

Controle de Congestionamento em Redes De Dados Nomeados Baseado na Supressão Dinâmica de Nós em Cenários de Mobilidade

André L. R. Madureira^{1,2}, Leobino N. Sampaio¹

¹Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PGCOMP)
Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Salvador – BA – Brasil

{andre.romano, leobino}@ufba.br

²Departamento de Análise e Desenvolvimento de Sistemas
Instituto Federal da Bahia (IFBA) – Valença – BA – Brasil

{andre.madureira}@ifba.edu.br

Resumo. *Redes sem fio estão sujeitas a elevados níveis de congestionamentos. Este problema é intensificado em redes wireless adhoc, dada a sua natureza multi-hop. Existem soluções que mitigam este problema (i.e., controle de acesso ao meio, controle de fluxo de pacotes, cache de conteúdo, agregação de pacotes redundantes), porém estas são ineficientes em meios compartilhados. Desta forma, propomos a estratégia de controle de congestionamento para redes de dados nomeados ITCC, baseada em supressão dinâmica de nós. Esta solução seleciona os nós encaminhadores de pacotes, de forma a reduzir a quantidade de transmissões de pacotes redundantes. Os resultados do ITCC indicam que a solução complementa de forma satisfatória o funcionamento das redes NDN, sendo eficaz tanto na mitigação de congestionamentos, quanto na otimização da entrega de pacotes de dados NDN.*

Abstract. *Wireless networks are subject to high levels of congestion. This problem is intensified in adhoc wireless networks, given their multi-hop nature. There are solutions that mitigate this problem (i.e., medium access control, packet flow control, in-network caching, redundant packet aggregation), but these are inefficient on shared media. Therefore, we propose ITCC, a congestion control strategy for named-data network based on dynamic node suppression. This solution chooses forwarding nodes in order to reduce the number of redundant packet transmissions. The results of ITCC indicate that the solution complements the functioning of NDN networks, being effective both in mitigating congestion and in optimizing the delivery of NDN data packets.*

1. Introdução

Redes móveis sem fio estão sujeitas a elevados níveis de congestionamentos, associados principalmente ao meio compartilhado, sobretudo em cenários de mobilidade ad hoc, devido a sua natureza de transmissão múltiplos saltos. Tanto os protocolos tradicionais de controle de acesso ao meio (i.e., CSMA, ALOHA, TDMA) quanto o controle de congestionamento em camadas superiores (i.e., TCP, SCTP), em geral, não consideram a

topologia das redes, mobilidade dos nós, características das aplicações, e a quantidade de saltos necessários para a entrega efetiva de dados.

A arquitetura das Redes de Dados Nomeados (do inglês, *Named-Data Networking* - NDN) [Zhang et al. 2014, Sampaio et al. 2021] apresenta novas propriedades que permite a mitigação do tráfego de camada 2 em cenários de mobilidade a partir da agregação de pacotes de Interesse, cache oportunístico, estratégias de encaminhamento baseadas na classificação de Faces e uma semântica mais rica na nomeação de pacotes. O problema, contudo, é que os atuais protocolos de camada 2 (i.e., Ethernet) seguem o mesmo modelo de comunicação do IP, o que não permite explorar todo o potencial da arquitetura.

Na comunicação através da NDN, a agregação de pacotes minimiza congestionamentos ao evitar pacotes redundantes através da Tabela de Interesses Pendentes (PIT) e cache oportunístico [Zhang et al. 2014]. O problema, contudo, é que tais estratégias de redução de tráfego não evitam a transmissão de quadros (*frame*) no meio físico compartilhado, resultando, assim, em colisões. A NDN também pode utilizar técnicas de supressão de pacotes baseadas em *backoff-timer*, que mitigam congestionamentos através do descarte de pacotes redundantes que chegam ao nó dentro de uma janela de tempo pré definida [Afanasyev et al. 2021]. Contudo, estes conjuntos de soluções tem limitações semelhantes às técnicas de agregação de pacotes, uma vez que a supressão de pacotes ocorre após os *frames* serem recebidos pelo nó, ponto em que as colisões L2 podem já ter acontecido. Uma alternativa para este problema consiste no ajuste dinâmico da potência de transmissão da NIC que busca reduzir interferências de co-canais em redes sem fio, reduzindo a alcance da NIC [Xu et al. 2016]. No entanto, a redução da potência de transmissão afeta as comunicações NDN do nó como um todo, o que poderia beneficiar algumas aplicações finais, enquanto prejudica outras. Nesse sentido, a semântica de nomeação da NDN aliada a dados dos enlaces de comunicação podem contribuir para melhores estratégias de redução de tráfego a partir de técnicas de controle de congestionamento mais eficazes e utilizadas com base nas características das aplicações.

Diante deste contexto, este trabalho apresenta a estratégia ITCC (i.e., *In-Band Telemetry for Congestion Control in Named Data Networking*), que através de dados de telemetria em banda e semântica dos nomes da NDN faz a supressão dinâmica de nós encaminhadores de conteúdo NDN para promover o controle de congestionamento em cenários de comunicação sem fio e multiacesso. A semântica dos nomes permite que o controle de congestionamento seja definido de acordo com as aplicações e o monitoramento permanente faz com que a solução seja adaptada de acordo com as condições da rede. Deste modo, a ITCC é uma solução distribuída, composta por uma estratégia de encaminhamento baseada em Telemetria em Banda (INT), capaz de escolher quais nós de uma rede ad hoc participam de uma comunicação multi-hop. Assim, a ITCC usa estatísticas de entrega de pacotes, coletadas por cada nó vizinho e compartilhadas entre eles para encontrar o subconjunto K ideal. Para isso, um algoritmo guloso heurístico utiliza essas informações para tomada de decisões de encaminhamento locais e, assim, escolher quais nós vizinhos devem encaminhar pacotes NDN. Cada prefixo e cada nó possui sua própria tabela de estatísticas, o que fornece alta granularidade para as decisões de encaminhamento.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 descreve as abordagens de controle de congestionamento propostas na literatura, enquanto que a pro-

posta é apresentada em detalhes na Seção 3. Os experimentos e resultados são discutidos nas Seções 4 e 5, respectivamente. Por fim, o trabalho é concluído na Seção 6.

