



Universidade Federal da Bahia
Instituto de Matemática

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

**CACHE COLABORATIVO E DISTRIBUÍDO
COMO SUPORTE À MOBILIDADE DE
PRODUTORES EM REDES SEM FIO DE
DADOS NOMEADOS**

Francisco Renato Cavalcante Araújo

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador
18 de julho de 2018

FRANCISCO RENATO CAVALCANTE ARAÚJO

**CACHE COLABORATIVO E DISTRIBUÍDO COMO SUPORTE À
MOBILIDADE DE PRODUTORES EM REDES SEM FIO DE
DADOS NOMEADOS**

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Leobino Nascimento Sampaio

Salvador
18 de julho de 2018

Sistema de Bibliotecas – UFBA

Araújo, Francisco Renato Cavalcante.

Cache Colaborativo e Distribuído como Suporte à Mobilidade de Produtores em Redes Sem Fio de Dados Nomeados / Francisco Renato Cavalcante Araújo – Salvador, 2018.

83p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Leobino Nascimento Sampaio.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Instituto de Matemática, 2018.

1. Redes de Dados Nomeados. 2. Mobilidade do Produtor. 3. Redes Centradas na Informação. I. Sampaio, Leobino Nascimento. II. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Matemática. III Título.

CDD – XXX.XX

CDU – XXX.XX.XXX

TERMO DE APROVAÇÃO

FRANCISCO RENATO CAVALCANTE ARAÚJO

CACHE COLABORATIVO E DISTRIBUÍDO COMO SUPORTE À MOBILIDADE DE PRODUTORES EM REDES SEM FIO DE DADOS NOMEADOS

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal da Bahia.

Salvador, 18 de julho de 2018

Prof. Dr. Leobino Nascimento Sampaio
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Profa. Dra. Fabíola Gonçalves Pereira Greve
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Prof. Dr. Antonio Marinho Pilla Barcellos
Universidade Federal do Rio Grande do Sul –
UFRGS

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me proporcionado mais uma conquista em minha vida, mesmo diante de todos os obstáculos que tive que superar para que esse sonho se concretizasse.

À minha família, Marilene, Raimundo, Marleide, Lucilene, Marcos, Macilo, Cristiano, Rosileide, Rosilene e Rafaela, pelo apoio e incentivo.

À minha namorada Lívia Gildo pela compreensão e motivação, sua família e em especial à amiga Lúcia Santos pelos inúmeros favores prestados a mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leobino N. Sampaio, por todos os ensinamentos e por sempre ter acreditado no meu potencial (até mais do que eu).

Agradeço, ainda, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, pelo apoio financeiro que me proporcionou cursar o mestrado com dedicação exclusiva.

Aos membros do grupo de pesquisa INSERT.

A todos da turma 2016.1 do PGCOMP, em especial, aos meus amigos Ronaldo e Cíntia pelas dicas, extremamente úteis, após minha chegada e adaptação a Salvador.

Aos amigos do ap. 304, Lucas Amparo e Ricardo Barros.

Ainda, ao meu orientador da graduação, Prof. Paulo A. L. Rego, e ao Prof. Michel S. Bonfim, pelos ensinamentos que me fizeram dar os primeiros passos como pesquisador.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma na minha jornada até aqui.

*“Um pouco de ciência nos afasta de Deus.
Muito, nos aproxima.”*

—LOUIS PASTEUR (1822-1895)

