

Analisando a Capacidade de Descarregamento de Redes Móveis por meio de Redes Oportunísticas *

Vinícius F. S. Mota¹, Henrique Moura¹, Vinicius F. Silva¹,
Daniel F. Macedo¹, Yacine Ghamri-Doudane², José Marcos Silva Nogueira¹

¹ Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte – Brazil

²L3i Lab – Université de La Rochelle
La Rochelle – France

{v fsmota, henrique, viniciusfs, damacedo, jmarcos}@dcc.ufmg.br
yacine.ghamri@univ-lr.fr

Abstract. *Device-to-Device (D2D) communication paradigm arises as an approach to relieve data traffic from mobile Internet Service Providers. In D2D, end-user devices can help operators to improve cell coverage, spectrum efficiency and to offload data. This work discuss the feasibility of D2D offloading through a quantitative evaluation of three applications: (i) Opportunistic Relaying (OpR), nodes in the opportunistic mode attempt to forward their data through relay nodes instead of sending them to the infrastructure; (ii) Cache-and-Forward (CaF), relay nodes forward all data received to all opportunistic nodes within a threshold delay; and (iii) Relay-as-Cache (RaC), opportunistic nodes seek for a determined content in the relay nodes cache. Our simulations show that in scenarios with high mobility and high delay tolerance relay nodes can forward up to 70% of the traffic in OpR, 94% in CaF and up to 35% in RaC.*

Resumo. *O paradigma de comunicação dispositivo-a-dispositivo surge como uma abordagem para aliviar o tráfego de dados de prestadores de serviços de Internet móvel. Nas redes D2D, dispositivos de usuário podem ajudar as operadoras a melhorar a cobertura celular, a eficiência do espectro e o descarregamento de dados. Este trabalho discute a viabilidade do descarregamento de dados móveis por meio de redes D2D através de um estudo quantitativo de três aplicações D2D: (i) Opportunistic Relaying (OpR), dispositivos em modo oportunista transmitem suas mensagens de dados para nós retransmissores em vez de enviá-las diretamente para a infraestrutura; (ii) Cache-and-Forward (CaF), nós retransmissores encaminham todos os conteúdos recebidos para todos os nós oportunistas encontrados dentro de um prazo limite; (iii) Relay-as-Cache (RaC), nós oportunistas procuram por um determinado conteúdo no cache dos nós retransmissores. Simulações mostram que em cenários com alta mobilidade e com alta tolerância a atrasos os nós retransmissores podem transmitir até 70% do tráfego de dados na aplicação OpR, 94% na CaF e até 35% na RaC.*

*Os autores gostariam de agradecer à CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro parcial a este trabalho.

1. Introdução

A evolução de diferentes tecnologias utilizadas na Internet possibilitou a criação de novas aplicações, tais como mensagens instantâneas, VoIP e *streaming* de vídeo. Por essa razão, a demanda por maiores larguras de banda tem crescido de forma exponencial a cada ano [Cisco 2015]. Os provedores de Internet têm enfrentado gargalos de tráfego cada vez mais constantes para atender com qualidade aos requisitos de seus usuários. Uma solução para amenizar o problema é mover o tráfego de dados das redes celulares para outras interfaces de comunicação. Esta estratégia é conhecida como Descarregamento de Dados das Redes Móveis (*mobile data offloading*).

Soluções existentes para descarregamento de dados requerem equipamentos especiais ou uma reformulação da rede, o que pode implicar em mudanças significativas em sua infraestrutura. De fato, a indústria e a academia têm procurado realizar o descarregamento de dados provenientes das redes celulares por meio do uso de *femtocélulas* [Haldar et al. 2013], redes Wi-Fi públicas [Mota et al. 2013] e, mais recentemente, redes oportunísticas dispositivo-a-dispositivo (D2D) [Doppler et al. 2009].

No descarregamento oportunístico de dados, um subconjunto dos nós da rede atua como retransmissores para um outro subconjunto, que acessará a rede de forma oportunística por meio destes retransmissores. Por exemplo, em grandes aglomerações (*shows*, eventos esportivos, etc.), dispositivos com conectividade comprometida podem enviar ou obter conteúdo oportunisticamente por meio dos dispositivos retransmissores.

Neste trabalho focamos na análise de cenários em que redes D2D oportunísticas podem realizar o descarregamento de dados provenientes de redes celulares. Para atingir nosso objetivo, implementamos três aplicações, nas quais o descarregamento oportunístico de dados melhora a utilização de recursos da rede:

- (1) *Opportunistic Relaying - OpR*: Nós retransmissores encaminham todas as requisições provenientes de nós oportunistas. Deste modo, nós oportunistas deixam a rede celular, reduzindo assim o tráfego de sinalização [Choi et al. 2014];
- (2) *Cache-and-Forward - CaF*: Nós retransmissores encaminham todo conteúdo recebido para todos os nós oportunistas encontrados dentro de um intervalo de tempo.
- (3) *Relay-as-Cache - RaC*: Um nó oportunista busca por um determinado conteúdo em nós retransmissores com uma tolerância de atraso pré-definida.

Para a seleção dos subconjuntos de nós retransmissores e nós oportunistas, cada aplicação foi analisada utilizando duas estratégias: *Random*, onde os nós são escolhidos aleatoriamente como retransmissores, e *OppLite*, uma ferramenta que utiliza características da rede para decidir quais nós se tornarão retransmissores [Mota et al. 2014].

A principal contribuição deste trabalho é a extensa avaliação quantitativa dos cenários citados acima. Tal avaliação mostra que a tolerância ao atraso, bem como a disposição dos usuários serem retransmissores, são pontos chave para obter altas taxas de descarregamento de dados.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 descreve a arquitetura do sistema, detalhando os algoritmos para seleção de nós retransmissores e cada aplicação desenvolvida. A metodologia das análises é apresentada na Seção 4 e os resultados são discutidos na Seção 5. Por fim, a Seção 6 conclui este trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

No descarregamento oportunista, um subconjunto de dispositivos (ou nós)¹ desempenham o papel de retransmissores entre outros dispositivos e a infra-estrutura. Visando o estabelecimento de comunicação “*ad hoc*” entre dispositivos próximos da rede celular de modo transparente, o consórcio 3GPP propôs o padrão *Device-to-Device Proximity Service (D2D ProSe)* [3GPPP 2013]. *D2D ProSe* reutiliza a interface de rádio LTE para a comunicação entre dispositivos, de modo que a infra-estrutura possa participar na configuração da sessão, na conexão e na criação de rotas entre dispositivos.