2. Redução de tráfego L2 em Redes Ad Hoc Sem fio através da NDN

Na literatura existem diferentes propostas visando o controle de congestionamento em redes Wi-Fi. Os protocolos de controle de acesso ao meio (MAC) visam mitigar o congestionamento em meios compartilhados através da detecção do uso do meio compartilhado e randomizando o início das transmissões de pacotes (e.g., CSMA/CA) [Winston 1985], do controle do uso de recursos (e.g., TDMA, FDMA), ou do controle de quais nós usam o meio em um determinado momento (e.g., *token passing, polling*) [Shinder 2001]. Em geral, tais soluções não conseguem evitar colisões ocasionadas pela transmissão simultânea de dois ou mais nós de rede, nem detectam transmissões de nós distantes (i.e., *hidden-node problem*). Já a reserva de recursos para cada nó da rede reduz o desempenho de entrega de pacotes, pois nem todo nó precisa transmitir dados (i.e., *radio silence problem*) e cada um deles têm aplicações diferentes, com requisitos distintos. Por fim, soluções baseadas em endereçamento MAC não conseguem mitigar simultaneamente o congestionamento da rede e minimizar o atraso na entrega em redes de conteúdo, pois elas não possuem meios de avaliar o atraso na entrega de protocolos de camadas superiores.

No que diz respeito à NDN, a maioria dos trabalhos da literatura explora as estratégias de encaminhamento, pois elas operam no plano de dados da rede, sendo capazes de escolher se um determinado pacote de Interesse deve ser encaminhado (i.e., *drop/forward*), por quais Faces NDN ele será enviado (e.g., *Internal Socket, NIC*), e quando esse envio será realizado (i.e., *delayed forwarding*) (e.g., *BestFace, NCC* [Afanasyev et al. 2021], *ASF* [Lehman et al. 2016]). O princípio da escolha de Faces se baseia na premissa que existem diferentes caminhos pelos quais um pacote pode seguir, sendo cada Face associada a uma interface de rede conectada a um meio dedicado guiado. Contudo, em redes ad hoc sem fio, o meio é compartilhado, assim, a escolha de uma Face em detrimento de outra não mitiga congestionamentos. Ou seja, independente da Face escolhida, o pacote será encaminhado pelo mesmo meio compartilhado para todos os nós wireless da rede (i.e., redes wireless não possuem caminhos bem definidos). Além disso, nós sem fio podem possuir apenas uma NIC, o que reduz o problema da escolha de Faces à escolha de descartar ou encaminhar pacotes para a Face de saída padrão (e.g., *WLAN0*).

Mais recentemente, protocolos de roteamento têm sido explorados na mitigação de congestionamentos de rede a partir do fornecimento dinâmico de informações sobre a alcançabilidade de prefixos de conteúdos. Em tais soluções, o protocolo de roteamento fornece a lista de Faces ordenada por uma métrica de roteamento para que estratégias de encaminhamento realizem a tomada de decisão (i.e., *drop, forward*). Entre essas abordagens, destacam-se as que se baseiam em algoritmos de vetor de distância (*Distance Vector*) [Brito et al. 2022] ou estado de enlace *Link State* [Wang et al. 2018]. Em ambos os casos, existe um tempo de convergência para que o protocolo possa estabelecer com precisão a alcançabilidade dos prefixos NDN e o ranqueamento das Faces. Esse tempo de convergência torna as soluções baseadas em roteamento ineficazes para fins de mitigação de congestionamentos em cenários com alta mobilidade. Nessas redes, a topologia e qualidade dos enlaces sofrem constantes alterações, tornando o tempo de convergência dos protocolos de roteamento demasiadamente longo.

3. Controle de Congestionamento Baseado na Supressão de Nós

3.1. Visão geral

Motivado pelas discussões apresentadas nas seções anteriores, este trabalho apresenta a estratégia ITCC (i.e., *In-Band Telemetry for Congestion Control in Named Data Networking*), que através de dados de telemetria em banda faz a supressão dinâmica de nós encaminhadores de conteúdo NDN para promover o controle de congestionamento em cenários de comunicação sem fio e multiacesso. A ITCC se baseia na hipótese de que existe um número ideal de nós encaminhadores (K) dentro de uma rede NDN ad hoc sem fio, capazes de mitigar perdas de pacotes (L) e melhorar o atraso na entrega de pacotes de Dados (D) para um prefixo de conteúdo específico (P), dado que $K < F$, onde F é o total de nós encaminhadores da rede, conforme formalizado na Equação 1.

$$\begin{aligned} \exists K(P) < F, \quad D(K(P)) \leq D(F) \\ L(K(P)) < L(F) \\ K, F \in \mathbb{N}^* \end{aligned} \tag{1}$$

A NDN é um sistema distribuído, onde cada nó comunicante possui um objetivo local. Como as redes ad hoc não possuem uma infraestrutura fixa (i.e., não possuem pontos de acesso), nós encaminhadores são responsáveis pela comunicação entre os consumidores e os produtores, seguindo uma abordagem multi-hop, que aumenta a taxa global de entrega de conteúdos através da entrega multicast e cache oportunístico. Contudo, conforme discutido anteriormente, tamanha redundância resulta em maiores congestionamentos na rede. Quanto maior o número de nós encaminhadores envolvidos, maior será o número de pacotes redundantes transmitidos na rede e, por consequência, maior a probabilidade de colisões durante a transmissão de *frames* nos enlaces de comunicação.

O controle de congestionamento da ITCC é alcançado através da seleção dos nós encaminhadores ótimos (K) para cada fluxo de pacotes, definidos pelos prefixos (P) de conteúdo dos produtores. Para isso, cada nó da rede coleta estatística de entrega para cada prefixo localmente, e compartilha algumas dessas métricas com os seus vizinhos. Dotados dessas informações, cada nó analisa as estatísticas dos seus vizinhos para escolher qual deles deve processar o Interesse e encaminhá-lo para o restante da rede. Os encaminhadores que não são selecionados devem descartar o pacote, a fim de evitar colisões decorrentes de pacotes redundantes.

A telemetria da ITCC é realizada através do componente *Link Service*, que faz a coleta de estatísticas de entrega de pacotes armazenadas oportunisticamente nos pacotes de Interesses e Dados em trânsito na rede. Para isso, uma *tag* embute as estatísticas coletadas no formato de metadados, sem alterar nenhum outro campo (ver Figura 1). Ou seja, ITCC não faz quaisquer alterações na arquitetura padrão da NDN e, portanto, torna-se, compatível com nós que não utilizam o controle de congestionamento proposto, bastando apenas ignorar a *tag* ITCC do pacote recebido. Além da compatibilidade com outros nós, o compartilhamento de estatísticas entre os nós vizinhos apresenta uma sobrecarga mínima. A partir das estatísticas coletadas e armazenadas localmente, cada nó realiza sua decisão de encaminhamento de acordo com o prefixo do conteúdo em questão. Para isso, um algoritmo guloso é utilizado considerando a probabilidade do *frame* chegar ao

produtor, através de um conjunto de nós vizinhos e, conseqüentemente, fazer o pacote de Dados retornar ao consumidor que o solicitou através do caminho reverso ao utilizado pelo Interesse.