RESUMO

A utilização da Internet vem sofrendo grandes transformações, a quantidade de dispositivos e conexões está com o ritmo de crescimento acelerado, fatos não planejados no projeto de arquitetura da rede. Como consequência, a popularização dos dispositivos móveis está acarretando o aumento da demanda de Internet móvel e uma sobrecarga nas redes de acesso. Diante dos desafios impostos pelas comunicações emergentes, as Redes de Dados Nomeados (do inglês, *Named Data Networking* (NDN)) foram propostas para resolver os problemas enfrentados na rede atual, através de um modelo de comunicação centrado no conteúdo, em que os consumidores emitem interesses na rede em busca de dados que são gerados pelos produtores. A NDN suporta a mobilidade dos consumidores por intermédio da própria arquitetura, no entanto, o suporte à mobilidade dos produtores ainda representa um desafio, devido aos danos causados à rede, sobretudo, no período de indisponibilidade do produtor. Desse modo, este trabalho propõe a SCaN-Mob, uma nova estratégia de suporte à mobilidade de produtores em NDN. A SCaN-Mob se utiliza do armazenamento em *cache* nos dispositivos da rede local, com o objetivo de auxiliar os produtores a disseminar seus dados entre os nós vizinhos, de modo a manter na *cache* dos dispositivos os dados oriundos dos produtores mais propensos a efetuarem *handoff*. Assim, obtém-se uma maior diversidade de conteúdos na rede, o que aumenta as chances de resposta aos interesses que chegam no período de ausência do produtor. As principais contribuições deste trabalho são: i) uma política de substituição de *cache* que pode atuar com diferentes critérios de priorização de dados; e ii) uma estratégia de encaminhamento de pacotes que visa controlar o efeito da inundação de pacotes na rede. A proposta foi implementada no simulador ndnSIM e foi submetida a uma análise detalhada, comparando-a com a NDN padrão, sob diferentes métricas. Os resultados alcançados comprovam ganhos de até 35,32% na taxa de satisfação de interesses, mesmo com a indisponibilidade do produtor, e com uma redução de 56,23% no tempo para a obtenção de dados.

Palavras-chave: Armazenamento Oportunista. *Cache* Colaborativo. Produtor Móvel. Redes de Dados Nomeados. Redes Sem Fio. Redes Centradas na Informação.

ABSTRACT

The use of the Internet has undergone major transformations, the number of devices and connections is with the pace of accelerated growth, unplanned facts in the network architecture project. As a result, the popularization of mobile devices is leading to increased demand for mobile Internet and an overload in access networks. Faced with the challenges posed by emerging communications, Named Data Networking (NDN) were proposed to solve the problems faced in the current network, through a content-centric communication model, in which consumers request interests in the network in search of data that are generated by the producers. NDN supports the mobility of consumers through the architecture itself, however, support for the mobility of producers still poses a challenge, due to the damage to the network, especially during the period of unavailability of the producer. In this way, this work proposes SCaN-Mob, a new strategy to support the mobility of producers in NDN. SCaN-Mob uses caching on local network devices to help producers disseminate their data between neighboring nodes, to maintain in the device cache the data from the producers most likely to perform handoff. Thus, a greater diversity of contents in the network is obtained, which increases the chances of responding to the interests that arrive in the absence period of the producer. The main contributions of this work are: i) a cache replacement policy that can act with different data prioritization criteria; and ii) a packet forwarding strategy to control the effect of packet flooding on the network. The proposal was implemented in the ndnSIM simulator and was submitted to a detailed analysis, comparing it with the naive NDN, under different metrics. The results obtained show gains of up to 35.32% in the interest satisfaction rate, even with the unavailability of the producer, and a reduction of 56.23% in the time to obtain data.

Keywords: Opportunistic Caching. Collaborative Cache. Mobile Producer. Named Data Networking. Wireless Networks. Information-Centric Networking.

