

Uma Estratégia Rápida e Eficiente de Localização e Encaminhamento em Redes Orientadas a Conteúdo

João Vitor Torres e Otto Carlos M. B. Duarte

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro - GTA/COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro, Brazil

Email: {jvitor, otto}@gta.ufrj.br

Abstract. *Content-Centric Networks focus on the communicated data name fundamentally changing the network task of locating and forwarding information. Additionally, the huge amount of content names challenges the scalability of techniques used for this task. This article proposes a strategy that consolidates the control plane on a dedicated node apart of switches responsible for the data plane. The proposal shows higher performance compared with others strategies identified in the literature. The comparison uses analytical modeling and simulation to measure convergence delay and efficiency in terms of useful and signaling traffic ratio. The results prove the proposal superior performance with the scalability of the network topology size, the number of content names and the content request profile.*

Resumo. *As Redes Orientadas a Conteúdo focam o nome do dado comunicado alterando de forma fundamental a tarefa de localização e encaminhamento de informação em rede. Adicionalmente, a enorme quantidade de nomes de conteúdo desafia a escalabilidade das técnicas utilizadas nessa tarefa. Este artigo propõe uma estratégia com consolidação do plano de controle em nó separado dos comutadores responsáveis pelo plano de dados. A proposta apresenta desempenho superior em comparação com as demais estratégias identificadas na literatura. A comparação utiliza modelagem analítica e simulação para medir o tempo de convergência e a eficiência em termos da relação entre tráfego útil e de sinalização. Os resultados obtidos comprovam o desempenho superior da proposta com a escalabilidade do tamanho da topologia da rede, do número de nomes de conteúdo e do padrão de solicitação de conteúdo.*

1. Introdução

As Redes Orientadas a Conteúdo (*Content Centric Network* - CCN) [Jacobson et al. 2009] mudam drasticamente os princípios de localização e encaminhamento, passando o foco diretamente para o nome do conteúdo e não mais o endereço da máquina, ou hospedeiro, como é hoje na Internet. Isto tem a grande vantagem de permitir que cópias locais do conteúdo sejam armazenadas em diferentes pontos e, conseqüentemente, mais perto do usuário ao invés de solicitadas repetidamente à fonte. Adicionalmente, pedidos paralelos para o mesmo nome são agregados e uma única solicitação é encaminhada a frente através da rede. Um dos principais desafios da rede orientada a conteúdo é a escalabilidade da localização e do encaminhamento,

Este trabalho recebeu recursos da PETROBRAS, FINEP, FUNTTEL, CNPq, CAPES e FAPERJ.

uma vez que a quantidade de conteúdo é bem maior que a quantidade de hospedeiros. Para tratar a tarefa de localização de forma escalável, a proposta de rede orientada a conteúdo (CCN) utiliza nomeação hierárquica de conteúdos, organizando os nomes em uma estrutura em níveis vinculada à topologia de nós da rede. Tal estrutura hierárquica permite a agregação dos nomes de conteúdo em seus prefixos comuns na direção do nível mais alto da hierarquia. A agregação possibilita a divulgação concisa de sumários de localização usando esquemas de roteamento baseados em anúncios de prefixos de nomes.

O vínculo entre nome e localização herda as limitações do IP em tratar requisitos de mobilidade e hospedagem multidomicílio, requisitos que são ampliados pela distribuição de cópias de conteúdo na rede, muitas vezes fora do caminho até a fonte. O anúncio de rotas para nomes fora da hierarquia desagrega prefixos, aumenta o tráfego de controle e as tabelas de encaminhamento, o que as torna economicamente inviáveis atualmente para redes CCN [Perino and Varvello 2011].

Este artigo propõe uma nova estratégia de localização e encaminhamento de informação em redes CCN baseada na separação dos planos de dados e de controle. A proposta restringe e aprofunda a análise realizada em trabalho anterior [Torres et al. 2013] focando em cenários com apenas um controlador responsável pelo plano de controle. A nova estratégia inunda a rede apenas pontualmente para localização do controlador e não de forma periódica como inicialmente proposto. Além disso, a nova proposta mantém a reutilização da memória das tabelas de encaminhamento dos nós substituindo registros antigos por novos sob demanda. O artigo compara a proposta com estratégias existentes demonstrando desempenho superior em uma composição de cenários. A avaliação define duas métricas para a comparação: o atraso de convergência e a eficiência de sinalização. O trabalho avalia o compromisso de cada estratégia entre estas duas métricas frente a variação de características da rede e do perfil de tráfego.

O restante deste artigo está organizado da forma a seguir. Na Seção 2 os principais trabalhos relacionados são apresentados. As estratégias de localização e encaminhamento estudadas são detalhadas na Seção 3. Na Seção 4 é apresentada a modelagem analítica e os resultados de simulação para o desempenho de cada estratégia em função de parâmetros de topologia e de tráfego. Por fim, na Seção 5 ressaltam-se as principais conclusões.

2. Trabalhos Relacionados

Os esquemas atuais de roteamento aplicados no CCN constroem as regras de encaminhamento baseadas no OSPF. O OSPF inunda toda a rede com atualizações de prefixos não agregados, impondo fortes limitações de escalabilidade quanto ao número de prefixos distintos e a mobilidade do conteúdo [Wang et al. 2012]. A proposta NLSR [Hoque et al. 2013] usa um esquema de sincronismo de base de dados salto a salto em substituição as inundações do OSPF para propagar os anúncios de prefixos na rede. Apesar de evitar inundações na rede, a eficiência do esquema NLSR em função do número de prefixos e do tamanho da rede ainda não é bem conhecido.

Os esquemas OSPF e NLSR atuam proativamente anunciando para a rede os prefixos de conteúdo disponíveis. As propostas [Chiocchetti et al. 2013, Xie et al. 2013] utilizam abordagem reativa ao adaptar as tabelas de encaminhamento sob realimentação do plano de dados. Estas propostas inundam a rede com interesses sem correspondência na *Forwarding Information Base* - FIB e mediante recepção de conteúdo em resposta

adicionam novas entradas mais específicas na FIB. Apesar de fornecer baixo tempo de convergência, a sobrecarga de sinalização destas propostas não é modelada de forma comparativa com outras abordagens evidenciando o impacto das inundações.