Figura 1. Pacotes NDN com *INT tag* do ITCC.

3.2. Telemetria Em Banda para Coleta de Estatísticas

O ITCC coleta estatísticas (métricas) e realiza a tomada de decisões de encaminhamento (*drop* ou *forward*) através de duas etapas. A primeira consiste em um Intervalo de Tempo de Aprendizado (ITA), no qual os nós calculam suas próprias estatísticas de entrega de Dados, e os pacotes são encaminhados utilizando o *pipeline* de encaminhamento padrão da NDN (i.e., encaminhamento *broadcast* para todos os nós, sem interferências na decisão de encaminhamento por parte do ITCC). Na segunda etapa, o algoritmo guloso passa a tomar decisões de encaminhamento locais com base nos dados armazenados e coletados dos nós vizinhos. Essa fase de tomada de decisões perdura por um Intervalo de Tempo de Decisão (ITD), que pode ser diferente ou igual ao ITA. Dessa forma, cada nó de rede intercala entre o aprendizado dos melhores nós vizinhos, e a escolha desses nós para o encaminhamento dos próximos Interesses.

Durante o ITA, os pacotes são encaminhados normalmente, e cada nó da rede calcula suas próprias estatísticas de entrega de Dados para cada prefixo de conteúdo, conforme os Interesses são satisfeitos pelos pacotes de Dados. Essas informações são armazenadas dentro de uma entrada da estrutura de dados *Measurements Table* (*meInfo*), presente na arquitetura padrão da NDN, conforme ilustrado na Figura 2.

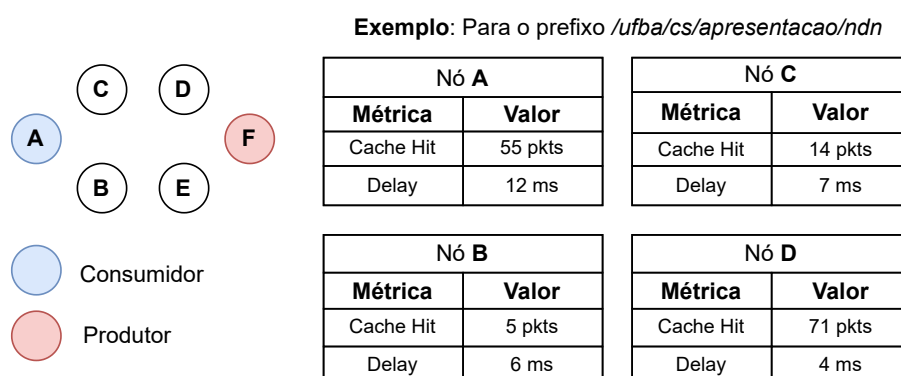


Figura 2. Exemplo de estatísticas de entrega armazenados na *meInfo* dos nós.

Após o intervalo de tempo estabelecido pelo ITA, os consumidores da rede passam a encaminhar Interesses com algumas instruções armazenadas no *tag* ITCC do pacote, o que dá início à fase de tomada de decisões ITCC que perdura pelo intervalo de tempo ITD. As instruções definidas pelos consumidores determinam qual métrica deve ser compartilhada por todos os nós da rede para o prefixo definido pelo nome do pacote

Interesse que contém essas instruções. O consumidor também informa uma política de encaminhamento que deve ser adotada por todos os nós cientes do ITCC. Essa política é constituída de uma tupla (métrica, critério) que determina qual métrica deve ser usada para a seleção dos nós que irão encaminhar o pacote de Interesse, e qual critério de seleção (*threshold*) deve ser adotado para a escolha desses nós, conforme ilustrado na Figura 3. Após a recepção dessas instruções, cada nó da rede passa a compartilhar as suas métricas, definidas pelo ITCC, com os seus vizinhos, conforme Figura 4.

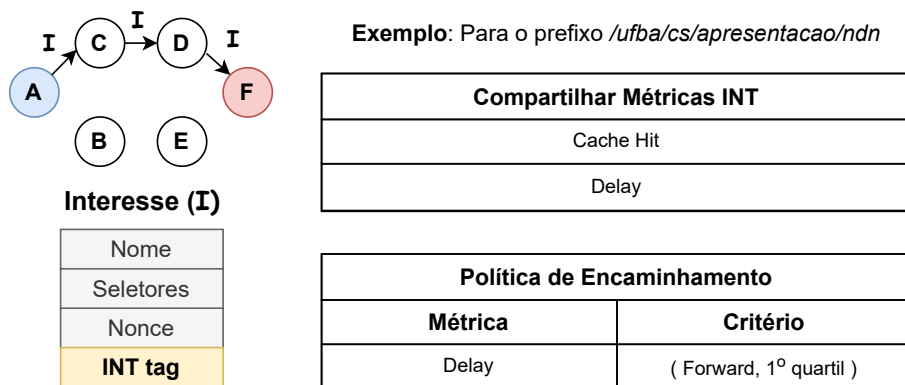


Figura 3. Exemplo de envio de instruções ITCC.

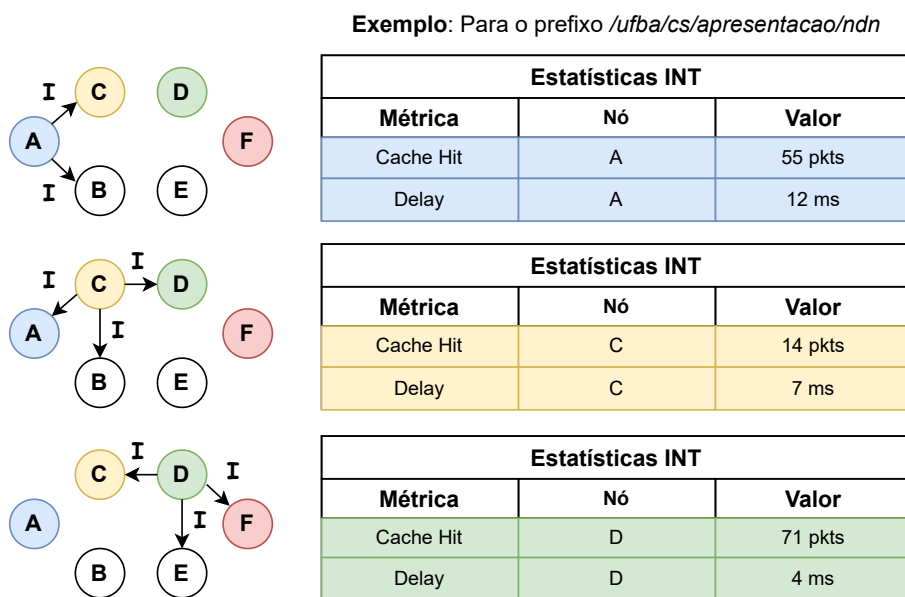


Figura 4. Exemplo de compartilhamento de estatísticas ITCC.