A viabilidade da utilização de dispositivos terminais como *cache* foi estudada em [Valerio et al. 2015]. *Valerio et al.* analisaram a probabilidade de encontrar vídeos de usuários do YouTube no *cache* do dispositivo dos usuários. Os autores mostraram que a requisição de vídeo segue uma distribuição de probabilidade Zipf e o *cache* local pode responder até 21% das requisições de outros usuários.

A maioria dos trabalhos relacionados a técnicas de descarregamento oportunista focam na proposta de algoritmos para selecionar nós retransmissores [Rebecchi et al. 2015].

Em [Doppler et al. 2009], os autores focaram nas mudanças necessárias na infra-estrutura celular para implantar comunicação D2D e mostraram que o uso de comunicação D2D pode aumentar a largura de banda dos participantes da rede. No entanto, nesta proposta os nós retransmissores são escolhidos aleatoriamente. Já no *VIP*, proposto em [Barbera et al. 2011], os nós retransmissores são escolhidos baseando-se em métricas sociais, como centralidade, *betweenness* e *Page Rank*. No *VIP*, os nós retransmissores replicam oportunisticamente dados recebidos da infra-estrutura para outros nós. De forma semelhante, um arcabouço com várias estratégias para decidir *quando* e *para quem* um conteúdo deve ser enviado, batizado de *Push-and-Track*, foi proposto em [Whitbeck et al. 2012]. No *Push-and-Track*, o nó retransmissor replica o conteúdo para outros nós da rede. Por fim, o *OppLite* é um arcabouço que considera a disposição do usuário para se tornar um retransmissor ou um nó oportunista com base em um conjunto de propriedades das redes e dos dispositivos [Mota et al. 2014].

Este trabalho difere do estado da arte pois implementa e analisa quantitativamente os diversos cenários de descarregamento de dados móveis propostos na literatura. Desta forma, podemos discutir em quais condições o descarregamento oportunístico é benéfico tanto para o usuário quanto para os provedores de Internet móvel.

3. Arquitetura do Sistema

Para avaliar a viabilidade de descarregamento D2D sob vários cenários de aplicação, desenvolvemos um sistema que nos permite implementar separadamente aplicações e algoritmos para selecionar dispositivos como retransmissor. A Figura 1 retrata a arquitetura desse sistema. Cada aplicação, a qual define as regras de descarregamento, é executada no topo de um algoritmo utilizado para selecionar o nó retransmissor adequado. Por sua vez, cada algoritmo implementa as regras que definem como um nó se torna um retransmissor

¹A nomenclatura *dispositivos* ou *nós* é usada de modo intercambiável ao longo do texto. O primeiro refere-se ao uso ou posse do dispositivo, enquanto *nós* se refere a vértices do grafo formado pela rede.

e qual interface de rede pode ser utilizada pela aplicação. As subseções a seguir detalham cada algoritmo e as aplicações utilizadas na nossa análise.

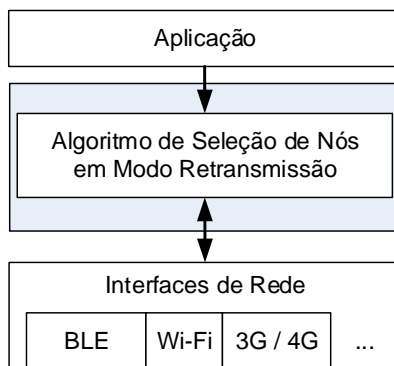


Figura 1. Arquitetura genérica de um sistema de descarregamento de dados.

3.1. Algoritmos de Seleção de Retransmissores

Utilizamos duas estratégias para selecionar nós como retransmissores: *Random* e *OppLite* [Mota et al. 2014]. Na primeira estratégia, os nós retransmissores e os nós oportunistas são escolhidos aleatoriamente, enquanto o *OppLite* realiza a tomada de decisão utilizando múltiplos critérios. Em comum, ambos os algoritmos permitem que o usuário determine sua disposição em se tornar um retransmissor e a tolerância de atraso (τ) suportada pelos nós oportunistas por meio de parâmetros configuráveis.

Sejam $\Gamma_{relay}, \Gamma_{opp} \in [0, 1]$ limiares configuráveis que representam a disposição do usuário para cooperar e se tornar um nó retransmissor ou um nó oportunista, respectivamente. Valores próximos a zero indicam alta cooperação, enquanto valores próximos a um indicam baixa vontade de cooperação com a rede.

3.1.1. *Random* - Seleção Aleatória

No *Random*, os nós retransmissores e oportunistas são escolhidos aleatoriamente. Sejam variáveis aleatórias $X, Y \in [0, 1]$ que seguem uma distribuição uniforme. Um dispositivo torna-se um retransmissor se $X > \Gamma_{relay}$ e oportunista se $Y > \Gamma_{opp}$. A fim de permitir que os nós mudem suas regras e seu modo de operação, o *Random* elege novos valores para X e Y a cada 60 segundos.

3.1.2. *OppLite* - Seleção baseada em multi-critérios

O *OppLite* é um arcabouço de tomada de decisão multi-critério com base na teoria da utilidade, que permite alternar entre os modos de infra-estrutura e oportunista com base apenas nas decisões locais realizadas nos dispositivos [Mota et al. 2014]. O *OppLite* usa o número de vizinhos, a vida útil da bateria e a intensidade do sinal como critérios para tomar a decisão de enviar ou requisitar dados diretamente para a infraestrutura ou por meio de comunicação oportunista.

Cada critério (x) é quantificado por meio da Função sigmoide (1), sendo o centro (x_t) e o grau de inclinação (α) parâmetros do algoritmo. A utilidade multi-critério é obtida pela Equação (2), sendo $w_i \in [0, 1]$ o peso para cada critério e $\sum_i w_i = 1$. No *OppLite*, um dispositivo torna-se um retransmissor se a utilidade agregada $U > \Gamma_{relay}$.

$$u(x) = \frac{1}{1 + e^{\alpha(x_t - x)}} \quad (1)$$

$$U(x_1 \dots x_n) = \prod_{i=1}^n [u(x_i)]^{w_i} \quad (2)$$

3.2. Aplicações de Descarregamento

Desenvolvemos três aplicações para medir a capacidade de descarregamento de dados da rede. Estas aplicações são ilustradas na Figura 2 e descritas nas subseções a seguir.