Baid *et al.* utiliza um esquema que mapeia os prefixos de conteúdo em nomes planos únicos e este nomes em endereços topológicos de rede, reduzindo os requisitos de memória e de troca de mensagens de controle [Baid et al. 2012]. De forma análoga, o trabalho [Zhu et al. 2013] utiliza um esquema do tipo DNS para mapear nomes de conteúdo em prefixos de nome vinculados a segmentos de rede de acordo com a movimentação do conteúdo. Estas propostas quebram o vínculo fundamental entre o conteúdo do pacote e o seu nome utilizado para encaminhamento, o que é essencial para a agregação de solicitações para o mesmo conteúdo.

Yi *et al.* ressaltam a adaptabilidade do encaminhamento em função de informações obtidas do plano de dados e discutem se há necessidade de protocolos de roteamento em redes CCN [Yi et al. 2013]. Apesar da resposta afirmativa, os autores argumentam que o requisito de tempo de convergência para CCN é menos restrito quando comparado a redes IP. Contudo, não há consideração sobre os requisitos para o tamanho das tabelas de encaminhamento.

Propostas do tipo redes definidas por *software* (*Software Defined Networks* - SDN) empregam um controlador para instalar, sob demanda, nos nós da rede, regras de encaminhamento de pacotes por fluxo [Mattos et al. 2011, Fernandes et al. 2011]. Estas propostas fazem a separação das funções de roteamento em plano de controle, que calcula as rotas, e plano de dados, que executa o encaminhamento dos pacotes. Um controlador processa as mensagens de controle e, assim, reduz os requisitos de memória e de processamento dos nós comutadores. O conceito de separação de planos das redes SDN é utilizado no presente trabalho para uma proposta de localização e encaminhamento de informação em redes CCN. Ao contrário de propostas anteriores [Salsano et al. 2013], a presente proposta é independente de infraestrutura baseada no protocolo IP e *Open-Flow* [McKeown et al. 2008].

3. Estratégias de Localização e Encaminhamento Estudadas

3.1. Estratégia Proposta *CRoS-NDN*

Este trabalho propõe a estratégia *Controller based Routing Strategy for Named Data Networking - CRoS-NDN*, a qual separa os planos de controle e de dados. O controlador calcula as métricas de roteamento a partir de um esquema distribuído de obtenção da topologia da rede e do mapa de prefixos associados a cada nó produtor de conteúdo. O esquema utiliza inundação pontualmente para que os nós localizem o controlador e posteriormente registrem informações da rede nele. Os nós consultam o controlador sempre que um interesse não tenha registro compatível na sua FIB local. A partir da resposta do controlador, o nó constrói um interesse especial que desencadeia a instalação de registros na FIB dos nós até o produtor do conteúdo para o nome no interesse enviado pelo consumidor. Caso o tempo de espera de um registro na *Pending Interest Table* - PIT expire, então o registro associado na FIB é removido. A ausência de resposta ao interesse pode ser causada por mudanças na topologia da rede tornando o registro na FIB inválido. O Algoritmo 1 apresenta o resumo em alto nível do esquema utilizado para obtenção de informações pelo controlador e fornecimento de rotas sob demanda para os demais nós.

Algoritmo 1: Resumo CRoS-NDN

Entrada: nó i , controlador x ;

repita

- nó i monitora vizinhos e descobre controlador x ;
- se** a lista de vizinhos de i mudou **então**
 - i atualiza registro no controlador;
 - controlador atualiza lista de vizinhos do nó i ;
- fim**
- se** i está registrado e existem novos prefixos de produtores **então**
 - i registra novos prefixos de produtores de conteúdo;
- fim**
- se** i recebe interesse sem registro compatível na FIB **então**
 - i solicita rota ao controlador;
 - i gera interesse especial com resposta do controlador e o encaminha instalando rota até o produtor;
- fim**
- se** i recebe interesse de instalação de rota para prefixo $prefixoA$ **então**
 - i adiciona registro na FIB para $prefixoA$ apontando para próximo salto da rota;
- fim**

até sempre;

3.2. Estratégia *OSPFLike*

Ao contrário da *CRoS-NDN*, a estratégia *OSPFLike* utiliza o procedimento de inundação de forma recorrente para cada prefixo a ser anunciado na rede. O nó produtor inunda a rede anunciando os prefixos de nome para os quais ele possui conteúdo. A inundação de interesses ocorre sem garantia de entrega e precisa ser reforçada periodicamente. O produtor utiliza um prefixo especial adicionado aos nomes anunciados. Todos os nós possuem um registro na FIB correspondente a este prefixo especial e este registro aponta para todas as interfaces do nó como saída permitindo a inundação. Um nó ao receber um interesse com o prefixo especial identifica que se trata de um anúncio e inclui um registro na FIB correspondente ao nome anunciado apontando para interface de entrada deste interesse. Caso o anúncio seja recebido por múltiplas interfaces, utiliza-se a interface com menor número de saltos até o produtor. Para os interesses de consumidores, em caso de ausência de resposta o estouro do tempo de espera do registro na PIT provoca a remoção do registro na FIB utilizado no encaminhamento do respectivo interesse. Os nós são agnósticos à topologia da rede e têm apenas uma visão local de qual interface de saída utilizar para cada prefixo com anúncio recebido.

3.3. Estratégia *NLSRLike*

A estratégia *NLSRLike*, baseada em [Hoque et al. 2013], substitui a inundação periódica de prefixos da estratégia *OSPFLike* por um esquema de sincronismo entre as bases de dados dos nós. Esta base de dados, chamada *Link State DataBase* - LSDB, armazena a informação do estado da rede com registros chamados *Link State Advertisements* - LSAs. A estratégia *NLSRLike* utiliza dois tipos de LSA. O primeiro tipo, LSA de vizinhos, arma-

zena a informação de vizinhança de um salto de um nó. O segundo tipo, LSA de prefixo, armazena a associação entre um prefixo de nome e a identificação do nó produtor.

