conflito, se a interferência mútua não atender ao limiar, uma aresta é adicionada para cada dois vértices. O mesmo RB não pode ser reutilizado por dois pares de DUE.

O algoritmo DMCG tem como objetivo remover os pares de DUE que não podem coexistir devido à interferência mútua e manter os pares de DUE que maximizam a capacidade do sistema. Os candidatos são selecionados de acordo com o maior conjunto independente de pesos do grafo de conflito $G_{m'}$. Em outras palavras, o conjunto $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_M$ de pares de DUEs n que reutilizam RBs alocados aos CUEs de m é retornado como saída do algoritmo.

IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

As funções e rotinas de simulação foram implementadas manualmente utilizando o software MATLAB versão R2018a, a fim de obter maior controle sobre a configuração do cenário de simulação e os parâmetros de modelagem do canal em comparação com as ferramentas de simulação de rede disponíveis.

Neste artigo, os resultados de simulação do algoritmo de alocação proposto são comparados com os do algoritmo

Algoritmo 1: Algoritmo Proposto para Minimização de Retardo em Comunicação D2D com Alocação Ótima de Potência

```

1 Receber os parâmetros iniciais:  $M$  CUEs,  $N$  pares
  DUE,  $K$  RBs ociosos e  $M - K$  CUEs reais;
2 Para cada RB ocioso, escolher aleatoriamente  $K$  pares
  DUE  $D_{\delta_1}, D_{\delta_2}, \dots, D_{\delta_K}$ ;
  /*  $U$  é o conjunto de grupos não
  marcados */
3  $U \leftarrow \{1, 2, \dots, M\}$ ;
  /*  $\Gamma$  é o conjunto de DUEs que se
  junta ao grupo  $m$  */
4  $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_M \leftarrow \emptyset$ ;
  /* Inicializa */
5 for  $n \in \{1, 2, \dots, N\} - \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_K\}$  do
  /* Chama Algoritmo 2 (Verificação
  de Retardo) */
6    $m^* \leftarrow \text{OtimizaRetardo}(n, U)$ ;
  /*  $D_n$  junta ao grupo  $m^*$  */
7    $\Gamma_{m^*} \leftarrow \Gamma_{m^*} \cup \{n\}$ ;
8 end
  /* Corpo principal */
9 while  $U \neq \emptyset$  do
10  Forme o grafo de conflito  $G_{m^*}$  para o maior grupo
   $\Gamma_{m'}$  em  $U$ ;
11   $\Delta_{m'} \leftarrow$  conjunto independente de peso máximo de
   $G_{m'}$ ;
12  for  $n' \in \Delta_{m'}$  do
  /* Verifique se o par DUE  $n'$ 
  atende ao requisito de SINR.
  */
13   if  $P_{m'} G_{m'n'} + \sum_{n \in \Delta_{m'} - \{n'\}} P_n G_{nn'} \geq I_{n'}$ 
  then
14   | Remova  $n'$  de  $\Delta_{m'}$ ;
15  end
16 end
17 Em ordem decrescente, ordene os DUEs em  $\Delta_{m'}$ 
  pela sua interferência em  $C_{m'}$ ;
  /* Remova um DUE de  $\Delta_{m'}$  até que a
  restrição de interferência
  máxima tolerável  $I_{m'}$  seja
  atendida; */
18 while  $\sum_{n \in \Delta_{m'}} P_n G_{nB} \geq I_{m'}$  do
19 | Remova o primeiro elemento de  $\Delta_{m'}$ ;
20 end
21 for  $n \in \Gamma_{m'} - \Delta_{m'}$  do
  /* Chama Algoritmo 2
  (Verificação de Retardo) */
22    $m^* \leftarrow \text{OtimizaRetardo}(n, U - \{m'\})$ ;
  /*  $D_n$  junta ao grupo  $m^*$  */
23    $\Gamma_{m^*} \leftarrow \Gamma_{m^*} \cup \{n\}$ ;
24 end
  /* Grupo  $m'$  é marcado */
25  $U \leftarrow U - \{m'\}$ ;
26 end
27 Retorne o conjunto dos pares DUE que reutilizam os
  RBs alocados para o CUE:  $m\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_M$ ;
    
```