SUMÁRIO

Capítulo 1—Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	2
1.3 Problema	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo Geral	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
1.5 Metodologia	5
1.6 Contribuições	6
1.7 Organização do Trabalho	6
Capítulo 2—Redes Centradas na Informação	7
2.1 Fundamentos de ICN	7
2.2 Projetos de ICN	10
2.2.1 Principais Projetos e Arquiteturas	12
2.3 Redes de Dados Nomeados	14
2.3.1 Nomeação	18
2.3.2 Resolução de Nomes e Roteamento de Conteúdo	19
2.3.3 Armazenamento em <i>Cache</i>	21
2.3.4 Segurança	22
2.3.5 Mobilidade	22
2.4 Abordagens de Mobilidade de Produtores em NDN	24
2.4.1 Perseguição do Produtor – Baseada em Mapeamento	25
2.4.2 Perseguição do Produtor – Baseada em Rastreamento	27
2.4.3 Encontro de Dados – Baseado em Depósito de Dados	28
2.4.4 Encontro de Dados – Baseado em Local de Dados	29
2.5 Considerações Finais do Capítulo	29
Capítulo 3—Trabalhos Relacionados	31
3.1 Soluções Puramente NDN	31
3.2 Soluções Baseadas no MIP	33
3.3 Soluções na Borda para Outros Fins	34
3.4 Considerações Finais do Capítulo	35

Capítulo 4—Solução SCaN-Mob	37
4.1 Visão Geral da SCaN-Mob	37
4.2 Pacotes da SCaN-Mob	39
4.3 Estratégia de Encaminhamento	40
4.4 Camada de Estratégia	42
4.4.1 Seleção do Nó para Armazenamento	42
4.4.2 Cálculo de Prioridade dos Dados	45
4.5 Política de Substituição de <i>Cache</i>	46
4.6 Considerações Finais do Capítulo	47
Capítulo 5—Avaliação Experimental	49
5.1 Simulação	49
5.1.1 Seleção de Simuladores	49
5.1.2 Resultados Iniciais	51
5.2 Cenário de Avaliação	52
5.3 Metodologia de Avaliação	54
5.3.1 Projeto Fatorial Completo	56
5.3.2 Projeto Fatorial com Redução de Fatores	58
5.3.3 Métricas de Desempenho	59
5.4 Análise dos Resultados	60
5.4.1 Avaliação da Taxa de Interesses Satisfeitos	60
5.4.2 Avaliação da Taxa de Acerto na <i>Cache</i>	63
5.4.3 Avaliação da Taxa de Erro na <i>Cache</i>	64
5.4.4 Avaliação da Taxa de Interesses Expirados	64
5.4.5 Avaliação do Atraso na Obtenção de Dados	67
5.4.6 Avaliação da Sobrecarga de Pacotes na Rede	69
5.4.7 Avaliação da Taxa de Descarte de Pacotes	73
5.5 Considerações Finais do Capítulo	73
Capítulo 6—Conclusões e Trabalhos Futuros	75
6.1 Discussões	76
6.2 Trabalhos Futuros	77

LISTA DE FIGURAS

2.1	Comunicação IP versus ICN. A arquitetura IP orientada à localização (a) e a ICN orientada a conteúdo (b).	8
2.2	Comunicação IP versus ICN. A arquitetura IP com entrega <i>unicast</i> (a) e a ICN com entrega <i>multicast</i> (b).	9
2.3	Linha do tempo dos projetos de arquiteturas ICN. Adaptado de Xylomenos et al. (2014) e Liu et al. (2017).	11
2.4	Os principais componentes da arquitetura CCN são pedaços de conteúdo nomeado, em contraste com a unidade fundamental de comunicação da arquitetura IP. Traduzido de Jacobson et al. (2009) e Zhang et al. (2014).	16
2.5	Pacotes da arquitetura CCN.	17
2.6	Exemplo da nomeação de dados. Adaptado de Jacobson et al. (2009).	18
2.7	Processo de encaminhamento em um nó da NDN. Adaptado de Zhang et al. (2014).	20
2.8	Abordagem baseada em mapeamento, o papel do ponto de encontro. Adaptado de Zhang et al. (2016).	26
2.9	Abordagem baseada em rastreamento do produtor. Adaptado de Zhang et al. (2016).	27
2.10	Abordagem baseada em depósito de dados. Adaptado de Zhang et al. (2016).	28
2.11	Abordagem baseada em local de dados. Adaptado de Zhang et al. (2016).	29
4.1	Modificações na arquitetura da NDN.	38
4.2	Formato dos pacotes da SCA-N-Mob.	39
4.3	Fluxograma da estratégia de encaminhamento proposta.	41
4.4	Alcance do sinal do AP representado pela área virtual <i>A</i> e área real <i>B</i>	44
5.1	Topologia da rede. Caso 1: consumidor móvel (Nó 5) e produtor estático (Nó-A), e caso 2: o inverso (ARAÚJO; SAMPAIO, 2017).	51
5.2	Caso 1: consumidor móvel e produtor estático (ARAÚJO; SAMPAIO, 2017).	52
5.3	Caso 2: consumidor estático e produtor móvel (ARAÚJO; SAMPAIO, 2017).	52
5.4	Cenário de avaliação da proposta.	53
5.5	Representatividade dos fatores do projeto fatorial completo.	58
5.6	Taxa de satisfação de interesses com um produtor em <i>handoff</i>	61
5.7	Taxa de satisfação de interesses com cinco produtores em <i>handoff</i>	61
5.8	Taxa de satisfação de interesses com nove produtores em <i>handoff</i>	62
5.9	Visão geral da taxa de satisfação de interesses com um, cinco e nove produtores em <i>handoff</i>	62