O esquema de sincronismo da base de dados LSDB utiliza troca de *hashes* dos registros LSA para verificar e atualizar a consistência entre nós vizinhos. Cada nó constrói um mapa da topologia da rede e da associação entre prefixos e nós produtores a partir da LSDB. Ao receber um interesse de um consumidor, o nó verifica localmente o identificador do produtor do prefixo associado ao nome solicitado e calcula a interface de saída usando o algoritmo de Dijkstra para determinar o menor caminho até o produtor.

3.4. Estratégia *ARPLike*

A estratégia *ARPLike*, inspirada em [Chiocchetti et al. 2013, Xie et al. 2013], troca a abordagem proativa de anúncio de prefixos das estratégias anteriores pela busca reativa utilizando inundação conforme necessário. O nó inunda a rede sempre que não existe um registro específico na FIB para o interesse. Ao receber o dado correspondente a um registro ainda válido na PIT, o nó adiciona ou atualiza o registro na FIB para o respectivo prefixo do dado apontando para a interface de recepção deste dado. Os interesses subsequentes para o mesmo prefixo são encaminhados diretamente utilizando o registro específico na FIB. Caso o tempo de espera de um registro na PIT expire, então o registro associado na FIB é removido. A expiração pode ser causada, por exemplo, por mudanças na topologia da rede tornando o registro na FIB inválido.

3.5. Estratégia de Inundação - *Flooding*

A estratégia *Flooding* representa o cenário de pior caso da *ARPLike*, no qual cada novo interesse tem prefixo diferente de todos os anteriores. Na estratégia *Flooding* e na *ARPLike* com tal cenário, o nó encaminha cada interesse recebido em todas as interfaces exceto a de recepção. A agregação de interesses na PIT impede a ocorrência de ciclos.

3.6. Estratégia Omnisciente - *Omniscient*

Esta é uma estratégia onde todas as entradas da FIB são calculadas *a priori* sem adicionar sobrecarga de sinalização e não há atraso de convergência. A estratégia *Omniscient* é utilizada como referência na comparação das demais estratégias, pois tem o melhor desempenho possível.

4. Análise de Desempenho

As estratégias estudadas empregam diferentes abordagens para a localização e o encaminhamento de conteúdo em rede. As estratégias *OSPFLike* e *NLSRLike* anunciam em inundação e de forma proativa a informação de localização na rede. As estratégias *ARPLike* e *Flooding* inundam a rede de forma reativa buscando o conteúdo sob demanda. A estratégia *CRoS-NDN*, proposta deste trabalho, evita inundações recorrentes da rede ao consolidar a informação de localização em um nó controlador. Esta seção compara o desempenho de cada estratégia utilizando duas métricas: (i) eficiência de sinalização e (ii) atraso de obtenção do conteúdo. Primeiro as duas métricas acima são modeladas através de equações, ver seção 4.1. Em seguida, é apresentada uma análise de tendência para casos especiais de interesse, ver seção 4.2. Finalmente, os resultados são validados através de simulação, ver seção 4.3.

4.1. Modelagem analítica

A métrica de eficiência de sinalização (ES) é definida em função da fração útil de tráfego (FU). FU é definida como a razão entre o número de conteúdos distintos recebidos pelo consumidor e o número de interesses trafegados nos enlaces da rede. A equação (1) modela a FU de cada estratégia. As variáveis utilizadas no modelo são listadas na Tabela 1. A ES , equação (2), é definida em função da FU para a estratégia *Omniscient*, caso ideal e referência para comparação com $ES = 1$. A estratégia *Omniscient* propaga tráfego apenas pelo caminho ótimo de acordo com a taxa de interesses dos consumidores TC .

A métrica de atraso é composta pela soma de três componentes: AD - o atraso de ida e volta direto entre consumidor e produtor de conteúdo; AA - o atraso entre o anúncio de um prefixo de conteúdo pelo produtor e o alcance de toda a rede; e AT - o atraso entre uma mudança na topologia da rede e o recálculo de rotas. As equações (3), (4) e (5), respectivamente, fornecem o cálculo destes componentes de atraso.

A modelagem de cada estratégia é detalhada individualmente a seguir considerando ambas as métricas. São consideradas as distâncias entre consumidor e produtor, entre consumidor e controlador e entre produtor e controlador como D , pior caso.

A estratégia *Omniscient* fornece o menor atraso possível composto apenas pela parcela AD . As estratégias *Flooding* e *ARPLike* proporcionam atraso igual à *Omniscient*, porém com sobrecarga de interesses de sinalização. No caso *Flooding*, o total de interesses é proporcional ao número de enlaces da rede E e a taxa de interesses TC . No caso *ARPLike*, a sobrecarga adicional é proporcional ao número de enlaces da rede E e à taxa de interesses sem registro específico na FIB, $TC \times FI$.

$$FU_{Omniscient} = \frac{TC}{TC \times D} = \frac{1}{D} \quad (1a)$$

$$FU_{Flooding} = \frac{TC}{TC \times E} = \frac{1}{E} \quad (1b)$$

$$FU_{ARPLike} = \frac{TC}{TC \times (FI \times E + (1 - FI) \times D)} = \frac{1}{(FI \times E + (1 - FI) \times D)} \quad (1c)$$

$$FU_{OSPFLike} = \frac{TC}{NP \times E \times TV + TC \times D} \quad (1d)$$

$$FU_{NLSRLike} = \frac{TC}{2 \times E \times (TV + TA + TT) + TC \times D} \quad (1e)$$

$$FU_{CRoS-NDN} = \frac{TC}{2 \times E \times TV + TT \times E + D \times (N \times TT + TA + TC \times (FI + 1))} \quad (1f)$$

