

Explorando Estruturas de Dados Probabilísticas para Otimização de Rotas de Múltiplos Caminhos em Redes de Dados Nomeados.

Fabio Santos dos Santos¹, Italo Valcy S. Brito¹,
André L. R. Madureira¹, Leobino N. Sampaio¹

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

{fabio.ss, italovalcy, andre.madureira, leobino}@ufba.br

Abstract. *Routing protocols are essential for accurately discovering reachability information in Named Data Networking (NDN). In networks with multiple paths, Link State-based protocols, such as NLSR, may not be the most appropriate option due to their high synchronization complexity and computational effort. On the other hand, Distance Vector-based protocols offer a simpler synchronization process. However, their discovery mechanism faces challenges in delivering high-quality routes in multipath scenarios. We propose an approach to mitigate these limitations by using probabilistic data structures. The results obtained in an emulation environment demonstrate that the proposed solution provides a higher NDN packet delivery rate and a significant reduction in the number of unsatisfied interests, proving to be more effective.*

Resumo. *Os protocolos de roteamento são essenciais para a descoberta de informações de alcançabilidade com acurácia em redes de dados nomeados (NDN). Em redes com múltiplos caminhos, protocolos baseados em Link State, como o NLSR, podem não ser a opção mais apropriada devido à sua elevada complexidade de sincronização e esforço computacional. Já os protocolos baseados em Distance Vector oferecem um processo de sincronização mais simples, porém o mecanismo de descoberta enfrenta desafios para entregar rotas de qualidade em cenários de múltiplos caminhos. Propomos uma abordagem para mitigar essas limitações por meio do uso de estruturas de dados probabilísticas. Os resultados obtidos em ambiente de emulação demonstram que a solução proporciona maior taxa de entrega de pacotes NDN e reduz significativamente a quantidade de interesses não satisfeitos, mostrando-se mais eficaz.*

1. Introdução

As Redes de Dados Nomeados (NDN) são uma das propostas mais promissoras para a internet do futuro, visando aprimorar o desempenho e a segurança das redes legadas baseadas em TCP/IP. Essa abordagem oferece recursos avançados de segurança e entrega de dados de forma nativa, como *in-network caching*, criptografia por pacote e agregação de pacotes redundantes. Para alcançar esses objetivos, as redes NDN adotam um modelo de obtenção de pacotes orientado a dados (*data-driven*), no qual os dispositivos

podem atuar como consumidores, solicitando conjuntos de dados, ou como produtores, disponibilizando-os sob demanda [Sampaio et al. 2021].

Os protocolos de roteamento desempenham um papel fundamental, pois eles determinam a alcançabilidade de prefixos, provendo rotas pelas quais os consumidores podem obter os dados desejados [Wang et al. 2023]. São classificados em duas categorias principais: i) protocolos baseados em estado de enlace (*Link State* – LS), que operam com conhecimento global da topologia da rede, e ii) protocolos baseados em vetor de distância (*Distance Vector* – DV), que utilizam informações descentralizadas para cálculo de rotas. Ambas as abordagens apresentam limitações com múltiplos caminhos. Os protocolos LS impõem um elevado esforço computacional ao exigir o conhecimento completo da topologia para a execução do algoritmo de *Dijkstra*, resultando em desafios de escalabilidade devido à sua centralização e necessidade de sincronismo. Já os protocolos DV utilizam o algoritmo descentralizado de Bellman-Ford, sendo mais escaláveis. Contudo, eles esbarram na formação de loops de roteamento e uso de caminhos não disjuntos.

Assim, este trabalho propõe um novo protocolo DV projetado para redes NDN com múltiplos caminhos e rotas não disjuntas. A proposta utiliza estruturas de dados probabilísticas para a divulgação de rotas, permitindo a identificação e seleção de múltiplos caminhos eficientes. Em particular, a proposta utiliza um filtro probabilístico capaz de rejeitar rotas ineficientes sem introduzir sobrecarga significativa para a rede.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma visão resumida da fundamentação teórica bem como dos trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta o recorte do problema e detalha a proposta de mitigação, destacando os benefícios das estruturas de dados probabilísticas para a descoberta de rotas eficientes. Os experimentos e a análise dos resultados são apresentados na Seção 4. A Seção 5 propõe direções para trabalhos futuros e encerra o artigo.

2. Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

2.1. Roteamento com múltiplos caminhos em NDN

Algumas propostas foram desenvolvidas para o roteamento em NDN ao longo dos anos. Uma das primeiras delas foi o protocolo NLSR (*Named Data Link State Routing Protocol*), que apresenta uma abordagem baseada em estado de enlace [Wang et al. 2023]. Enfrenta limitações relacionadas ao esforço computacional resultante da descoberta centralizada de toda a topologia da rede por cada nó, o que se torna mais evidente quando trabalhamos com múltiplos trajetos.

O protocolo MUCA (*MUltipath forwarding and in-network CACHing*), de forma híbrida, faz aplicação de estado de enlace e vetor de distância, além de contar com um mecanismo de ranqueamento onde considera rotas aprendidas das *Content Store* (CS) [Karim et al. 2022]. Embora a abordagem híbrida proporcione aspectos positivos, compartilha das limitações relacionadas à abordagem de estado de enlace. Já o protocolo BFR (*Bloom Filter-based Routing Approach for Information-Centric Networks*) [Marandi et al. 2017], usa estruturas de dados probabilísticas para verificar se determinado prefixo pode ser alcançado via determinado próximo salto. Problemas de escalabilidade incentivaram sua versão aprimorada [Marandi et al. 2019] chamada de BFR pull-based, mas sem avanços no que tange à qualidade de rotas em múltiplos caminhos.

O NDVR (*NDN Distance Vector Routing*) [Brito 2021] é um protocolo de roteamento assíncrono, leve, seguro e eficiente. Usa a abordagem de Vetor de Distância. Oferece indicações de múltiplos caminhos para prefixos alcançáveis na rede, porém, encontra dificuldade em fornecer rotas de qualidade em cenários de loops ou caminhos não disjuntos, levando a encaminhamento ineficaz e gargalos de rede.

O uso de uma implementação modificada do algoritmo *Dijkstra* é uma das formas encontradas de tratar a questão de roteamento de múltiplos caminhos em NDN. A execução é parecida com a original. Descoberta das distâncias mais curtas a partir de um nó em relação a cada outro nó. Inicialmente, o nó considera temporariamente apenas um vizinho, calcula o custo até todos os prefixos possíveis e depois repete o procedimento para cada adjacente. Repete o processo a partir de cada interface de rede. Uma vez sondadas todas as rotas possíveis, ranqueia as melhores. É preciso verificar que com este algoritmo, todos os nós conhecem uns aos outros, bem como toda a topologia. Isso requer um esquema de sincronização complexo e um grande custo computacional. No entanto, o algoritmo de *Dijkstra* foi pensado para descobrir únicos melhores caminhos, não garantindo a qualidade das rotas em múltiplos caminhos [Wang et al. 2023].

O algoritmo de Bellman-Ford, por outro lado é usado por protocolos do tipo vetor de distância onde cada um aprende apenas quem são seus vizinhos diretos. Estes vizinhos se encarregam de informar quem pode ser alcançado a partir dele. Isso simplifica o roteamento porque não é preciso conhecer toda a topologia da rede, facilitando o sincronismo [Patil et al. 2024]. Para evitar o problema de contagem ao infinito e facilitar o controle de versão da divulgação é usado o recurso do número de sequência. Embora essa abordagem tenha a vantagem de trabalhar de forma assíncrona e distribuída, é suscetível a *loops* de roteamento. Isso nos leva aos problemas que estamos propondo mitigar neste trabalho e que detalhamos mais à frente.

2.2. Estruturas de dados probabilísticas

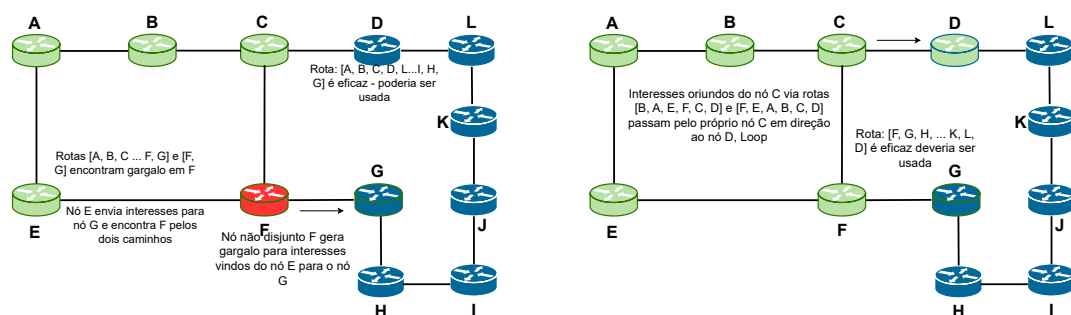
As estruturas de dados probabilísticas são mecanismos que proporcionam guardar uma grande quantidade de dados usando o mínimo de espaço ao custo de uma pequena taxa de erro. Em 1970, Burton Bloom nos apresentou duas novas abordagens de estruturas de dados probabilísticas [Bloom 1970].