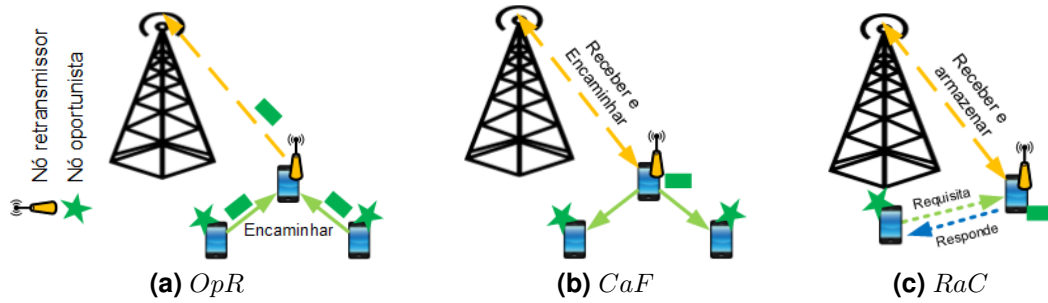


Figura 2. Cenários de aplicação de descarregamento de dados móveis.

3.2.1. Opportunistic Relaying (*OpR*)

Nesta aplicação, mostrada na Figura 2a, os nós oportunistas deixam a infraestrutura da rede para tentar o encaminhar suas mensagens através de nós retransmissores. Após a criação de uma mensagem, um nó encaminha a mensagem com base no seu modo de comunicação. Um nó oportunista tenta enviar a mensagem através de um nó retransmissor. Caso o nó oportunista não encontre um nó retransmissor adequado até um atraso tolerável (τ), ele envia suas mensagens diretamente para a infraestrutura, ou seja, volta para o modo padrão.

Este caso pode representar situações em que nós oportunistas estejam em redes de largura de banda inferior ou congestionadas. Embora nesta aplicação o tráfego ainda seja encaminhado através da rede celular, esta aplicação pode ajudar a aliviar o congestionamento de sinalização. Por exemplo, nas redes participativas de sensores, os dispositivos reúnem dados (usando seus sensores embutidos) e transmitem esses dados para a “nuvem” mantendo constantemente o envio de pequenos pacotes para a rede. Embora a quantidade de dados seja pequena, vários dispositivos enviando pacotes de forma contínua podem causar congestionamento na sinalização [Choi et al. 2014].

3.2.2. Cache-and-Forward (*CaF*)

A arquitetura *Cache and Forward* para roteadores de grande capacidade foi proposta por [Paul et al. 2008]. Consideramos que os dispositivos dos usuários podem atuar como

caches potenciais na rede. Esta aplicação modela aplicações de requisições HTTP, em que os usuários solicitam o conteúdo para a “nuvem”. Esta aplicação pode representar uma atualização de software ou informações enviadas de algum canal, evitando a transmissão de dados redundantes a partir dos provedores de Internet.

A Figura 2b ilustra o funcionamento do *CaF*. Os nós no modo padrão ou no modo retransmissão requisitam conteúdos usando um identificador para cada conteúdo e a “nuvem” responde com o conteúdo solicitado. Os nós retransmissores armazenam o conteúdo em seus respectivos *buffers* e marcam quando o conteúdo foi recebido. No *CaF*, os nós retransmissores encaminham cada conteúdo em seus *buffers* para todos os nós oportunistas encontrados até o tempo de vida do conteúdo expirar, sendo o tempo de vida definido pelo parâmetro τ .

3.2.3. Relay-as-Cache (*RaC*)

O *RaC*, mostrado na Figura 2c, também utiliza os dispositivos retransmissores como *cache* da rede. No *RaC*, nós oportunistas solicitam um conteúdo aos vizinhos retransmissores. Esta aplicação pode ajudar a aliviar o tráfego de dados em situações de multidão onde várias pessoas estão à procura de conteúdo idêntico, tais como torcedores em um jogo de futebol buscando a repetição de um gol [Valerio et al. 2015].

No *RaC*, todos os nós são elegíveis para solicitar conteúdo. Um nó envia mensagens de solicitação contendo a identificação do conteúdo. Nós em modo *padrão* ou *retransmissão* enviam as requisições através da rede celular. Por sua vez, a “nuvem” responde com o conteúdo requisitado. Nós retransmissores armazenam todo o conteúdo recebido em seus *buffers*, funcionando como *cache* de armazenamento, aceitando requisições de nós em modo oportunista.

Um nó oportunista busca um determinado conteúdo no *cache* de nós retransmissores. Esse processo se repete até que algum retransmissor responda ou até que expire a tolerância de atraso máximo definida por τ . Após a tolerância de atraso expirar, *RaC* utiliza a rede infra-estruturada para fazer a requisição. Um *acerto* ocorre quando um nó oportunista encontra o conteúdo solicitado no *cache* do nó retransmissor.

4. Metodologia

Implementamos as aplicações e os algoritmos de seleção de nós retransmissores no *Opportunistic Networking Environment* (ONE) [Keränen et al. 2009]. Estendemos o ONE para suportar redes infra-estruturadas e permitir que o algoritmo *OppLite* tenha acesso às propriedades da rede: sinal da rede celular, a vizinhança do nó e a bateria remanescente.

A aplicação *OpR* visa reduzir o número de nós enviando mensagens diretamente para a infra-estrutura. Já as aplicações *CaF* e *RaC* visam reduzir a utilização da infra-estrutura em solicitações de conteúdo previamente requeridos por um ou mais usuários. Portanto, as aplicações quantificam o número de mensagens entregues de modo oportunista usando a métrica *taxa de descarregamento*:

$$\text{Taxa de descarregamento} = \frac{\# \text{ Msgs Enviadas de forma oportunista}}{\# \text{ Msgs Enviadas de forma oportunista} + \# \text{ Msgs Enviadas pela infra-estrutura}}$$

Exclusivamente no caso da aplicação *CaF*, analisamos o número médio de mensagens enviadas por cada nó retransmissor.

4.1. Configuração

Os nós possuem duas interfaces de comunicação: celular 3G e IEEE 802.11. Os nós podem comunicar diretamente entre si usando a interface IEEE 802.11 em modo “*ad hoc*”. A interface Wi-Fi tem uma taxa de 2Mbps para a comunicação “*ad hoc*”, que é uma taxa compatível com as taxas comuns em redes IEEE 802.11. A interface de rede celular tem uma taxa de 100kBps (de acordo com medições em [Whitbeck et al. 2012]). Cada nó possui 500 MB de espaço em armazenamento. Cada mensagem tem entre 100KB e 1MB de carga útil, representando texto e/ou imagens. Cada teste foi executado 15 vezes e os resultados possuem 95% de intervalo de confiança.