$$ES_{estrategiaX} = \frac{FU_{estrategiaX}}{FU_{Omniscient}} \quad (2)$$

$$AD_1 = 2 \times AE \times D \quad (3a)$$

¹*Omniscient, Flooding, ARPLike, OSPFLike, NLSRLike*

$$AD_{CRoS-NDN} = 4 \times AE \times D \quad (3b)$$

Tabela 1. Parâmetros para Avaliação das Estratégias

Tipo	Variável	Descrição
Entrada	N	Número de nós da rede
Entrada	E	Número de enlaces da rede
Entrada	D	Diâmetro da rede
Entrada	TC	Taxa de interesses do consumidor
Entrada	NP	Número total de prefixos de conteúdo
Entrada	TA	Taxa de anúncio de prefixos
Entrada	FI	Fração de interesses para prefixos ainda não solicitados
Entrada	TV	Taxa de monitoração de vizinhança
Entrada	TT	Taxa de alterações de topologia
Entrada	AE	Atraso de propagação no enlace
Saída	FU	Fração útil de tráfego
Saída	ES	Eficiência de sinalização
Saída	AD	Atraso de ida e volta direto entre consumidor e produtor
Saída	AA	Atraso entre anúncio de novo prefixo e alcance em toda rede
Saída	AT	Atraso de atualização da topologia

$$AA_2 = 0 \quad (4a)$$

²*Omniscient, Flooding, ARPLike*

$$AA_3 = AE \times D \quad (4b)$$

³*OSPFLike, CRoS – NDN*

$$AA_{NLSRLike} = (4 \times AE + \frac{1}{TV}) \times D \quad (4c)$$

Na estratégia *OSPFLike*, a inundação de anúncios com frequência TV e com quantidade de interesses proporcional ao total de prefixos anunciados NP também gera sobrecarga de sinalização. Além disso, alterações de topologia geram atraso adicional na entrega de conteúdo. Este atraso, AT , é inversamente proporcional a taxa TV e adicionado ao atraso de propagação de anúncios na rede, AA .

Na estratégia *NLSRLike*, a sobrecarga de sinalização é proporcional à taxa de monitoração de vizinhança TV e ao número de enlaces E . Adicionalmente, o sincronismo da LSDB gera dois novos interesses para cada nova LSA em cada enlace, seja LSA de alteração de topologia ou de novo anúncio de produtor. O sincronismo da LSDB acarreta também atraso adicional na entrega de conteúdo. Este atraso depende da verificação de consistência da LSDB entre vizinhos e que ocorre a intervalos $\frac{1}{TV}$. Após detecção de inconsistência, a atualização de LSA entre dois vizinhos adiciona duas iterações consecutivas de interesse e resposta entre eles, ou seja, adiciona atraso igual a quatro vezes o

Tabela 2. Análise de Tendência para a Eficiência de Sinalização - ES

Cenário	ES
$E \gg D$	Flooding $\rightarrow 0$
$E \gg D, FI \rightarrow 1$	ARPLike $\rightarrow 0$
$E \gg D, TV = 1, NP \rightarrow TC$	OSPFLike $\rightarrow 0$
$TC \gg E, E \gg D, TV = 1, TT = 0, TA \rightarrow TC$	NLSRLike $\rightarrow 0$
$TC \gg E, E \gg D, TV = 1, TT = 0, TA \rightarrow TC$	CRoS-NDN $\rightarrow 1/(2 + FI)$
$TA = 0, TT = 0, FI = 0$	NLSRLike = CRoS-NDN

tempo de propagação no enlace entre os vizinhos. A soma destes atrasos multiplicado pelo diâmetro da rede fornece o tempo total de convergência.

De forma análoga à *NLSRLike*, a estratégia *CRoS-NDN* adiciona igual sobrecarga de sinalização para monitoração de vizinhança entre vizinhos. Porém, alterações de topologia e novos anúncios de produtor são encaminhados diretamente ao controlador com número de mensagens adicional proporcional ao diâmetro da rede no pior caso. Cada alteração de topologia acarreta também nova inundação de descoberta do controlador, seguida de renovação de registro dos nós com caminho até o controlador afetado, afetando todos os nós no pior caso. Interesses sem registro na FIB demandam ainda consulta ao controlador para obtenção de rota, adicionando a parcela $D \times TC \times FI$. Em relação ao atraso, consultas ou registro de prefixos no controlador são proporcionais a D no pior caso. As alterações de topologia demandam intervalo $\frac{1}{TV}$ para detecção e no máximo $3 \times AE \times D$ adicionais, caso seja necessário localizar novamente o controlador.

$$AT_4 = 0 \quad (5a)$$

⁴*Omniscient, Flooding, ARPLike*

$$AT_{OSPFLike} = \frac{1}{TV} \quad (5b)$$

$$AT_{NLSRLike} = (4 \times AE + \frac{1}{TV}) \times D \quad (5c)$$

$$AT_{CRoS-NDN} = 3 \times AE \times D + \frac{1}{TV} \quad (5d)$$

4.2. Análise de Tendência

A eficiência de sinalização *ES* das estratégias em cenários de crescimento da rede e do número de prefixos distintos de conteúdo é de especial interesse, pois indicam sua escalabilidade. A Tabela 2 resume os resultados obtidos para casos limite. Em particular, avalia-se o crescimento da rede com restrição no crescimento do diâmetro evitando aumento ilimitado do atraso fim a fim. A estratégia *ARPLike* degrada com o aumento da proporção de tráfego sem registros específicos na FIB. Quando o número de prefixos é significativamente superior à memória FIB disponível, perfis de tráfego com baixa correlação entre os prefixos solicitados, $FI \rightarrow 1$, provocam inundações recorrentes.

Em cenários com topologia estável, com número de interesses de consumo TC e de anúncio de conteúdo TA com valor próximo e numericamente muito maior do que a

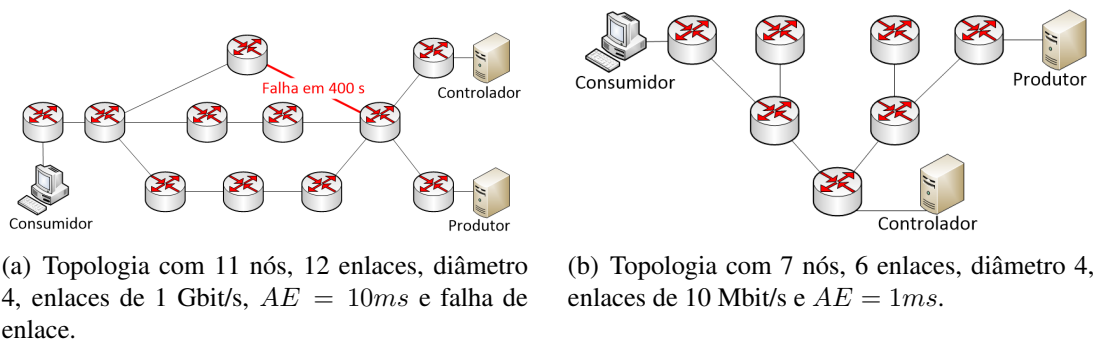


Figura 1. A topologia (a) é utilizada na simulação de verificação de convergência após falha de enlace, ver Figura 3. A topologia (b) é utilizada nas simulações que comparam o desempenho sob influência do número de prefixos, da taxa de interesses, do tamanho da topologia e da taxa de monitoração de vizinhança, ver Figuras 4, 5, 6 e 7 respectivamente.