O primeiro método, chamado de *Hashing* com código parcial e erros permitidos, consiste no uso de células como no método tradicional, mas em vez de armazenar a mensagem completa, armazena parte dela, proporcionando economia de espaço embora introduzindo uma certa margem de erro. Na segunda proposta, ao invés de armazenar mensagens completas, como no *hashing* convencional, ou códigos reduzidos como na proposta anterior, a ideia foi armazenar bits individuais mapeando cada mensagem para um *hash* e guardando em posições específicas no *array* o que resulta em economia de espaço, mas lida com falsos positivos. Nossa solução é baseada nessa segunda estrutura de dados probabilística e veremos mais detalhes no decorrer do trabalho.

3. Otimização de caminhos em protocolos vetor de distância com estruturas de dados probabilísticas

Protocolos de vetor de distância divulgam caminhos de menor custo [Patil et al. 2024], o que pode levar a rotas não disjuntas e *loop* em algumas topologias. Isso acontece quando

um caminho escolhido para encaminhar um pacote passa por um nó compartilhado, o que leva a gargalos na rede que diminuem a vazão e aumentam a sobrecarga do nó ou enlace. Na Figura 1(a) observamos que, em função da abordagem de vetor de distância, o roteador E aprende rotas para alcançar G via [A, B, C, F, G] e [F, G], por serem as de menores custos. Mas isso reduz as duas rotas a apenas uma, visto que as duas rotas passam pelo nó F. Essas rotas não são eficazes. O outro caminho via [A, B, C, D ... I, H, G], não é levado em consideração por ter maior custo. Outra questão é a inserção de rotas que colocam o próprio nó de origem da requisição, no caminho para o roteador de destino. Olhando a Figura 1(b), tomando por base o nó C, temos três caminhos de alcance ao nó D, verde claro. Um diretamente conectado ao próprio D, outro de próximo salto B e ainda outro via F. O nó B possui em sua tabela uma rota para D [A, E, F, C, D]. Analogamente, o nó F também possui uma rota para D pelo caminho [E, A, B, C, D]. Após incrementar os custos destas rotas aprendidas dos nós B e F, o roteador C passa a contar com uma rota de custo 1 direto para D, uma rota de custo 6 que tem como próximo salto o nó F e caminho [F, E, A, B, C, D], e outra rota com custo 6 via roteador B [B, A, E, F, C, D]. Percebemos que os dois caminhos de custo 6 passam pelo próprio nó C, após percorrer seu caminho o que é um erro, já que as duas rotas dependem da ligação C-D. Note que o nó C poderia ter aprendido do nó F a rota [F, G, H ... L, D], que, embora tenha custo mais elevado, não depende da ligação C-D, sendo, portanto, mais eficaz. O roteador C teria uma rota de custo 1, e mais uma rota com custo 8 tendo F como próximo salto. Rotas independentes e de qualidade.



(a) Nó F cria gargalo para pacotes oriundos do nó E em direção ao nó G

(b) Pacotes oriundos do nó C em direção ao nó D passam pelo próprio nó C

Figura 1. Problemas Múltiplos Caminhos

3.1. Vetor de Caminhos

Uma solução é ter controle do caminho usando um vetor de nomes uma vez que estamos lidando com prefixos nomeados. Adicionamos a cada rota divulgada a informação de quem são os nós ao longo do caminho. Cada roteador insere o seu próprio nome nos dados de vetor de distância enviados. Assim, ao receber o vetor distância do nó vizinho, o roteador verifica se seu nome pertence a esse vetor, o que indica que a rota passa por ele mesmo em um determinado momento, podendo decidir pelo descarte da mesma. Essa solução, no entanto, leva a listas de nomes extensas que consomem muito espaço. Para fins experimentais e testes, implementamos uma versão chamada de *PathVector*. Foi usado o protocolo NDVR (do inglês, *NDN Distance Vector Routing*) [Brito and Sampaio 2021] como caso de uso em função do mesmo ter características descentralizadas. Anexamos

um vetor de nomes à mensagem de divulgação de prefixos alcançáveis chamada DVINFO. Evidenciamos problemas de escalabilidade considerando que a mensagem deixa de ter um corpo reduzido assumindo um tamanho bem maior. Uma comparação do tamanho das mensagens em Bytes do NDVR original e NDVR com vetor de caminhos pode ser vista na Figura 2. A mensagem passa de centenas de bytes no protocolo original, e chega a milhares na versão *PathVector* nos obrigando a buscar uma solução mais escalável.