O algoritmo guloso de decisão de encaminhamento de cada nó é configurado com a política de encaminhamento definida pelo consumidor. A partir desse instante de tempo, cada nó começa a tomar suas próprias decisões de encaminhamento locais, baseadas na política de encaminhamento e em todas as estatísticas armazenadas na *meInfo*, conforme ilustrado na Figura 5. A *meInfo* contém as estatísticas do nó atual, bem como os dados coletados dos nós vizinhos oportunisticamente. Isto é, quando cada nó encaminha um Interesse, ele armazena dentro dele a métrica definida pelo consumidor nas instruções

ITCC. Como o meio é compartilhado, todos os nós vizinhos recebem esse Interesse e armazenam essa métrica na *meInfo*, facilitando o compartilhamento de estatísticas entre nós próximos.

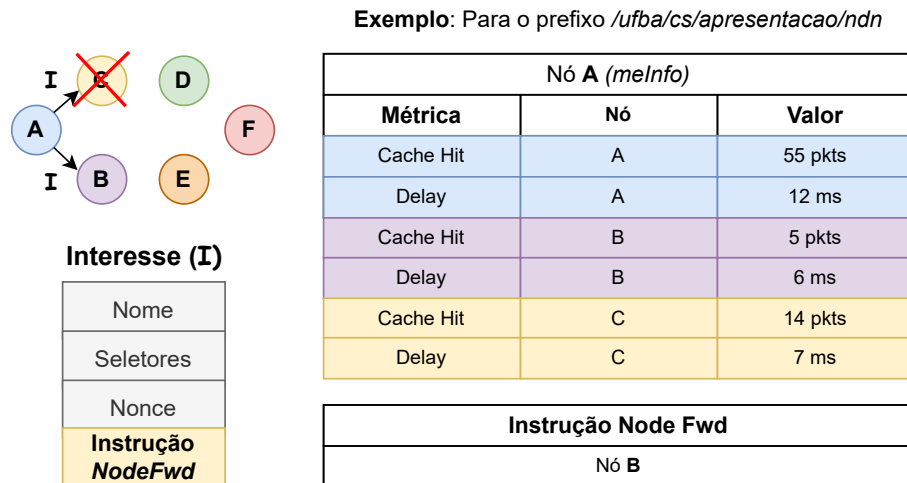


Figura 5. Exemplo de decisão de encaminhamento do ITCC. O nó *A* envia o interesse *I* com uma instrução *NodeFwd*, que instrui quais nós vizinhos devem encaminhar o pacote *I*. Como o *delay* de *C* não pertence aos 25% melhores nós (1º quartil), ele não está contido nessa instrução. Logo, quando *C* recebe o pacote *I*, ele o descarta.

3.3. Métricas de desempenho

O ITCC pode ser configurado pelo consumidor para encontrar os K ótimos encaminhadores a partir de múltiplas métricas de rede relacionadas aos pacotes de Interesse e de Dados recebidos na comunicação, tais como *Cache Hit*, *Cache Miss*, *Delay*, dentre outros. A partir dos dados apresentados por tais métricas, o processo de tomada de decisão consiste na escolha dos K ótimos encaminhadores com base em limiares (*thresholds*) que variam de acordo com a aplicação. Portanto, o ITCC permite a adoção de múltiplos critérios para as métricas, o que define políticas locais de encaminhamento. Neste trabalho, o processo de tomada de decisão foi definido empiricamente a partir de experimentos em ambiente simulado, nos quais os seguintes *thresholds* foram avaliados: i) 0º Quartil – seleciona o melhor vizinho de acordo com a métrica ITCC previamente definida na política de encaminhamento, ii) 1º Quartil – seleciona os 25% melhores nós vizinhos, iii) 3º Quartil – seleciona os 75% melhores nós vizinhos, e iv) 4º Quartil – seleciona todos os nós vizinhos.

4. Experimentos

4.1. Validação da hipótese

Para validar a hipótese da existência de um subconjunto K ideal com F nós encaminhadores, conduzimos experimentos comparando três cenários: i) multi-hop com todos os nós encaminhadores ativos ($K = F$), ii) multi-hop com uma seleção manual dos potenciais melhores nós encaminhadores ($K < F$), e iii) single-hop, na qual apenas consumidores e produtores estão ativos ($K = 0$). Nos dois primeiros cenários, definimos uma rede ad hoc

com um produtor, dois consumidores e sete nós encaminhadores, sendo que no primeiro cenário todos os sete encaminhadores participam das comunicações. No segundo cenário, apenas dois encaminhadores foram manualmente escolhidos para participar da rede. Por fim, no terceiro cenário adotamos a mesma topologia estática dos dois primeiros, sendo que apenas os nós consumidores e produtores estão ativos na rede (i.e., a NIC dos demais nós foi desativada).

O modelo de mobilidade estático (*Static*) utilizado em todos os cenários foi construído através do BonnMotion 3.0.1 [Aschenbruck et al. 2010], no qual os nós foram posicionados aleatoriamente dentro de um mapa de tamanho 100x100 m². Comparamos os resultados obtidos para avaliar se existe um K ótimo, tal que $K < F$, e se tal rede adhoc multi-hop consegue melhorar o delay na entrega de pacotes de Dados quando comparada a uma rede single-hop com mesma topologia. Os experimentos foram conduzidos no ambiente de simulação ndnSIM 3.30.1 [Mastorakis et al. 2017], simulador de eventos discretos oficial do projeto NDN, no qual configuramos um conjunto de dispositivos sem fio ad hoc usando tecnologia de link sem fio 802.11g. Tabela 1 fornece um resumo dos parâmetros de simulação utilizados. Todos os demais parâmetros de simulação foram configurados para os valores padrão do ndnSIM.