quantidade de enlaces E , a eficiência ES das estratégias *OSPFLike* e *NLSRLike* tende à zero. Na mesma situação, a eficiência da estratégia *CRoS-NDN* converge para a constante um terço no pior caso.

O último cenário analisado mostra que o desempenho das estratégias *NLSRLike* e *CRoS-NDN* são iguais quando não há novas mudanças de topologia ou novos anúncios de prefixo e todos os conteúdos solicitados já possuem registro na FIB.

4.3. Simulação

As estratégias estudadas foram implementadas no simulador *ndn-SIM* [Afanasyev et al. 2012]. As Figuras 1 a 7 apresentam as topologias utilizadas para obtenção da evolução temporal da eficiência de sinalização ES . Estas curvas permitem verificar também o atraso total, $AD + AA + AT$, associado a cada estratégia. Para suavizar as curvas e permitir legibilidade, a ES foi calculada tomando valores médios do total de pacotes em intervalos de 25 segundos. Todas as curvas têm intervalo de confiança de 95%. O ambiente de simulação acrescenta um salto ao diâmetro total da rede. O salto correspondem ao enlace entre o nó hospedeiro da aplicação e a própria aplicação

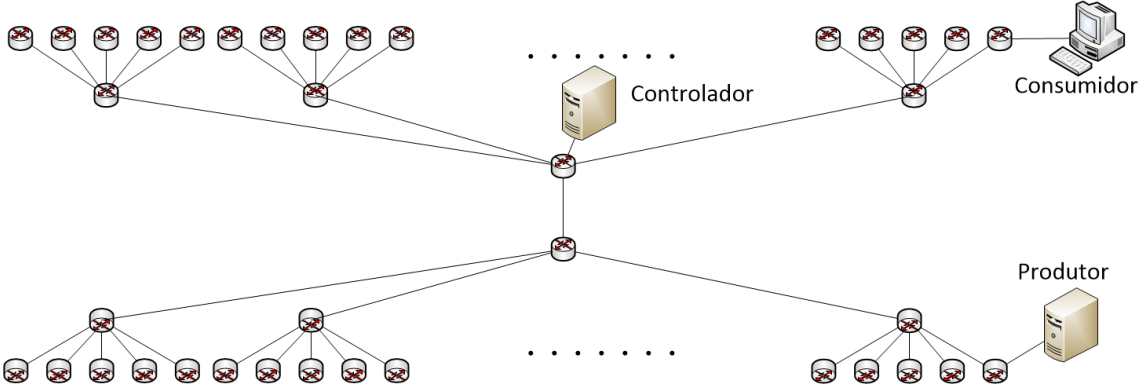


Figura 2. Topologia utilizada na simulação com comparativo de desempenho em função do tamanho da rede, ver Figura 6. Características: 122 nós, 121 enlaces, diâmetro 5, enlaces de 100 Mbit/s, $AE = 10ms$, consumidor e produtor em extremidades opostas, controlador no centro.

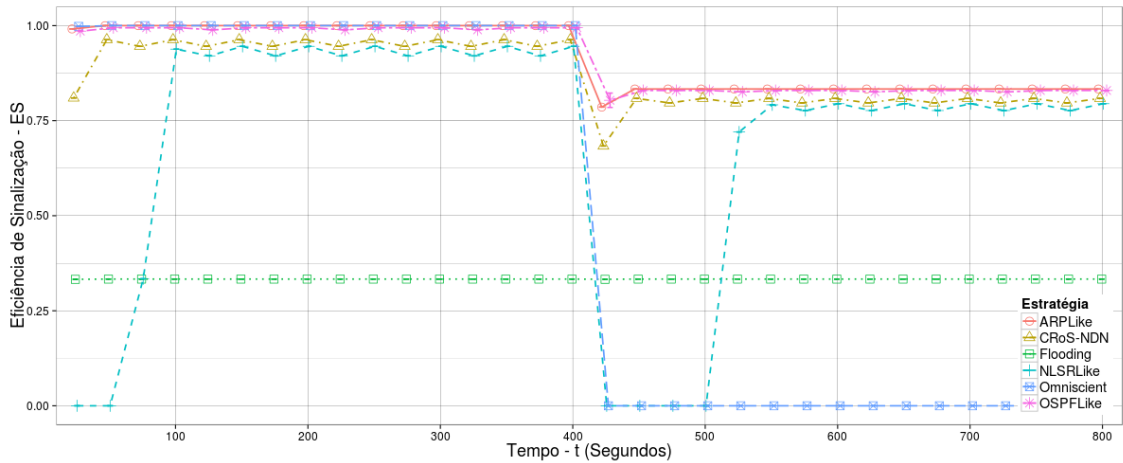
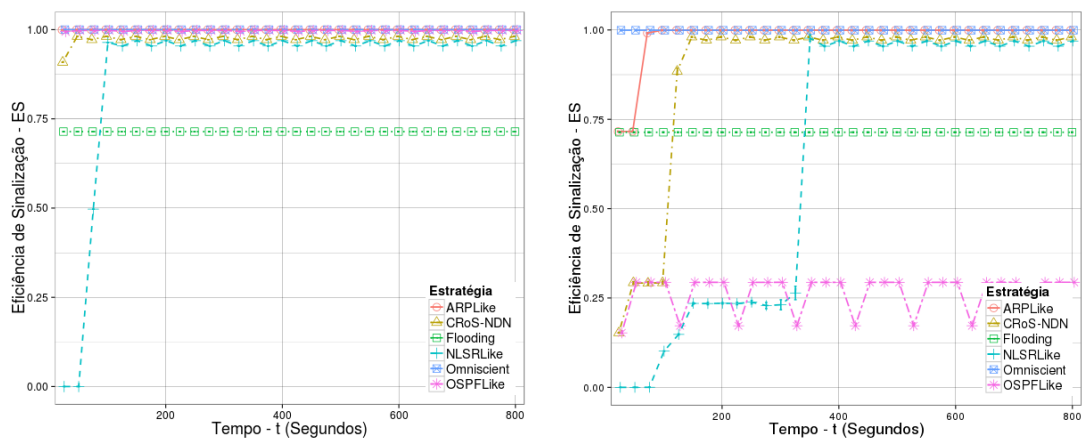