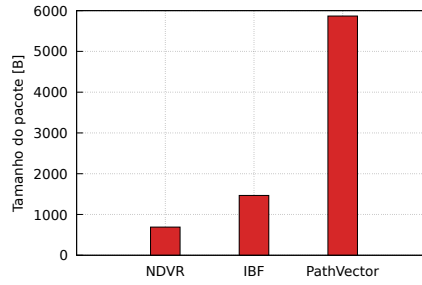


Figura 2. Tamanho em bytes da mensagem usando diferentes abordagens.

3.2. Usando estruturas de dados probabilísticas

Aplica-se aqui a estrutura de dados probabilística Filtro de Bloom [Bindu 2023]. O filtro de Bloom pode mapear uma informação para alguns poucos bits e guardá-la inserindo-a em um *array* em posições específicas que são verificadas para saber se um item encontra-se no conjunto. Essa operação garante com total precisão que um elemento não está presente no vetor, mas admite falsos positivos que podem ser tornados tão pequenos quanto satisfizermos a equação abaixo [Bloom 1970]:

$$p = (1 - e^{-\frac{kn}{m}})^k \quad (1)$$

onde p é a probabilidade aproximada de acontecer um falso positivo, k é o número de funções *hash*, m é o tamanho do *array* e n é a cardinalidade. Assim, deduz-se que quanto maior o número kn fica em relação a m , essa taxa cresce, sendo o contrário verdadeiro. Ou seja, quanto menor kn , menor a probabilidade de falso positivo. Considerando a topologia da figura 1(a) com 12 nós, podemos usar os seguintes valores: $K = 3$, $m = 64$, $n = 12$, que nos permite uma taxa de falsos positivos $p = 0.0796$ ou 7.69%. No cenário usado não houve perda de rotas devido a falso positivo.

Uma variação do Filtro de Bloom original chamada de filtro de Bloom Inversível (IBF) [Goodrich and Mitzenmacher 2011], traz algumas vantagens em relação ao filtro de Bloom original. Possibilita contagem, remoção segura e comparação probabilísticas de filtros. Nossa implementação faz uso dessa variação.

3.2.1. Mensagem de divulgação de prefixos usando filtro de Bloom inversível (IBF)

Anexamos um IBF à mensagem de divulgação de rotas do nosso caso de uso a DVINFO em lugar da lista de nomes. Ao enviar uma atualização, cada nó insere seu próprio nome no filtro. Quando uma divulgação de rotas é recebida, o roteador verifica se seu nome está no filtro, podendo descartar a entrada inválida. Outras lógicas podem ser estudadas

e implementadas para eliminar caminhos que nos levem a rotas ineficazes. A vantagem dessa abordagem é a diminuição de espaço usado para registrar os nós do caminho. A Tabela 1 ilustra a modelagem adotada. Cada rota nesta topologia usa apenas 64 bits para representar os roteadores (*NextHops*) que compõem um caminho, o que é bem menor do que usar nomes que ocupam centenas de bytes. Na Figura 2, vemos que a mensagem de divulgação de rotas com a estrutura de dados probabilística fica bem menor do que a mensagem usando o *PathVector*.

Tabela 1. Modelagem da Mensagem com IBF

Prefix	NumSeq	Orig	NextHops
/ndn/d-site	x	/d	[011000000000001000000000000001]
			[011000000000001000000000000011]
			[0110000000000010000000000000110]
			[000010010010000000000000001011]
			[011000000000001000000000000011]

4. Avaliação Experimental

Foi usado ambiente Ubuntu 20.04 LTS com CPU Intel i5 3.2 GHz e 8 GB de memória RAM. Foram realizados experimentos no emulador MiniNDN 0.5.0 [Brito and Sampaio 2021], com 10 repetições em cada cenário. Usamos a estratégia de encaminhamento RANDOM [Pratama et al. 2023], e, após a convergência, os nós consumidores dispararam um total de 300 interesses distribuídos para os demais nós da topologia. Utilizamos duas topologias que possuem diferentes características de conectividade.