O tempo de geração inter-mensagens ou inter-requisições de cada nó na rede segue uma distribuição Weibull com declividade $k = 21,99$ e escala $\lambda = 1,429$. Além disso, a popularidade do conteúdo é uma métrica importante para mecanismos de *cache*. A solicitação de conteúdos na aplicação *Relay-as-Cache* segue uma distribuição Zipf com expoente $\rho = 1,47$, similar com os resultados apresentados em [Valerio et al. 2015]. A fim de refinar nossas avaliações, utilizamos dois *traces* reais de contatos de rede:

- **INFOCOM**: *trace* de contato de três dias com 20 nós estáticos e 78 usuários voluntários usando iMotes durante a edição de 2006 da conferência INFOCOM [Haggle 2013]. Utilizamos os valores do primeiro dia da conferência, entre 12:00 e 18:00. As aplicações param de gerar mensagens às 17:00, assegurando tempo suficiente para a entrega das mensagens.
- **ROLLERNET**: 62 voluntários carregam iMotes durante a turnê *Pari-Roller*, que reúne milhares de pessoas para patinar pelas ruas de Paris, em 2006 [Tournoux et al. 2009]. Uma vez que este *trace* registra todos os dispositivos Bluetooth ao alcance, ele contém 1112 dispositivos no total. A duração do rastreamento de contato é de cerca de três horas. As aplicações geram mensagens ou requisitam conteúdos entre 30 e 160 minutos.

O conjunto de critérios em *OppLite* foi configurado conforme descrito em [Mota et al. 2014]. Consideramos que o usuário tem alta disponibilidade de se tornar um nó oportunista ($\Gamma_{opp} = 0.01$), pois há vantagens para estes nós, como economia de energia por exemplo. Os parâmetros comuns entre o *OppLite* e o *Random* - a disposição do usuário em se tornar um nó retransmissor (Γ_{relay}) e a tolerância de atraso (τ) - foram combinados usando os seguintes valores:

$$\Gamma_{relay} = [0, 0.2, 0.5, 0.7] \quad \tau = [1, 100, 600, 1200]s$$

5. Análises das Aplicações

Esta seção avalia as aplicações *OpR*, *CaF* e *RaC* com os algoritmos de seleção de nós retransmissores *Random* e *OppLite* descritos na Seção 3. O valor do modo retransmissor (Γ_{relay}) indica a disposição dos nós se tornarem retransmissores. Quando $\Gamma_{relay} = 0$, todos os nós estão dispostos a se tornarem retransmissores e quando $\Gamma_{relay} = 1$ nenhum nó se tornará retransmissor. Nas análises de todas as aplicações, mostramos a tolerância ao atraso utilizando o algoritmo *OppLite* e mostramos uma comparação do mesmo com o *Random*. Deste modo, podemos discutir o impacto da utilização de um algoritmo inteligente em relação à escolha aleatória de nós como retransmissores.

5.1. Análise do *Opportunistic Relaying - OpR*

No *OpR*, os nós oportunistas devem transmitir suas mensagens através de nós retransmissores para reduzir o congestionamento de sinalização na rede infra-estruturada. Se o nó oportunista não encontra um nó retransmissor até uma tolerância de atraso τ , a aplicação encaminha a mensagem para infraestrutura. O descarregamento ocorre toda vez que um nó oportunista encaminha uma mensagem por algum nó retransmissor.

As Figuras 3 e 4 mostram a taxa do descarregamento de dados para valores crescentes de Γ_{relay} com diferentes valores de tolerância de atraso (τ).

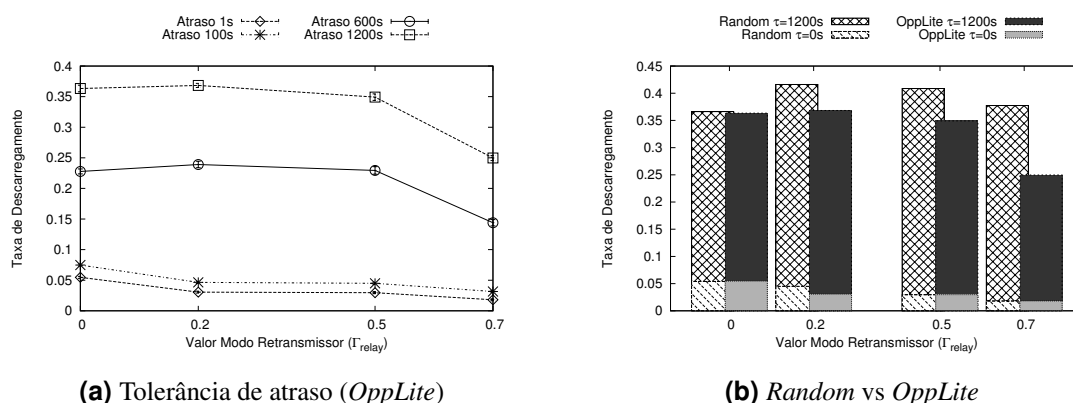


Figura 3. *OpR*: Taxa de descarregamento de dados no cenário INFOCOM

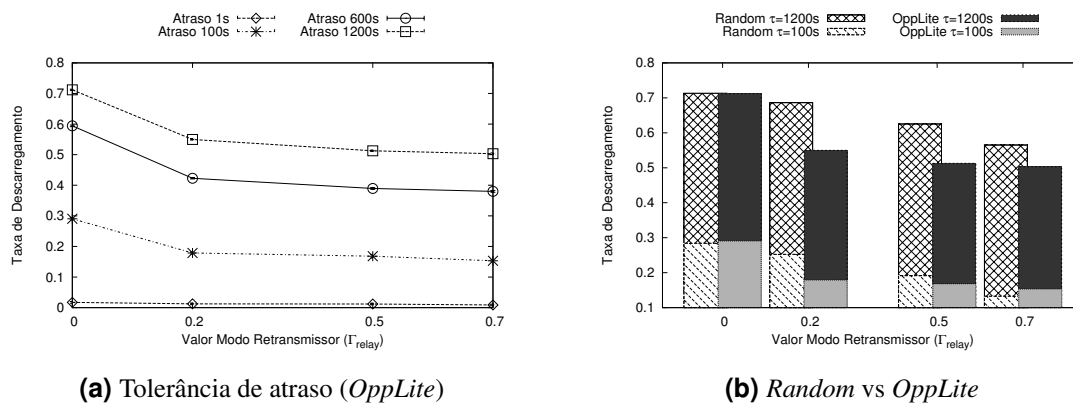


Figura 4. *OpR*: Taxa de descarregamento de dados no cenário ROLLERNET

No cenário INFOCOM, foram criadas 5700 mensagens. A Figura 3a mostra que com a tolerância de atraso igual a zero, o *OpR*, utilizando o *OppLite*, descarrega 6% das mensagens quando todos os nós viram retransmissores ($\Gamma_{relay} = 0$) e 3% quando poucos nós se tornam retransmissores ($\Gamma_{relay} = 0.7$).