Figura 3. Atraso de convergência inicial e após falha de enlace em 400s utilizando um único prefixo de conteúdo. A estratégia *NLSRLike* apresenta o maior atraso, a *Flooding* o pior *ES*. As demais convergem para valores próximos de *ES*. Parâmetros: topologia de 11 nós da Figura 1(a), $TC = 20$, $FI = 1$ e $TV = 0, 1$.

consumidora de conteúdo. O salto adicional explica a diferença entre os valores obtidos para *ES* pela modelagem analítica e os valores obtidos na simulação. O consumidor busca sempre nomes de conteúdos distintos garantindo que o armazenamento local não interfira nos resultados. Os nós não têm limite de registros na FIB, então a fração de prefixos distintos solicitados *FI* só tem impacto até que todos os prefixos *NP* sejam solicitados.

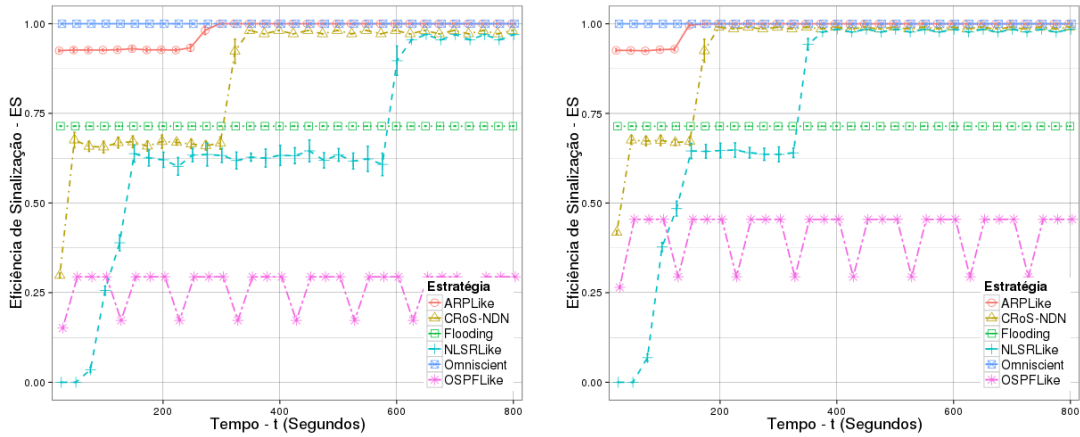
Primeiro avalia-se a consistência da implementação verificando a convergência inicial e em caso de falha de rompimento de enlace. A Figura 3 apresenta o resultado de simulação de falha de rompimento de enlace conforme a topologia da Figura 1(a). A estratégia *Omniscient* não considera caminhos alternativos e a métrica *ES* é calculada utilizando os valores de desempenho *Omniscient* antes da falha. Após a falha, devido ao maior número de saltos no novo caminho entre consumidor e produtor, *ES* resulta em desempenho sempre inferior a um (1). A Figura 3 mostra o maior atraso da estratégia



(a) Um prefixo de conteúdo, $NP = 1$.

(b) Mil prefixos de conteúdo, $NP = 1000$.

Figura 4. Redução da eficiência e aumento do atraso de convergência com aumento do número de prefixos de 1 (a) para 1000 (b). Parâmetros: topologia de 7 nós da Figura 1(b), $TC = 20$, $FI = 1$, $TA = 50$, $TV = 0, 1$ e $TT = 0$.



(a) Taxa de 20 interesses por segundo, $TC = 20$. (b) Taxa de 40 interesses por segundo, $TC = 40$.

Figura 5. Aumento da eficiência de sinalização em função do aumento da taxa de interesses do consumidor de (a) para (b). Parâmetros: topologia de 7 nós da Figura 1(b), $NP = 1000$, $FI = 0,2$, $TA = 50$ e $TV = 0,1$.

NLSRLike para início da entrega de dados ao consumidor e a convergência de todas estratégias para valores próximos de ES , exceto da *Flooding* que sempre inunda a rede. A estratégia *NLSRLike* tem tempo de convergência ainda maior após a falha. A implementação *NLSRLike* não recalcula os registros da FIB a cada nova LSA recebido, mas sob demanda quando não há registro válido na FIB. Esta abordagem diminui a carga computacional, porém aumenta o atraso de convergência devido ao tempo adicional de expiração de entradas sem resposta na PIT e remoção da entrada FIB utilizada.

A Figura 4 compara o desempenho da ES em função do número total de prefixos anunciados e consumidos. As estratégias *Omniscient* e *Flooding* não são afetadas pela variação da quantidade de prefixos. O consumidor inicialmente varre todo o conjunto prefixos antes de repetir prefixos já instalados na FIB, $FI = 1$. A estratégia *ARPLike* tem desempenho inicial igual a *Flooding* até que todos os prefixos são instalados na FIB. O desempenho da estratégia *OSPFLike* degrada em função do aumento do número de prefixos. As estratégias *CRoS-NDN* e *NLSRLike* passam por quatro transições com aumento da ES : numa primeira fase ocorre a convergência de topologia e não há tráfego útil, na segunda fase os prefixos são registrados na rede e prefixos solicitados pela primeira vez disparam o processo de cálculo e instalação de novos registros na FIB, na terceira fase não há novos registros de prefixos e ainda ocorre instalação de novos registros na FIB, na última fase apenas tráfego útil e de monitoração de vizinhança é encaminhando. O registro de prefixos foi configurado para taxa de 50 prefixos por segundo, totalizando 20 segundos para registrar os 1000 prefixos. A instalação de registros na FIB dura 50 segundos utilizando a taxa de consumo de 20 interesses por segundo com $FI = 1$. A estratégia *NLSRLike* é a mais afetada no tempo de convergência pelo aumento do número de prefixos.