Tabela 1. Parâmetros de Simulação.

Geral	Duração de cada Simulação	10 s
	Número de Simulações	10
Link Wireless	Tecnologia	802.11g
	Capacidade	24 Mbps
Rede Wireless	Modelo de perdas de pacote	Nakagami LogDistance
	Atraso de propagação	ConstantPropagationSpeed
Carga da Rede	Modelo de carga	Constant bitrate (CBR)
	Frequência de pacotes	200 interesses/seg
	Tamanho do pacote de Dados	1480 bytes

4.2. Validação da solução ITCC

A avaliação ITCC foi realizada através de experimentos que utilizaram combinações de políticas de encaminhamento definidas por métrica NDN, critérios de supressão; modelos de mobilidade de rede (i.e., RPGM, Random Walk, Static); e capacidade máxima de armazenamento de dados da CS (i.e., 1 ou 1000 pacotes de Dados armazenados). Em todos os cenários, a rede foi formada por dois consumidores, um produtor e sete encaminhadores. Os nós comunicantes foram configurados para utilizar um mesmo modelo de mobilidade, construído utilizando a ferramenta BonnMotion 3.0.1 [Aschenbruck et al. 2010], sendo posicionados aleatoriamente dentro de um mapa de tamanho 100x100 m² e possuindo uma velocidade de deslocamento que varia de 1 a 30 m/s. Os nós se deslocam ao longo dos eixos x ou y, sendo que no modelo de mobilidade RandomWalk a direção de deslocamento é alterada a cada um segundo. Considerando o modelo de mobilidade em grupo RPGM, a quantidade mínima e máxima de nós por grupo foi definida como 2 e 6 nós respectivamente, enquanto que a distância do centro do grupo é de 30 metros. Os experimentos foram conduzidos no ambiente de simulação ndnSIM 3.30.1 [Mastorakis et al. 2017],

no qual os dispositivos foram configurados utilizando os parâmetros de simulação definidos na Tabela 1. Os demais parâmetros de simulação e dos modelos de mobilidade foram configurados usando os valores padrão do ndnSIM e BonnMotion.

4.3. Metodologia de Avaliação

As seguintes métricas de desempenho foram usadas para avaliar a hipótese e a solução: (i) Delay médio (ms) – intervalo de tempo entre o primeiro Interesse enviado pelos consumidores NDN e a recepção do pacote de Dados correspondente – indica o desempenho de entrega de dados; (ii) Interesses Satisfeitos (pkts) – total de pacotes de Interesse satisfeitos – indica a eficácia da entrega de dados; (iii) Descarte de Pacotes pelo L2 (pkts) – total de pacotes descartados pela NIC (camada L2) – representa indiretamente os congestionamentos de rede conforme percebidos pela camada L2; e (iv) Tamanho da PIT (pkts) – quantidade de Interesses pendentes na PIT em um dado instante de tempo – representa indiretamente os congestionamentos de rede percebidos pela camada L3.

5. Resultados e Discussões

5.1. Validação da hipótese

Os resultados ilustrados na Figura 6 representam as métricas de desempenho medidas pelos consumidores NDN nos cenários utilizados para validação da hipótese. Estes resultados indicam que ao utilizar $K < F$ encaminhadores conseguimos: (i) melhorar as métricas de desempenho da NDN (i.e., *delay* de entrega de Dados e total de Interesses satisfeitos); (ii) reduzir a quantidade de perdas de pacotes medidas pela NIC (L2); e (iii) reduzir a utilização da PIT, indicando que ha menos Interesses pendentes do que nos demais cenários de rede. Também podemos concluir que redes single-hop ($K = 0$) tem menor congestionamento, porém o desempenho da rede NDN nesse cenário é pior do que em redes multi-hop, seja no cenário onde todos os encaminhadores estão ativos ($K = F$) ou no cenário no qual há um número limitado de encaminhadores ($K < F$). Isto é, redes single-hop tem maior utilização da PIT, maior *delay* de entrega de Dados, e menor quantidade de Interesses satisfeitos. Portanto, a hipótese da existência de K ótimos encaminhadores em redes adhoc, tal que $K < F$ e $F \in \mathbb{N}^*$ é válida.

Tendo em vista a variedade de métricas NDN e critérios de seleção disponíveis, realizamos vários testes comparativos para encontrar a melhor permutação desses parâmetros. No primeiro conjunto de testes, buscamos identificar a métrica que oferecia melhor resultado, considerando um cenário de rede adhoc sem cache NDN, com topologia estática e selecionando o 1º quartil (1Q) como critério de seleção. Ou seja, cada nó da rede escolheu os 25% melhores nós vizinhos com base na métrica definida em cada cenário de testes: (i) Baseline NDN sem uso do ITCC ($K = F$); (ii) multi-hop com $K < F$ encaminhadores escolhidos manualmente; (iii) ITCC usando métrica delay (DL); (iv) ITCC usando métrica Interests Satisfied (IS); (v) ITCC usando métrica de frequência Local de Recepção de Dados NDN (LRD); (vi) ITCC usando métrica *Incoming Data* (ID); (vii) ITCC usando métrica *Looped Interests* (LI); (viii) ITCC usando métrica *Outgoing Data* (OD); e (ix) ITCC usando métrica soma da frequência total de recepção de Dados e Interesses (LRT).

Os resultados indicaram que a métrica LRD é a que consegue fazer o controle de congestionamento se aproximar mais do conjunto K ótimo, definido pela escolha manual