A Figura 3b mostra a relação da taxa de descarregamento para uma tolerância de atraso τ de zero e de 1200 segundos (para melhor legibilidade omitimos os outros valores de atraso). Na aplicação *OpR*, *OppLite* e *Random* têm taxa de descarregamento semelhante ($\tau = 0s$), pois os nós oportunistas precisam ter vizinhos retransmissores. Para $\tau = 1200s$, escolher nós retransmissores aleatoriamente tem um melhor desempenho.

No cenário ROLLERNET, apenas os 62 dispositivos pertencentes ao experimento ROLLERNET podem criar mensagens, com isto, foram criadas 2390 mensagens. A Fi-

gura 4a mostra a influência da tolerância de atraso no descarregamento das mensagens. Observamos um comportamento constante para uma tolerância de atraso igual a zero, explicada pelo fato dos nós terem tempo de contato mais curtos em tal cenário. No entanto, até 50% e 65% das mensagens podem ser retransmitidas, quando o *OpR* tolera 600 ou 1200 segundos de atraso, respectivamente, para $\Gamma_{relay} \geq 0.5$.

A Figura 4b mostra o desempenho do *OpR* com os algoritmos *Random* e *OppLite* e tolerância de atraso de 100 e 1200 segundos no cenário ROLLERNET. Neste cenário, quando todos os nós são retransmissores, o *OpR* pode descarregar 74% do tráfego quando a aplicação tolera até 20 minutos de atraso. Ao diminuir a disposição dos nós para se tornarem retransmissores, $\Gamma_{relay} \geq 0.2$, o *Random* tem melhor desempenho pois seleciona um subconjunto maior de nós como retransmissores.

Em ambos os cenários, o descarregamento máximo é obtido quando os nós oportunistas suportam atrasos maiores, pois estes aguardam por um tempo maior um contato com um nó retransmissor. Além disto, diminuir a disposição do usuário em cooperar com a rede de $\Gamma_{relay} = 0$ para $\Gamma_{relay} = 0.7$ causa uma redução média de 30% na taxa de descarregamento de dados.

5.2. Análise do *Cache and Forward* - *CaF*

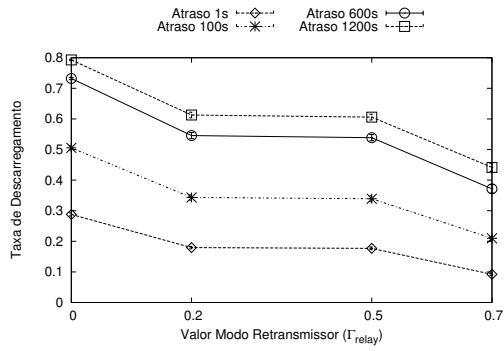
No *CaF*, o descarregamento dos dados ocorre sempre que um retransmissor tem a oportunidade de replicar uma mensagem para nós em modo oportunístico. O *CaF* busca maximizar o encaminhamento de mensagens pelos nós retransmissores.

No cenário do INFOCOM, os nós requisitaram 865 mensagens diretamente à infraestrutura. A Figura 5 mostra a taxa de descarregamento do *CaF* com diferentes valores de tolerância de atraso (τ). No *CaF*, τ representa o TTL (*time-to-live*) de cada mensagem recebida e, com isso, quanto tempo um nó retransmissor encaminha uma determinada mensagem para nós oportunistas. Portanto, valores elevados de τ acarretam em maiores taxas de descarregamento. De fato, como mostrado na Figura 5a, quando todos os nós estão em modo retransmissor ($\Gamma_{relay} = 0$), replicações de mensagem representam de 28% até 79% do tráfego de dados da rede com atrasos de tolerância de 1 e 1200 segundos, respectivamente. A taxa de descarregamento cai para 9% e 44% para $\tau = 1s$ e $\tau = 1200s$, respectivamente, quando $\Gamma_{relay} = 0.7$.

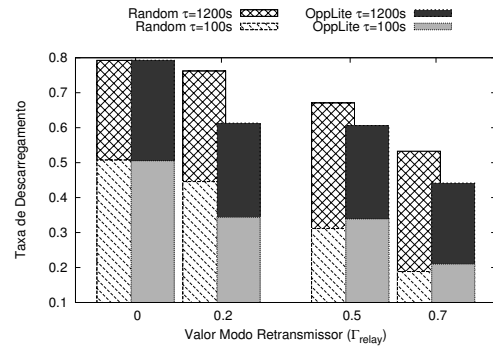
Com o incremento de τ de 1 a 1200 segundos, houve um aumento de 182% na taxa de descarregamento para todos os valores de Γ_{relay} em média. Essa melhoria é de apenas 12% em média ao incrementar τ de 600 para 1200 segundos.

A Figura 5b mostra um comparativo do *CaF* entre os algoritmos *Random* e *OppLite* com 100 e 1200 segundos de tolerância de atraso. O *CaF* com *OppLite* supera a taxa de descarregamento do *Random* quando $\Gamma_{relay} \geq 0.5$ com valores reduzidos de tolerância de atraso.