A Figura 5 compara o desempenho da ES em função da taxa de interesses enviada pelo consumidor. As estratégias *Omniscient* e *Flooding* não são afetadas. Nas demais estratégias, o aumento da taxa de tráfego útil aumenta a eficiência ES , pois o tráfego de sinalização não se altera. A simulação utiliza $FI = 0,2$, isto implica que o consumidor consome dois novos prefixos a cada dez interesses enviados. Este valor de FI tem dois

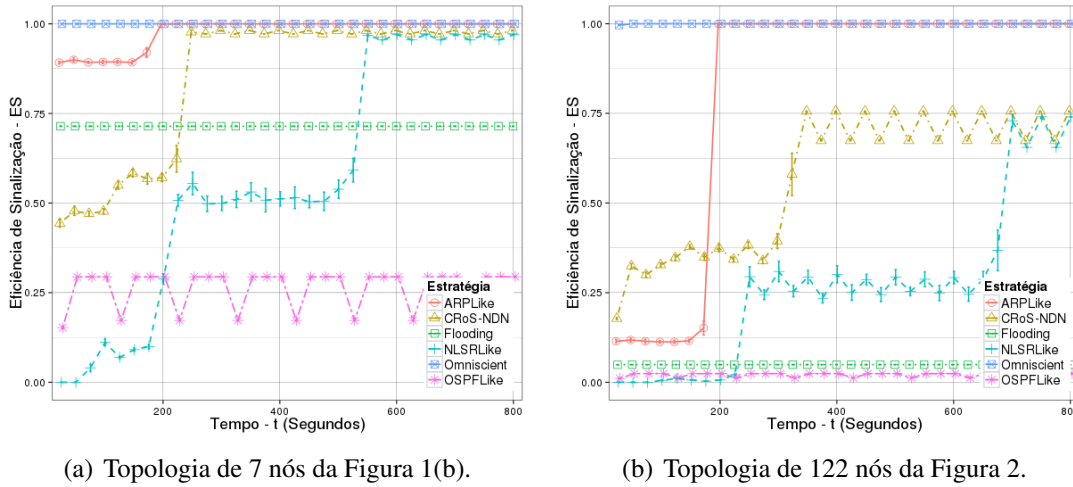


Figura 6. Redução da eficiência e aumento do atraso de convergência em função do aumento do tamanho da topologia de rede de (a) para (b). Parâmetros: $TC = 20$, $NP = 1000$, $FI = 0,3$, $TA = 10$ e $TV = 0,1$.

efeitos: primeiro aumenta o tempo da fase instalação de registros na FIB das estratégias *ARPLike*, *NLSRLike* e *CRoS-NDN*; e, em segundo, aumenta a *ES* nesta fase de instalação de registros na FIB quando comparado com o cenário com $FI = 1$.

A Figura 6 compara o desempenho da *ES* em função da topologia de rede. As estratégias *Flooding* e *OSPFLike* são as mais prejudicadas com o aumento do tamanho da rede. O aumento do diâmetro da rede aumenta mais sensivelmente o tempo de convergência da estratégia *NLSRLike*. Na fase de registro de prefixos, o desempenho *ES* da estratégia *NLSRLike* é quase nulo, pois as novas LSAs são propagadas em um número maior de enlaces gerando maior tráfego de sinalização. Nesta simulação utiliza-se taxa de dez registros de prefixo por segundo, a menor taxa permite melhor visualização desta fase que agora dura cem segundos iniciais.

A Figura 7 compara o desempenho da *ES* em função da taxa de monitoração de vizinhança TV . As estratégias *Ominiscient*, *Flooding* e *ARPLike* não são afetadas pela variação desta taxa. A estratégia *OSPFLike* é mais sensível a variação da TV , sendo que a diminuição desta taxa melhora a *ES*, porém aumenta o tempo de detecção de novos caminhos em caso de falha de enlace. A taxa TV afeta ainda o atraso de convergência das estratégias *NLSRLike* e *CRoS-NDN*, sendo este efeito mais pronunciado na primeira.

As simulações demonstram que a proposta *CRoS-NDN* apresenta tempo de convergência inferior a *NLSRLike* e melhor eficiência *ES* comparada a todas as demais estratégias em função do aumento do tamanho da rede, do número de prefixos e da diversidade de prefixos solicitados. Os resultados estão alinhados com a modelagem analítica.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este artigo propõe a estratégia de localização e encaminhamento em redes orientadas a conteúdo *CRoS-NDN*. Esta proposta utiliza separação dos planos de controle e de dados para rápida convergência e eficiência de sinalização. A *CRoS-NDN* utiliza inundação pontualmente apenas para localizar o controlador reduzindo a sobrecarga de sinalização. Os resultados analíticos e de simulação demonstram que as demais estra-