Algoritmo 2: Verificação de Retardo

```

1 Receber parâmetros iniciais: DUE  $n$  e conjunto  $C$ ;
  /* Inicializa */
2  $\text{RetardoOtimo} \leftarrow 1000$ ;
3  $m^* \leftarrow 0$ ;
  /* Calcula  $m^*$  */
4 for  $m \in C$  do
  /* Verifica a restrição */
5   if  $P_n G_{nB} \leq I_m$  then
  /* Estima o limite de retardo.
  */
6   | Calcula  $\hat{d}(m)$  conforme a equação (10);
  /* Otimiza retardo */
7   | if  $\hat{d}(m) \leq \text{RetardoOtimo}$  then
8   | |  $\text{RetardoOtimo} \leftarrow \hat{d}(m)$ ;
9   | |  $m^* \leftarrow m$ ;
10  end
11 end
12 end
13 Retorna grupo ótimo:  $m^*$ ;
    
```

DMCG [Ferreira and Vieira 2021], o GTM+ apresentado em [Ciou et al. 2015] e um esquema de reutilização aleatória.

Os parâmetros de simulação do sistema sem fio e as condições do canal são apresentados na Tabela I. A maioria dos valores dos parâmetros foi definida de acordo com as referências [Sun et al. 2013] e [Ciou et al. 2015].

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Modelo multipercurso	CDL-D
Cenário	Macro urbano
Modulação	CP-OFDM
Potência de transmissão do CUE	23 dBm
Potência de transmissão do DUE	10 dBm
Requisito de SINR para cada CUE	7 dB
Requisito de SINR para cada par DUE	4.7 dB
Raio de cobertura do eNodeB	500 m
Distância entre cada par DUE	15 m
Densidade de potência do ruído branco	-174 dBm/Hz
Modelo de perda de percurso para CUE e DUE	$128.1 + 37.6 \log_{10}(d_{dis}[km])$
Modelo de perda de percurso para pares DUE	$148 + 40 \log_{10}(d_{dis}[km])$
Largura de banda do sistema	396 MHz
Número de RBs	275
Frequência da portadora	26 GHz
Número de CUEs reais	40
Número de CUEs	No intervalo entre 60 e 100
Número de pares DUE	160
Número de TTIs	100

Os resultados exibidos na Figura 2 demonstram que o algoritmo proposto supera os demais em termos de vazão total do sistema, desempenho atribuído à sua estratégia de alocação ótima de potência. Assim como o DMCG, o algoritmo proposto emprega grafos de conflito em conjunto com a técnica de minimização do retardo, o que contribui significativamente

para o aumento da taxa de vazão. Embora os algoritmos proposto, DMCG e GTM+ apresentem a mesma ordem de complexidade computacional, $O(n^4)$, o algoritmo proposto demonstra desempenho superior em termos de vazão.

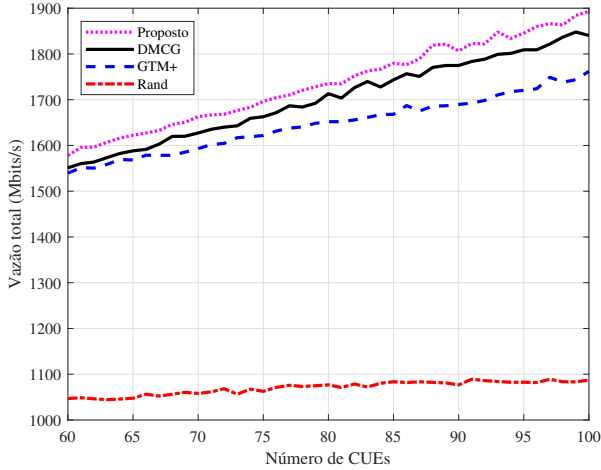


Fig. 2

TAXA DE VAZÃO TOTAL PARA DIFERENTES NÚMEROS DE CUEs.

A Figura 3 apresenta a comparação dos valores médios de retardo entre os algoritmos avaliados. Os menores valores foram obtidos pelo algoritmo proposto e pelo DMCG. Tal resultado evidencia a eficácia dessas abordagens em utilizar o retardo estimado como função de utilidade, promovendo significativa redução do retardo nos cenários simulados.