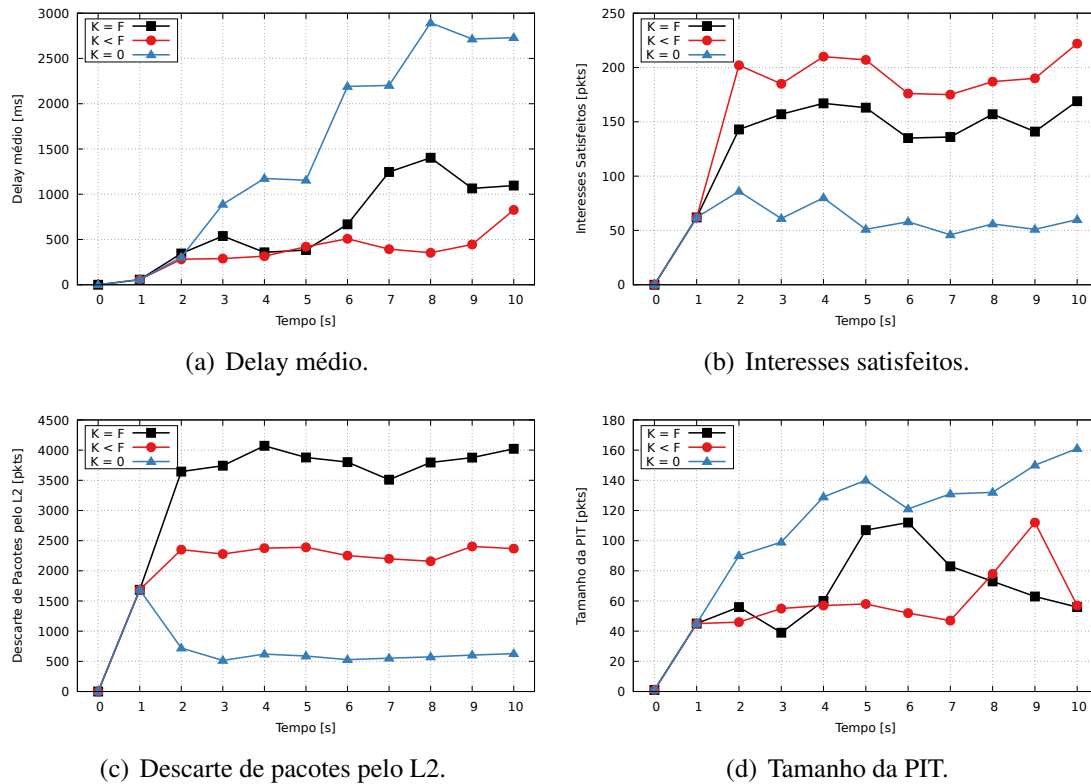


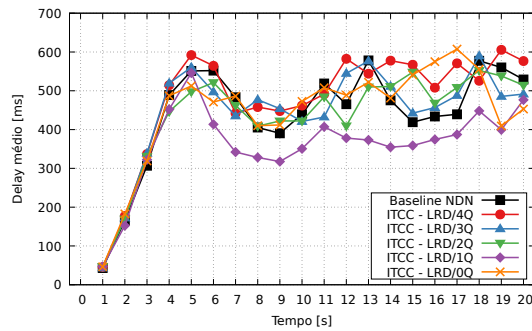
Figura 6. Métricas de desempenho nos cenários de validação da hipótese: (i) multi-hop com $K = F$ encaminhadores, (ii) multi-hop com $K < F$ encaminhadores escolhidos manualmente, e (iii) single-hop com $K = 0$ encaminhadores.

dos melhores nós encaminhadores, conforme cenário de testes (ii). Esta métrica é a que apresenta melhor redução no *delay* médio de entrega de Dados NDN, sem aumentar o número de interesses pendentes na PIT, ao mesmo tempo em que reduz a quantidade de pacotes descartados pelas NICs.

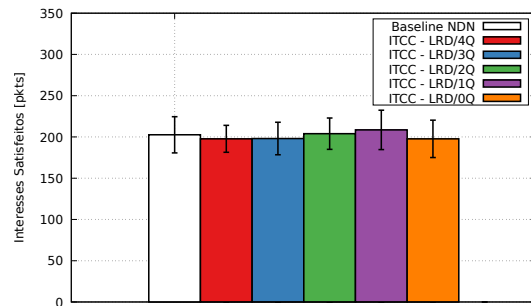
O próximo passo consistiu na avaliação do melhor critério de seleção ITCC que seria acoplado à métrica LRD. Para isso, definimos uma rede adhoc com topologia estática e fixamos o LRD como métrica para todos os cenários de testes: (x) ITCC usando LRD com 0º quartil (0Q), (xi) ITCC usando LRD com 1Q, (xii) ITCC usando LRD com 2Q, (xiii) ITCC usando LRD com 3Q, e (xiv) ITCC usando LRD com 4Q. Os resultados indicaram que melhor critério de seleção é o 1º quartil (1Q), pois apresentou maior melhoria no *delay* de entrega de Dados NDN, maior quantidade de Interesses satisfeitos ao mitigar congestionamentos de rede, maior redução do número de pacotes descartados pela L2 (i.e., congestionamento de rede), e não aumentou o número de interesses pendentes na PIT.

5.2. Avaliação a partir dos modelos de mobilidade

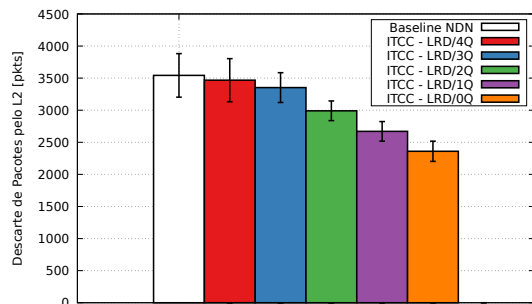
Um conjunto de experimentos foram conduzidos a fim de avaliar o controle de congestionamento a partir dos seguintes modelos de mobilidade: (i) Static, (ii) RPGM, e (iii) RandomWalk. Os resultados desses experimentos estão ilustrados nas Figuras 7, 8 e 9, respectivamente.



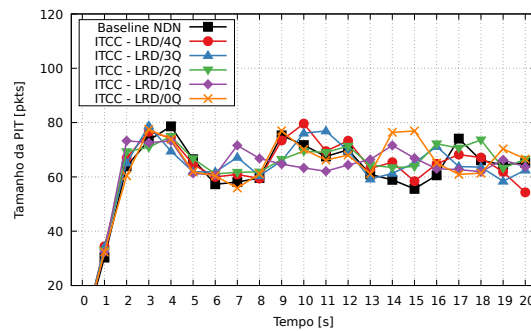
(a) Delay médio.



(b) Interesses satisfeitos.



(c) Descarte de pacotes pelo L2.



(d) Tamanho da PIT.

Figura 7. Cenário de teste (i): rede adhoc com cache NDN e topologia estática.