5.10	Visão geral da taxa de satisfação de interesses por consumidor (ARAÚJO; SOUSA; SAMPAIO, 2018).	63
5.11	Visão geral da taxa de acertos na <i>cache</i> com a variação dos produtores em <i>handoff</i>	64
5.12	Visão geral da taxa de erros na <i>cache</i> com a variação dos produtores em <i>handoff</i>	65
5.13	Taxa de interesses expirados com um (a), cinco (b) e nove (c) produtores em <i>handoff</i>	66
5.14	Visão geral da taxa de interesses expirados com a variação dos produtores em <i>handoff</i>	66
5.15	Atraso com um produtor em <i>handoff</i>	67
5.16	Atraso com cinco produtores em <i>handoff</i>	68
5.17	Atraso com nove produtores em <i>handoff</i>	68
5.18	Visão geral do atraso com um, cinco e nove produtores em <i>handoff</i>	69
5.19	Atraso geral para obter dados por consumidor (ARAÚJO; SOUSA; SAMPAIO, 2018).	69
5.20	Visão geral da taxa de interesses encaminhados na WLAN com a variação dos produtores em <i>handoff</i>	70
5.21	Visão geral da taxa de dados encaminhados na WLAN com a variação dos produtores em <i>handoff</i>	71
5.22	Visão geral da taxa de <i>nacks</i> e sondas encaminhados na WLAN com a variação dos produtores em <i>handoff</i>	72
5.23	Tráfego geral de pacotes encaminhados na WLAN (ARAÚJO; SOUSA; SAMPAIO, 2018).	72
5.24	Visão geral da taxa de descarte de dados com a variação dos produtores em <i>handoff</i>	73

LISTA DE TABELAS

2.1	Comparativo das arquiteturas ICN. Adaptado de Xylomenos et al. (2014).	15
2.2	Abordagens de mobilidade do produtor. Adaptado de Zhang et al. (2016).	25
5.1	Avaliação de simuladores.	50
5.2	Parâmetros da Simulação.	55
5.3	Fatores e níveis do projeto fatorial completo.	56
5.4	Formação dos cenários, após a combinação dos níveis dos fatores.	59