A Figura 6 mostra a taxa de descarregamento para diferentes valores de τ , bem como uma comparação entre os algoritmos *OppLite* e *Random* no cenário ROLLERNET. Como mostrado na Figura 6a, com $\Gamma_{relay} = 0$ o *CaF* apresenta uma taxa de descarregamento de (51, 88, 94, 95)% para $\tau = \{1, 100, 600, 1200\}s$, respectivamente. É importante ressaltar que a diferença nas taxas de descarregamento para o intervalo entre $\tau = 600s$ e $\tau = 1200s$ é menor ou igual a 1% $\forall \Gamma_{relay}$. Portanto, o *OppLite* quase alcança sua taxa

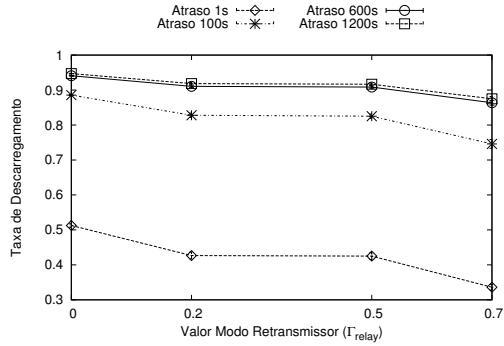


(a) Tolerância de atraso (*OppLite*)

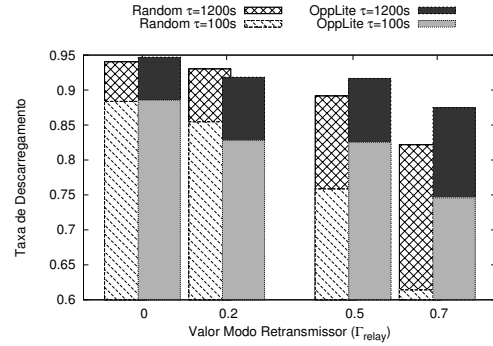


(b) *Random* vs *OppLite*

Figura 5. *CaF*: Taxa de descarregamento de dados no cenário INFOCOM



(a) Tolerância de atraso (*OppLite*)



(b) *Random* vs *OppLite*

Figura 6. *CaF*: Taxa de descarregamento de dados no cenário ROLLERNET

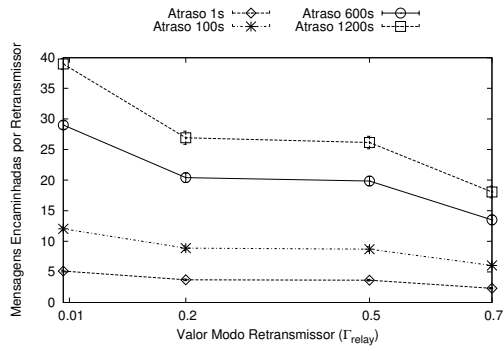
máxima de descarregamento com 10 minutos de tolerância de atraso.

A Figura 6b mostra a comparação de desempenho do *CaF* utilizando o *OppLite* e o *Random*. A escolha de nós baseada em um conjunto de critérios, como realizado pelo *OppLite*, acarreta em um melhor desempenho do que a escolha de um conjunto de nós aleatórios, como realizado no *Random*, em especial para $\Gamma_{relay} \geq 0.5$.

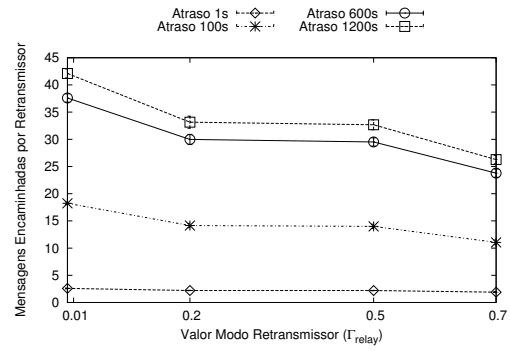
De fato, o *CaF* com *OppLite* apresentou melhor desempenho em cenários com tolerância de atraso reduzida, devido às características do ROLLERNET. Neste *trace*, o *Random* seleciona nós retransmissores que raramente encontrarão nós oportunistas.

A Figura 7 mostra a quantidade de mensagens encaminhadas por nós retransmissores nos cenários INFOCOM e ROLLERNET. No INFOCOM, Figura 7a cada nó retransmissor replicou de 4 ($\tau = 1s$) a 30 ($\tau = 1200s$) mensagens distintas em média. Já no *trace* ROLLERNET, cada nó encaminha de 2 a 35 mensagens distintas, $\tau = 1$ e $\tau = 1200$ (Figura 7b). A base de dados ROLLERNET provê mais oportunidades de contato e, como consequência, os nós retransmissores podem encaminhar suas mensagens com mais frequência do que no cenário com a base de dados INFOCOM.

Em ambos os cenários, o número de mensagens encaminhadas para todo valor de Γ_{relay} é quase constante quando a tolerância de atraso é reduzida. Neste caso, as replicações de uma mensagem são definidas pelo tamanho dos componentes conectados



(a) INFOCOM



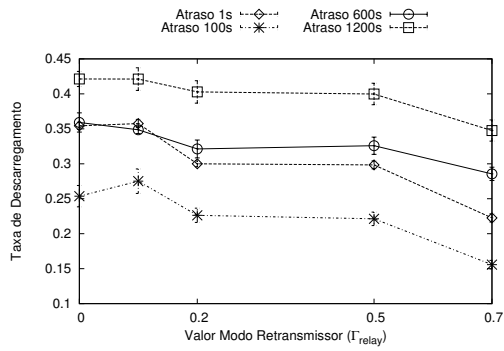
(b) ROLLERNET

Figura 7. *CaF*: Média de mensagens encaminhadas por nós retransmissores.

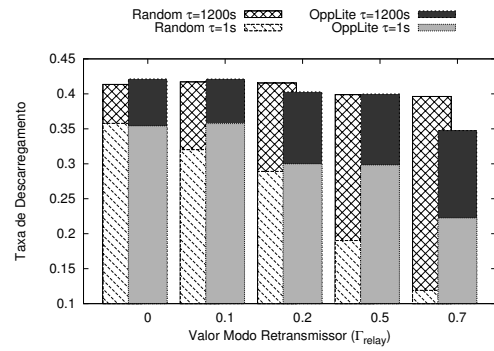
ao qual o nó retransmissor pertence. Já valores elevados de τ permitem que os nós repliquem mensagens por mais tempo.

5.3. Análise do *RaC*

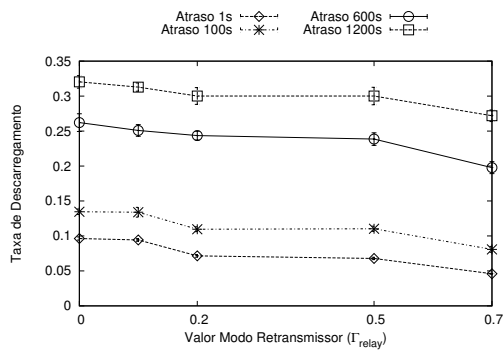
O *RaC* representa uma aplicação de requisição HTTP, na qual todos os nós requisitam conteúdo. Entretanto, a quantidade de conteúdo disponível para requisição, aqui referenciada como *pool size* (S), foi limitada em $S = [100, 10000]$ conteúdos distintos. Cada conteúdo tem uma chave de identificação e os nós escolhem uma chave seguindo uma distribuição Zipf, com isso, algumas chaves são requisitadas com maior frequência.