4.1. Primeiro Experimento - Loop Duplo

Utilizando a topologia da Figura 1 (b), enviamos interesses com o roteador C como consumidor e o roteador D como produtor. Observamos a vantagem no uso da versão com a solução, pois sem IBF temos três rotas: A diretamente conectada, C-D, a rota via nó B [B, A, E, F, C, D] e o trajeto via F [F, E, A, B, C, D], sendo que as duas últimas dependem da primeira C-D. Ou seja, o escoamento é de apenas um link devido ao gargalo C-D. Isso gera uma alta taxa de interesses não satisfeitos decorrente dos interesses detectados como *loops*. Usando a implementação com IBF os caminhos são otimizados. As rotas [C, D] e [F, G, H ... L, D] são disjuntas, podendo concatenar as taxas de vazão dos enlaces. Também vemos a taxa de interesses satisfeitos bem maior na Figura 3(a), e um número bem reduzido de interesses em *loop* na Figura 3(b). As rotas instaladas usando a solução foram otimizadas cumprindo nosso objetivo.

4.2. Segundo Experimento - Loop Múltiplo

Neste segundo experimento, foi criado um ambiente que exacerba os problemas encontrados pela arquitetura NDN, testando exaustivamente a capacidade da proposta de prover direções de qualidade mesmo em face a uma topologia complicada. Podemos notar na topologia da Figura 4 que existem cinco ambientes cíclicos: [A-B-C], [A-C-D], [A-D-E], [A-E-F] e [A-F-G]. Enviamos os interesses com o roteador A como consumidor e o roteador B como produtor. O percentual de interesses não satisfeitos no NDVR original é o dobro do de interesses satisfeitos e os interesses em *loop* 30% a mais sem o uso do

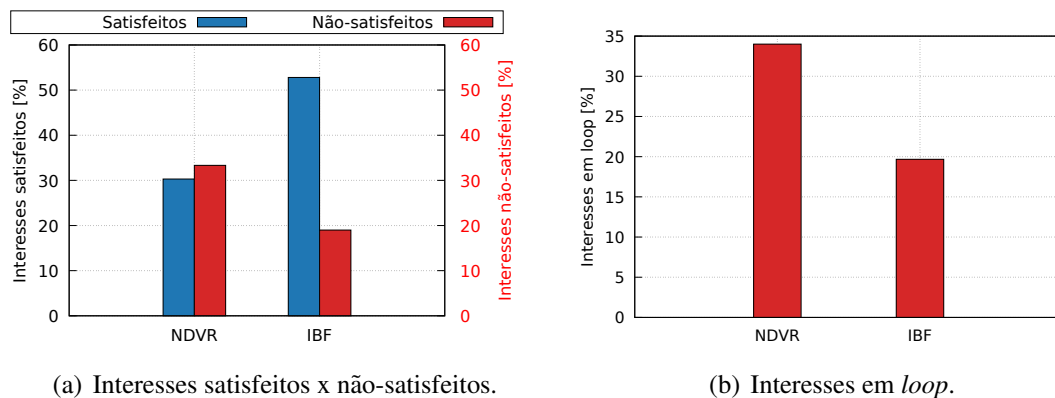


Figura 3. Cenário de rede com *loop* duplo.

IBF. Em contrapartida, o uso do protocolo com a solução produz maior taxa de interesses satisfeitos, e, menor número de interesses desperdiçados por *loops*. Novamente, pode-se ver os benefícios do uso da solução IBF.

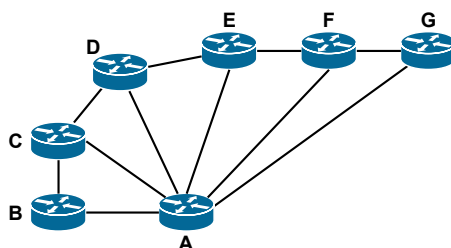


Figura 4. Topologia do experimento 2.