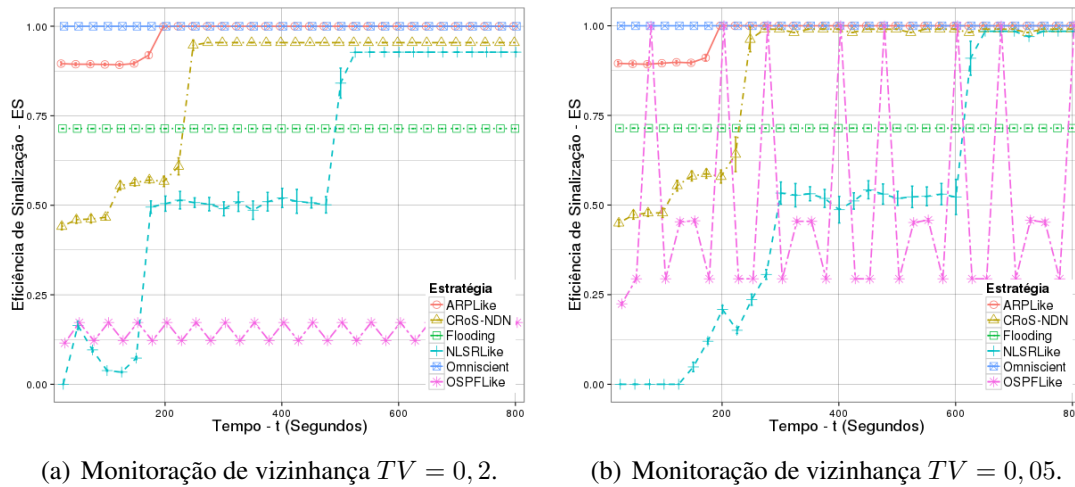


Figura 7. Aumento da eficiência e do atraso de convergência em função da redução da taxa de interesses de conectividade TV de (a) para (b). Parâmetros: topologia de 7 nós da Figura 1(b), $TC = 20$, $NP = 1000$, $FI = 0, 3$ e $TA = 10$.

tégias baseadas em inundação de interesses apresentam rápida convergência no tempo, porém os procedimentos de inundações as tornam não escaláveis em termos de número de prefixos distintos de conteúdo e do número de nós e enlaces na rede. O efeito negativo da inundação de interesses é observado tanto em estratégias proativas que fazem anúncio de prefixos de conteúdo, quanto em estratégias reativas que inundam de forma recorrente a rede em busca de conteúdos específicos.

Além da quantidade de prefixos, verifica-se que a correlação de interesses distintos com igual prefixo de nome tem impacto significativo nas estratégias de inundação reativa da rede, sendo tanto pior o desempenho quanto menor for esta correlação. Este impacto é minimizado na *CRoS-NDN* que evita inundações fazendo consultas diretas ao controlador.

O trabalho também compara o desempenho com a *NLSRLike*, uma estratégia com anúncios de conteúdo de forma proativa e sem inundação recorrente. A eficiência de sinalização da *NLSRLike* é equivalente a *CRoS-NDN* em cenário sem novos anúncios ou alterações de topologia. Contudo, a *CRoS-NDN* tem convergência mais rápida e não exige que cada nó possua memória e processamento para armazenar e calcular localmente as rotas como ocorre na *NLSRLike*.

No conjunto de cenários analisados, a proposta *CRoS-NDN* apresentou um melhor compromisso entre as métricas de desempenho de atraso e de eficiência. Como trabalhos futuros pretende-se ampliar o conjunto de topologias avaliadas e de possibilidades de localização do elemento controlador.

Referências

[Afanasyev et al. 2012] Afanasyev, A., Moiseenko, I., and Zhang, L. (2012). ndnSIM: NDN simulator for NS-3. Technical report, Named-Data Networking Project.

[Baid et al. 2012] Baid, A., Vu, T., and Raychaudhuri, D. (2012). Comparing Alternative Approaches for Networking of Named Objects in the Future Internet. In *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2012 IEEE Conference on*, pages 298 –303.

- [Chiocchetti et al. 2013] Chiocchetti, R., Perino, D., Carofiglio, G., Rossi, D., and Rosini, G. (2013). INFORM: A Dynamic Interest Forwarding Mechanism for Information Centric Networking. In *Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-centric Networking*, ICN '13, pages 9–14, New York, NY, USA. ACM.
- [Fernandes et al. 2011] Fernandes, N., Moreira, M., Moraes, I., Ferraz, L., Couto, R., Carvalho, H., Campista, M., Costa, L., and Duarte, O. (2011). Virtual Networks: Isolation, Performance, and Trends. *Annals of Telecommunications*, 66:339–355.
- [Hoque et al. 2013] Hoque, A. K. M. M., Amin, S. O., Alyyan, A., Zhang, B., Zhang, L., and Wang, L. (2013). NLSR: Named-data Link State Routing Protocol. In *Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-centric Networking*, ICN '13, pages 15–20, New York, NY, USA. ACM.
- [Jacobson et al. 2009] Jacobson, V., Smetters, D. K., Thornton, J. D., Plass, M. F., Briggs, N. H., and Braynard, R. L. (2009). Networking Named Content. In *Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies*, CoNEXT '09, pages 1–12. ACM.
- [Mattos et al. 2011] Mattos, D., Fernandes, N., da Costa, V., Cardoso, L., Campista, M., Costa, L., and Duarte, O. (2011). OMNI: OpenFlow MaNagement Infrastructure. In *Network of the Future (NOF), 2011 International Conference on the*, pages 52–56.
- [McKeown et al. 2008] McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., S., and Turner, J. (2008). OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2):69–74.
- [Perino and Varvello 2011] Perino, D. and Varvello, M. (2011). A reality check for content centric networking. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Information-centric networking*, ICN '11, pages 44–49, New York, NY, USA. ACM.
- [Salsano et al. 2013] Salsano, S., Blefari-Melazzi, N., Detti, A., Morabito, G., and Veltri, L. (2013). Information Centric Networking over SDN and OpenFlow: Architectural Aspects and Experiments on the OFELIA Testbed. *Comput. Netw.*, 57(16):3207–3221.
- [Torres et al. 2013] Torres, J., Ferraz, L., and Duarte, O. (2013). Redes Orientadas a Conteúdo Baseadas em Controladores Hierárquicos. *XXXI SBRC*, pages 717–730.
- [Wang et al. 2012] Wang, L., Hoque, A., Yi, C., Alyyan, A., and Zhang, B. (2012). OSPFN: An OSPF Based Routing Protocol for Named Data Networking. Technical report, University of Memphis and University of Arizona.
- [Xie et al. 2013] Xie, H., Wang, Y., and Wang, G. (2013). Scale content centric networks via reactive routing. In *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pages 3530–3535.
- [Yi et al. 2013] Yi, C., Abraham, J., Afanasyev, A., Wang, L., Zhang, B., and Zhang, L. (2013). On the Role of Routing in Named Data Networking. Technical report, Named-Data Networking Project.
- [Zhu et al. 2013] Zhu, Z., Afanasyev, A., and Zhang, L. (2013). A New Perspective on Mobility Support. Technical report, Named-Data Networking Project.