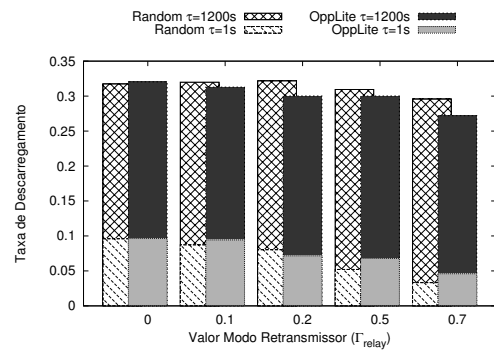
(a) Tolerância de atraso. $S = 100$.



(b) *Random vs OppLite*. $S = 100$.



(c) Tolerância de atraso. $S = 10000$.



(d) *Random vs OppLite*. $S = 10000$.

Figura 8. *RaC*: Taxa de descarregamento de dados no cenário INFOCOM.

No *RaC*, a tolerância de atraso (τ) significa quanto tempo um nó oportunista aguarda até encontrar o conteúdo desejado no *cache* de um nó retransmissor. Após essa tolerância de atraso, os nós oportunistas requisitam o conteúdo utilizando a infraestrutura. Além disso, os nós oportunistas requisitam apenas um conteúdo até obter uma resposta, oportunisticamente ou diretamente da infraestrutura.

Os resultados no *trace* INFOCOM são mostrados na Figura 8. Quando há somente 100 conteúdos disponíveis para baixar (Figura 8a), *RaC* apresenta uma taxa de descarregamento de até 42% do tráfego se nós oportunistas suportarem 1.200 segundos de tolerância de atraso e $\Gamma_{relay} = 0$ ou 34% se $\Gamma_{relay} = 0.7$. Neste cenário, o *RaC* apresenta uma taxa de descarregamento de 22% a 35% do tráfego quando $\tau = 1s$, pois quanto menor a tolerância ao atraso, maior a probabilidade de nós vizinhos possuírem o conteúdo. A Figura 8b mostra um comparativo do *RaC* utilizando os algoritmos *Random* e *OppLite* com tolerância de atraso de 1 e 1200 segundos. O *RaC* com *OppLite* supera a solução com *Random* em 1 segundo de tolerância quando $\Gamma_{relay} \geq 0.1$.

Quando a lista de conteúdo aumenta, a taxa de descarregamento decai, como pode ser visto nas figuras 8c-d. O algoritmo *Random* mantém a taxa de descarregamento de dados quase constante quando $\tau = 1200s$, devido ao número elevado de nós selecionados como retransmissores. O *RaC* com *OppLite* atinge uma taxa de descarregamento maior quando os nós oportunistas possuem baixa tolerância de atraso.

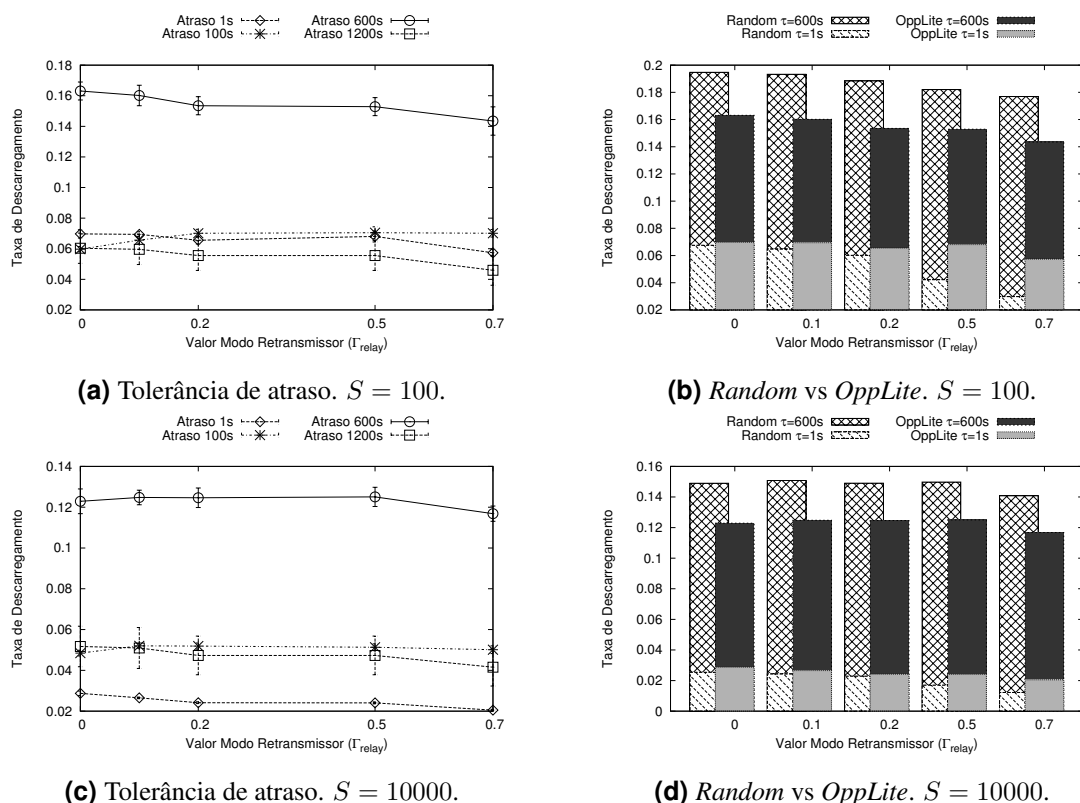


Figura 9. *RaC*: Taxa de descarregamento de dados no cenário ROLLERNET.

A Figura 9 mostra as taxas de descarregamento avaliadas no ROLLERNET. A melhor taxa de descarregamento foi obtida com uma tolerância de atraso de 600 segundos. Com $\tau = 600s$, o *RaC* apresenta uma taxa de descarregamento de até 17% do tráfego de

dados da rede no melhor caso (Figura 9a) e 12% no pior caso (Figura 9c). Neste cenário, as baixas taxas de descarregamento obtidas por $\tau = 100s$ e $\tau = 1200s$ são devidos à duração da simulação e às características do *trace*. Como mencionado, um nó oportunista faz somente uma requisição por vez, tolerar $\tau = 1200s$ faz com que os nós aguardem muito tempo (40% do tempo simulado) antes de requisitar novos conteúdos.