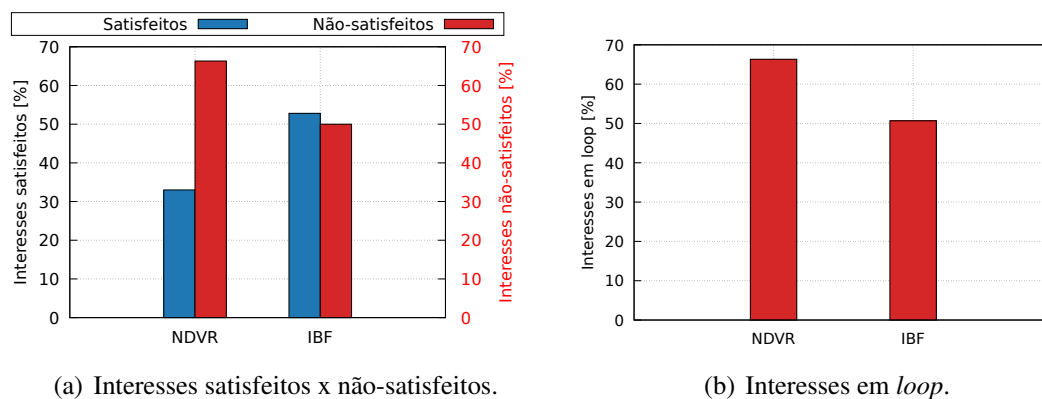


Figura 5. Cenário de rede com *loop* múltiplo.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este documento mostra como a implementação de estruturas de dados probabilísticas ajuda na otimização de rotas por eliminar próximos saltos que levam a loops e gargalos de rede, o que favorece o uso em balanceamento de carga e alta disponibilidade. Os resultados mostram que as rotas instaladas usando esta abordagem levam vantagem nas

taxas de interesses satisfeitos. Como trabalhos futuros, vamos investigar melhorias na modelagem e a relação desta com estratégias de encaminhamento que possam extrair o máximo das rotas otimizadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da CAPES, do CNPq (no 432064/2018-4, 316208/2021-3, 402854/2022-5), da FAPESB (no TIC0004/2015) e do Air Force Office of Scientific Research (award FA9550-23-1).

Referências

- Bindu, G. (2023). Efficient bloom filter-based routing protocol for scalable mobile networks. *Engineering Proceedings*, 59(1):75.
- Bloom, B. H. (1970). Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors. *Communications of the ACM*, 13(7):422–426.
- Brito, I. V. S. (2021). NDVR: NDN Distance Vector Routing. Technical report, Federal University of Bahia.
- Brito, I. V. S. and Sampaio, L. N. (2021). Roteamento em redes de dados nomeados com ndvr: um protocolo leve e eficiente para disseminação de informações de alcançabilidade. In *Anais do XXXIX SBRC 2021*, pages 574–587. SBC.
- Goodrich, M. T. and Mitzenmacher, M. (2011). Invertible bloom lookup tables. In *2011 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, pages 792–799. IEEE.
- Karim, F. A., Aman, A. H. M., Hassan, R., Nisar, K., and Uddin, M. (2022). Named data networking: A survey on routing strategies. *IEEE Access*, 10:90254–90270.
- Marandi, A., Braun, T., Salamatian, K., and Thomos, N. (2017). Bfr: a bloom filter-based routing approach for information-centric networks. In *2017 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops*, pages 1–9. IEEE.
- Marandi, A., Braun, T., Salamatian, K., and Thomos, N. (2019). Pull-based bloom filter-based routing for information-centric networks. In *2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pages 1–6. IEEE.
- Patil, V., Theeranantachai, S., Zhang, B., and Zhang, L. (2024). Poster: Distance vector routing for named data networking. In *Proceedings of the 20th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies*, pages 23–24.
- Pratama, C. S., Arrachman, M. I., Nurrasyid, M. S., Hamidi, E. A. Z., Negara, R. M., Ahdan, S., Mayasari, R., and Syambas, N. R. (2023). Random load balancing in mini-ndn using modified inherent topology. In *2023 9th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, pages 1–6. IEEE.
- Sampaio, L. N., Freitas, A. E., Brito, I. V., Araújo, F. R. C., and Ribeiro, A. V. (2021). Revisitando as icns: Mobilidade, segurança e aplicações distribuídas através das redes de dados nomeados. *Sociedade Brasileira de Computação*.
- Wang, L., Lane, A., Serban, C., Elwell, J., Afanasyev, A., and Zhang, L. (2023). Investigating the Synergy between Routing and Forwarding Strategy in NDN Networks. In *Proceedings of the 10th ACM Conference on ICN*, pages 67–77.