Conforme discutido na literatura, o cache de rede é efetivo para redução dos atrasos de entrega de Dados, quando comparado a redes sem cache, com mesma topologia estática. A Figura 7(a) apresenta os resultados obtidos. Como é possível notar, a presença do cache também reduziu a variação do atraso de entrega de Dados ao longo do tempo de execução das simulações. Os resultados também demonstraram que o controle de congestionamento ITCC obtém melhor atraso quando configurado para operar com LRD/1Q. A melhora provavelmente está associada ao menor congestionamento de rede, como ilustrado na Figura 7(c) pela taxa de descarte de pacotes no L2, e ao fato de existir um pacote de Dados previamente armazenado no nó vizinho pertencente ao 1º quartil (i.e., nó vizinho com melhor métrica LRD). Nesse sentido, o LRD/2Q contém os nós selecionados pelo LRD/1Q, porém, paradoxalmente, apresenta atraso maior que o LRD/1Q em determinados instantes da simulação. Isto indica que existe um nó contido no LRD/2Q, que está ausente do conjunto K selecionado pelo LRD/1Q, tal que a presença deste nó gera congestionamentos na comunicação dos demais nós vizinhos. Por fim, o LRD/1Q fornece o melhor atraso de entrega dentre todos os outros critérios, pois esta configuração facilita a escolha dos vizinhos com pacotes de Dados armazenados na cache NDN, tal que estes estejam distantes o suficiente uns dos outros para que eles não produzam congestionamentos significativos uns para os outros. O cache NDN também melhora a quantidade de interesses satisfeitos, quando comparado a redes sem cache com mesma topologia.

Por fim, os experimentos demonstraram que há melhora na quantidade de interesses satisfeitos à medida que o ITCC seleciona uma menor quantidade de encaminhadores, conforme Figura 7(b). Este comportamento evidencia que o congestionamento ocasionado

nado pelos encaminhadores redundantes supera o benefício da entrega multicaminho para consumidores dispersos devido ao posicionamento geograficamente disjunto dos caches NDN. Isto é, há um ponto ótimo para esta redundância adicional de caches NDN, além do qual os benefícios no que tange a Interesses satisfeitos são mínimos, enquanto que os congestionamentos de rede são magnificados, conforme Figuras 7(c) e 7(d). Deste modo, a troca de parâmetros ITCC que promove melhor otimização da maioria das métricas de desempenho de redes adhoc com topologia estática e cache NDN é o LRD/1Q.

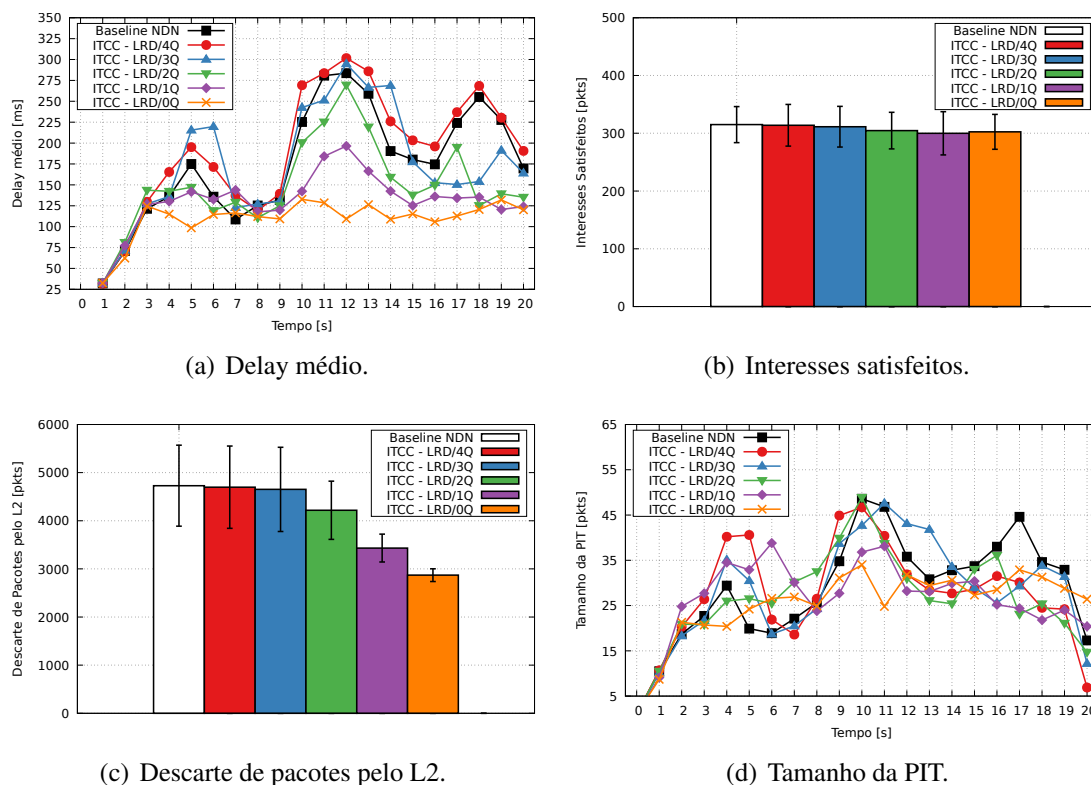
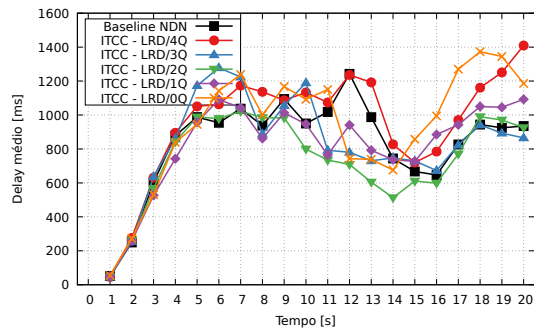
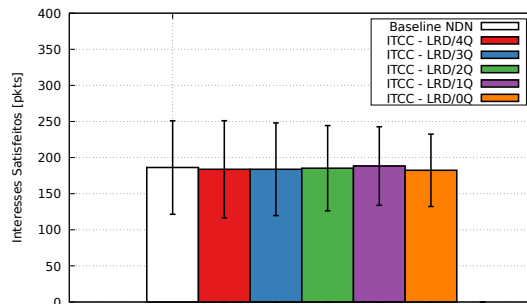


Figura 8. Cenário de teste (ii): rede adhoc com cache NDN e modelo de mobilidade RPGM.