LISTA DE SIGLAS

AP	<i>Access Point</i>	33
AS	<i>Autonomous Systems</i>	12
BGP	<i>Border Gateway Protocol</i>	20
CBMEN	<i>Content-Based Mobile Edge Networking</i>	12
CCN	<i>Content-Centric Networking</i>	10
CDN	<i>Content Delivery Network</i>	8
CONNECT	<i>Content-Oriented Networking: a New Experience for Content Transfer</i>	12
COMET	<i>Content Mediator architecture for content-aware nETworks</i>	10
COMIT	<i>Content Management at Internet Scale</i>	12
CR	<i>Content Router</i>	13
CS	<i>Content Store</i>	17
DONA	<i>Data Oriented Network Architecture</i>	10
DoS	<i>Denial of Service</i>	21
DHT	<i>Distributed Hash Table</i>	13
DNS	<i>Domain Name System</i>	12
FIA	<i>Future Internet Architectures</i>	10
FIA-NP	<i>Future Internet Architectures – Next Phase</i>	10
FIB	<i>Forwarding Information Base</i>	17
FIFO	<i>First-In First-Out</i>	43
5G	<i>Fifth Generation</i>	1
4G	<i>Fourth Generation</i>	1
GPS	<i>Global Positioning System</i>	29
I-CAN	<i>Information-Centric future mobile and wireless Access Networks</i>	12
ICN	<i>Information Centric Networking</i>	7
ICNRG	<i>Information-Centric Networking Research Group</i>	10
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>	50
I3	<i>Internet Indirection Infrastructure</i>	10
IoT	<i>Internet of Things</i>	35

IP	<i>Internet Protocol</i>	8
IRTF	<i>Internet Research Task Force</i>	10
IS-IS	<i>Intermediate System to Intermediate System</i>	20
LCE	<i>Leave Copy Everywhere</i>	21
LFU	<i>Least Frequently Used</i>	18
LRU	<i>Last Recently Used</i>	18
LTE	<i>Long Term Evolution</i>	77
MAC	<i>Media Access Control</i>	40
MANET	<i>Mobile Ad hoc Network</i>	34
MIP	<i>Mobile IP</i>	24
MRU	<i>Movimiento Retilíneo Uniforme</i>	45
MRU	<i>Most Recently Used</i>	17
NIT	<i>Neighbors Identification Table</i>	38
NSF	<i>National Science Foundation</i>	9
NDN	<i>Named Data Networking</i>	7
NetInf	<i>Network of Information</i>	13
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i>	20
PARC	<i>Palo Alto Research Center</i>	14
PIT	<i>Pending Interest Table</i>	17
PSIRP	<i>Publish-Subscribe Internet Routing Paradigm</i>	10
P2P	<i>Peer-to-Peer</i>	8
PURSUIT	<i>Publish-Subscribe Internet Technology</i>	10
RH	<i>Resolution Handler</i>	12
ROFL	<i>Routing on Flat Labels</i>	10
SAIL	<i>Scalable and Adaptive Internet soLutions</i>	10
SCaN-Mob	<i>Shared Caching in Named Data Networking Mobile</i>	31
SDN	<i>Software Defined Networking</i>	33
FP7	<i>Seventh Framework Program</i>	9
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>	12
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>	12
VDI	<i>Versatile Digital Item</i>	13
VRR	<i>Virtual Ring Routing</i>	10
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>	52

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A quantidade e as características dos dispositivos conectados à Internet, a forma de acesso e o perfil dos usuários mudaram significativamente nos últimos anos. Além disso, as previsões mostram que esse quadro de mudança tende a continuar. De acordo com a Cisco (2017), o tráfego global de dados móveis cresceu 63% no ano de 2016, alcançando a marca de 7,2 *exabytes* nos meses finais do mesmo ano, algo equivalente ao total de 4,4 *exabytes* a mais se comparado ao igual período do ano anterior. A perspectiva é que esse crescimento continue, atingindo o valor de 49 *exabytes* mensais até 2021. Esse aumento é justificado pela popularização dos dispositivos portáteis (e.g., *smartphones*, *tablets*, *notebooks*), a expansão de aplicações de voz e vídeo (e.g., Netflix, Youtube e realidade virtual e aumentada), a implantação de redes móveis mais rápidas (e.g., as redes de quarta e quinta geração (do inglês, *Fourth Generation* (4G) e *Fifth Generation* (5G)), respectivamente), entre outros fatores (CISCO, 2017).