O *RaC* com *OppLite* apresentou taxas de descarregamento 10% menores do que com *Random* com $\tau = 600s$ no *trace* ROLLERNET, Figuras 9b e 9d, e igual ou maior do que *Random* quando $\tau = 1s$. Como mencionado anteriormente, o algoritmo *Random* seleciona mais nós do que o *OppLite* no *trace* ROLLERNET.

Apesar do *trace* ROLLERNET conter 1112 nós, apenas 62 nós estão ativos durante todo tempo de vida da rede, o que diminuiu a taxa de descarregamento quando comparado com o *trace* INFOCOM.

6. Conclusões

Neste artigo, apresentamos e discutimos três aplicações para avaliar o descarregamento de dados móveis utilizando o paradigma de comunicação dispositivo para dispositivo: (i) *Opportunistic Relaying (OpR)*, nós oportunistas transmitem suas mensagens para a infra-estrutura através de nós intermediários; (ii) *Cache-and-Forward (CaF)*, os nós retransmissores encaminham todo o conteúdo que recebem para os nós oportunistas; e (iii) *Relay as Cache (RaF)*, os nós oportunistas procuram por conteúdo no *cache* dos nós retransmissores.

Na aplicação *OpR*, observamos que os nós retransmissores podem transmitir até 35% do tráfego em um cenário de conferência com um atraso de menos de 20 minutos. Em um cenário representando uma multidão em movimento nas ruas de Paris, os nós retransmissores podem transmitir até 70% do tráfego. A aplicação *CaF* descarrega entre 30% e 80% do tráfego de dados no INFOCOM e entre 52% e 94% do tráfego de dados no ROLLERNET com um atraso de 20 minutos. A aplicação *RaC* descarrega entre 32% e 44% do tráfego de dados quando os nós oportunistas toleram 20 minutos de atraso no INFOCOM. Enquanto isso, no *trace* ROLLERNET, o *RaC* descarrega entre 7% a 17% com 10 minutos de atraso.

Essas avaliações mostraram o potencial do uso de dispositivos pessoais como *cache* para descarregar o tráfego de dados de celular para rede oportunista com um atraso pequeno. Observamos que há um compromisso entre o número de nós retransmissores e a quantidade de mensagens descarregadas: quanto maior o número de nós retransmissores, mais alta é a taxa de descarregamento de dados. Contudo, isso requer a disposição dos usuários para mudar seu dispositivo para o modo de retransmissão.

Além disso notamos que, para todos os cenários e aplicativos, o atraso de entrega aceitável de uma aplicação pode limitar a quantidade de mensagens descarregadas. Por exemplo, aplicações de sensoriamento participativo suportam 20 minutos de atraso antes de enviar os dados. Por outro lado, os usuários podem necessitar de atraso inferior para enviar um e-mail.

Estas descobertas podem ajudar a comunidade de pesquisa a focar o desenvolvimento de algoritmos que tentam maximizar a taxa de descarregamento enquanto minimizam o atraso dos dispositivos no modo oportunista.

Referências

- 3GPPP (2013). Study on architecture enhancements to support proximity services (prose) (release 12). Report 23.703 V0.4.1, 3rd generation partnership project.
- Barbera, M. V., Stefa, J., Viana, A. C., De Amorim, M. D., and Boc, M. (2011). Vip delegation: Enabling vips to offload data in wireless social mobile networks. In *Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*, pages 1–8. IEEE.
- Choi, Y., Yoon, C.-h., Kim, Y.-s., Heo, S. W., Silvester, J., et al. (2014). The impact of application signaling traffic on public land mobile networks. *Communications Magazine, IEEE*, 52(1):166–172.
- Cisco (2015). Global mobile data traffic forecast update, 2014-2019.
- Doppler, K., Rinne, M., Wijting, C., Ribeiro, C., and Hugl, K. (2009). Device-to-device communication as an underlay to lte-advanced networks. *Communications Magazine, IEEE*, 47(12):42–49.
- Haggle (2013). *Haggle Project*. Haggle. <http://www.haggleproject.org>.
- Haldar, K. L., Li, H., and Agrawal, D. P. (2013). A cluster-aware soft frequency reuse scheme for inter-cell interference mitigation in lte based femtocell networks. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pages 1–6. IEEE.
- Keränen, A., Ott, J., and Kärkkäinen, T. (2009). The one simulator for dtn protocol evaluation. In *Conference on Simulation Tools and Techniques*, pages 1–10.
- Mota, V. F., Macedo, D. F., Ghamri-Doudanez, Y., and Nogueira, J. (2014). Managing the decision-making process for opportunistic mobile data offloading. In *Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2014 IEEE*, pages 1–8. IEEE.
- Mota, V. F. S., Macedo, D. F., Ghamri-Doudane, Y., and Nogueira, J. M. S. (2013). On the feasibility of wifi offloading in urban areas: The paris case study. In *IFIP Wireless Days conference*.
- Paul, S., Yates, R., Raychaudhuri, D., and Kurose, J. (2008). The cache-and-forward network architecture for efficient mobile content delivery services in the future internet. In *Innovations in NGN: Future Network and Services*, pages 367–374. IEEE.
- Rebecchi, F., Dias de Amorim, M., Conan, V., Passarella, A., Bruno, R., and Conti, M. (2015). Data offloading techniques in cellular networks: A survey. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 17(2):580–603.
- Tournoux, P., Leguay, J., Benbadis, F., Conan, V., De Amorim, M., and Whitbeck, J. (2009). The accordion phenomenon: Analysis, characterization, and impact on dtn routing. In *IEEE INFOCOM*, pages 1116–1124.
- Valerio, L., Abdesslemly, F. B., Lindgreny, A., Bruno, R., Passarella, A., and Luoto, M. (2015). Offloading cellular traffic with opportunistic networks: a feasibility study. In *14th Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*, pages 1–8. IEEE.
- Whitbeck, J., Lopez, Y., Leguay, J., Conan, V., and Amorim, M. (2012). Push-and-track: Saving infrastructure bandwidth through opportunistic forwarding. *Pervasive and Mobile Computing*, 8(5):682 – 697.