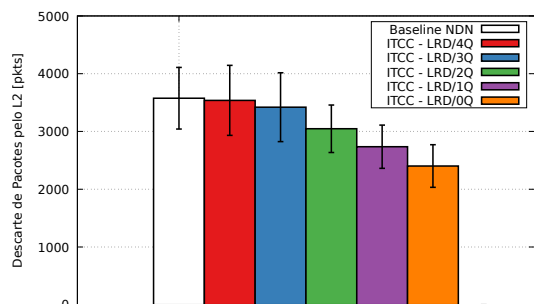
Nas Figuras 8 e 9, observa-se que a mobilidade dos nós favorece a entrega de Dados, seja pelo menor *delay* NDN ou pela maior quantidade de Interesses satisfeitos. Isto é decorrência de dois fenômenos: (i) a mobilidade dos nós permite que os nós se aproximem, o que melhora a qualidade dos enlaces *wireless*, e (ii) o cache NDN oportunístico permite que os nós operem como “mula” de dados (i.e., entrega de pacotes de Dados, previamente armazenados na cache, a nós mais distantes do restante da rede. Contudo, a mobilidade nodal também aumenta a instabilidade dos enlaces, conforme evidenciado pelo maior intervalo de confiança na quantidade de interesses satisfeitos, ilustrado na Figura 8(b). Na Figura 8(a), notamos que essas instabilidades ocorreram nos instantes de tempo 3 a 6, 9 a 13 e 16 a 19, considerando o modelo de mobilidade de grupo. Já no modelo *Random Walk*, essas instabilidades foram maiores nos instantes de tempo 11 a 13, conforme Figura 9. Apesar das instabilidades, a maioria dos critérios de seleção do ITCC apresentam métricas de desempenho semelhantes, independente do modelo de mobilidade da rede, com a exceção do LRD/1Q. Este critério é o que apresenta menor congestionamento e desempenho de entrega de Dados NDN equivalente aos demais critérios ITCC



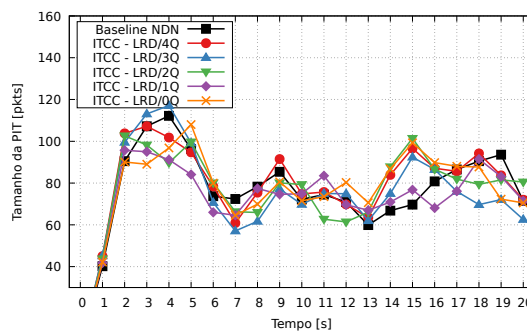
(a) Delay médio.



(b) Interesses satisfeitos.



(c) Descarte de pacotes pelo L2.



(d) Tamanho da PIT.

Figura 9. Cenário de teste (iii): rede adhoc com cache NDN e modelo de mobilidade RandomWalk.

independentemente do modelo de mobilidade da rede. Este fato indica que a maioria dos nós encaminhadores em redes adhoc com mobilidade e cache não melhora a comunicação NDN entre consumidores e produtores, dado que o LRD/1Q escolhe um subconjunto pequeno de nós encaminhadores. Outro ponto relevante, é que redes com modelo de mobilidade *RandomWalk* apresentam maior *delay* e tamanho da PIT, conforme Figuras 9(a) e 9(d) respectivamente, o que indica que os nós tendem a se afastar fisicamente uns dos outros nesses cenários. Esse afastamento reduz a qualidade dos *links wireless*, o que compromete a entrega de Dados NDN. O modelo de mobilidade que apresenta melhor quantidade de Interesses satisfeitos, independente dos parâmetros ITCC configurados, foi o *RPGM*, conforme Figura 8(b).

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste artigo, apresentamos o problema do congestionamento de redes wireless adhoc multi-hop, as principais soluções existentes na literatura, e como esse problema é afetado pelo número de nós encaminhadores NDN. Os resultados coletados no ambiente de simulação ndnSIM indicam que a solução ITCC traz melhorias na entrega de Dados NDN (i.e., *delay*, Interesses satisfeitos) e no congestionamento da rede (i.e., *packet drop*), sendo uma abordagem de controle de congestionamentos eficaz para redes com modelos de mobilidade distintos (i.e., *RPGM*, *Random Walk*, *Static*). Como trabalhos futuros, pretende-se elaborar um algoritmo iterativo para que o ITCC seja capaz de escolher automaticamente a melhor política de encaminhamento capaz de otimizar a entrega de Dados NDN.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) e *Air Force Office of Scientific Research* (award number FA9550-23-1-0631).

Referências

- Afanasyev, A., Shi, J., Zhang, B., Zhang, L., Moiseenko, I., Yu, Y., Shang, W., Li, Y., Mastorakis, S., Huang, Y., Abraham, J. P., Newberry, E., DiBenedetto, S., Fan, C., Papadopoulos, C., Pesavento, D., Grassi, G., Pau, G., Zhang, H., Song, T., Yuan, H., Abraham, H. B., Crowley, P., Amin, S. O., Lehman, V., Chowdhury, M., and Wang, L. (2021). Nfd developer's guide. Technical Report NDN-0021, NDN. Revision 11.
- Aschenbruck, N., Ernst, R., Gerhards-Padilla, E., and Schwamborn, M. (2010). Bonn-motion: A mobility scenario generation and analysis tool. In *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, SIMUTools '10*, Brussels, BEL. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- Brito, I. V. S., Sampaio, L., and Zhang, L. (2022). On supporting forwarding strategies and sync protocols through ndn distance vector routing. In *Proceedings of the 9th ACM Conference on Information-Centric Networking, ICN '22*, page 183–185, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Lehman, V., Gawande, A., Zhang, B., Zhang, L., Aldecoa, R., Krioukov, D., and Wang, L. (2016). An experimental investigation of hyperbolic routing with a smart forwarding plane in ndn. In *2016 IEEE/ACM 24th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, pages 1–10.
- Mastorakis, S., Afanasyev, A., and Zhang, L. (2017). On the Evolution of ndnSIM: An Open-Source Simulator for NDN Experimentation. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 47(3):19–33.
- Sampaio, L., Freitas, A., Brito, I., Araújo, F., and Ribeiro, A. (2021). Revisitando as ICNs: Mobilidade, Segurança e Aplicações Distribuídas através das Redes de Dados Nomeadas. In *Minicursos do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 51–100. SBC, 1 edition.
- Shinder, B. L. (2001). *Computer Networking Essentials*. Pearson Education.
- Wang, L., Lehman, V., Mahmudul Hoque, A. K. M., Zhang, B., Yu, Y., and Zhang, L. (2018). A secure link state routing protocol for ndn. *IEEE Access*, 6:10470–10482.
- Winston, I. (1985). Two methods for the transmission of IP datagrams over IEEE 802.3 networks. RFC 948.
- Xu, B., Zhu, Y., and Zhang, R. (2016). Optimized power allocation for interference channel with swipt. *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(2):220–223.
- Zhang, L., Afanasyev, A., Burke, J., Jacobson, V., claffy, k., Crowley, P., Papadopoulos, C., Wang, L., and Zhang, B. (2014). Named data networking. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 44(3):66–73.