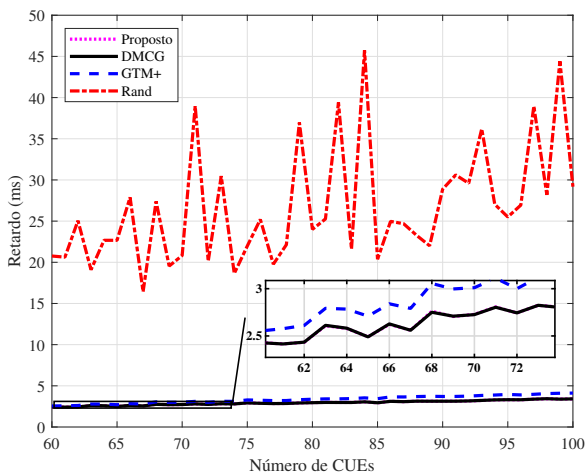


Fig. 3

RETARDO MÉDIO PARA DIFERENTES NÚMEROS DE CUEs.

V. CONCLUSÕES

Este artigo propõe um algoritmo de alocação de recursos no uplink para redes D2D que integra um método de alocação ótima de potência ao algoritmo DMCG, visando maximizar a

vazão e minimizar o retardo estimado por meio de técnicas baseadas no processo envelope multifractal e na curva de serviço. A abordagem permite decidir de forma eficiente sobre a reutilização de recursos ociosos por dispositivos D2D. O algoritmo proposto é avaliado em um cenário de rede com propagação por ondas milimétricas para aproveitar a maior disponibilidade de largura de banda para os usuários.

Os resultados apresentados demonstram que o algoritmo de alocação proposto oferece os maiores valores de taxa de vazão e os menores valores de retardo quando comparado aos algoritmos DMCG, GTM+ e Rand, apresentando complexidade computacional similar. As simulações computacionais confirmaram que a alocação ótima de potência para usuários, em conjunto com o uso de informações de retardo estimado para identificar grafos de conflito e conjuntos independentes de peso máximo, melhora o desempenho da alocação de recursos. Isso resulta em aprimoramentos na taxa de vazão, quando comparado aos algoritmos DMCG e GTM+, em um cenário de comunicação D2D com ondas milimétricas.

Como trabalho futuro, pretendemos aplicar uma variação da abordagem proposta envolvendo transmissão de dados no downlink, comparando seu desempenho com outras estratégias de alocação de recursos.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Excelência em Redes Inteligentes Sem Fio e Serviços Avançados (CERISE), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio e financiamento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [3gp 2017] (2017). 3gpp tr 38.901 version 14.0.0 release 14. 5g; study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 ghz.
- [Ciou et al. 2015] Ciou, S., Kao, J., Lee, C. Y., and Chen, K. (2015). Multi-sharing resource allocation for device-to-device communication underlying 5g mobile networks. In *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1509–1514.
- [Costa 2013] Costa, V. H. T. (2013). Análise de desempenho de sistemas de comunicação ofdm-tdma utilizando cadeias de markov e curva de serviço. Master's thesis, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e da Computação (EMC). Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - EMC (RG).
- [Ferreira and Vieira 2021] Ferreira, M. V. G. and Vieira, F. H. T. (2021). Delay minimization based uplink resource allocation for device-to-device communications considering mmwave propagation. *PeerJ Computer Science*, 7:e462.
- [Mishra et al. 2016] Mishra, P. K., Pandey, S., and Biswash, S. K. (2016). Efficient resource management by exploiting d2d communication for 5g networks. *IEEE Access*, 4:9910–9922.
- [P et al. 2003] P. M., Gadre, V., and Desai, U. (2003). *Multifractal Based Network Traffic Modeling*. Springer US.
- [Santos Jr and Vieira 2015] Santos Jr, J. and Vieira, F. H. (2015). Estimation of backlog and delay in ofdm/ tdma systems with traffic policing through network calculus. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 13:796–803.
- [Sun et al. 2013] Sun, H., Sheng, M., Wang, X., Zhang, Y., Liu, J., and Wang, K. (2013). Resource allocation for maximizing the device-to-device communications underlying lte-advanced networks. In *2013 IEEE/CIC International Conference on Communications in China - Workshops (CIC/ICCC)*, pages 60–64.
- [Yu and Zhu 2016] Yu, B. and Zhu, Q. (2016). A qos-based resource allocation algorithm for d2d communication underlying cellular networks. In *2016 Sixth International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, pages 406–410.