Segundo Xu et al. (2018), o aumento da popularidade dos dispositivos móveis está provocando um crescimento intenso na demanda por serviço de Internet móvel e uma sobrecarga nas redes de acesso. Tais fatos evidenciam as transformações na forma de utilização da Internet. Entretanto, enquanto estão previstas ainda mais mudanças no padrão de consumo de dados, a arquitetura da Internet permanece a mesma de sua concepção, exceto pela inserção, ao longo dos anos, de tecnologias que funcionam como reparos, numa tentativa de se adequar às novas demandas. No entanto, além de ser questionável o limite da inserção de reparos à arquitetura, muitas exigências atuais e emergentes ainda não podem ser atendidas adequadamente pela Internet atual (XYLOMENOS et al., 2014).

Diante dos novos requisitos impostos pelos dispositivos e aplicações emergentes em torno da utilização da Internet, esforços em pesquisas têm sido dirigidos para a concepção de um novo paradigma de comunicação, centrado no conteúdo (do inglês, *content-centric*), em vez do modelo atual empregado na Internet que é centrado nos dispositivos finais (do inglês, *host-centric*). Nesse âmbito, as Redes Centradas na Informação (do

inglês, *Information Centric Networking* (ICN)) foram propostas como um modelo de arquitetura *clean-slate*¹ para a Internet do Futuro (LUO; EYMANN; TIMM-GIEL, 2015), visando resolver os crescentes desafios de tráfego oriundos, principalmente, de aplicações emergentes orientadas a conteúdo (FARAHAT; HASSANEIN, 2016).

1.2 MOTIVAÇÃO

De acordo com Luo, Eymann e Timm-Giel (2015), uma arquitetura de ICN que ganhou destaque nos últimos anos, foi as denominadas Redes Centradas no Conteúdo (do inglês, *Content-Centric Networking* (CCN)), originalmente apresentada por Jacobson (2006). A CCN engloba vários dos aspectos considerados importantes esperados de uma arquitetura para a Internet do Futuro. Além disso, deu origem a várias pesquisas direcionadas ao paradigma *content-centric*, incluindo o projeto de Redes de Dados Nomeados (do inglês, *Named Data Networking* (NDN)) descrito em Zhang et al. (2014) e mantido por NDN (2010).

Segundo Farahat e Hassanein (2016), dentre as notórias propostas de arquiteturas de ICN, destaca-se o projeto NDN. O objetivo principal da NDN é evoluir a função da arquitetura atual baseada no protocolo da Internet (do inglês, *Internet Protocol* (IP)), de modo que os pacotes possam nomear os conteúdos ao invés de dispositivos finais. Porém, surge na NDN o desafio de questões relacionadas à mobilidade dos nós, nos aspectos referentes à localização e rastreamento dos conteúdos na rede em vez de *hosts* identificados com endereço IP.

Na literatura, os termos CCN e NDN, muitas vezes, são usados para representar o paradigma *content-centric*. No entanto, NDN é um projeto que adota como base a arquitetura CCN e visa, através de um consórcio de pesquisa para o desenvolvimento da Internet do Futuro (NDN, 2010), evoluir a arquitetura CCN proposta em Jacobson et al. (2009). Portanto, na presente dissertação a NDN é tratada como uma evolução da CCN, assim como na literatura.

Grande parte das abordagens existentes, que estendem a NDN para o apoio à mobilidade, são centradas no *host*, o que entra em conflito com os princípios da NDN e fornecem apoio limitado à mobilidade dos produtores (LEHMANN; BARCELLOS; MAUTHE, 2016). Além disso, a maioria dos esquemas propostos usam técnicas reativas para se recuperar após um evento de mobilidade dos nós (FARAHAT; HASSANEIN, 2016). Outro ponto em destaque é que os esquemas propostos ignoram a capacidade computacional dos dispositivos da borda da rede (ARAÚJO; SOUSA; SAMPAIO, 2018). No entanto, atualmente os dispositivos móveis oferecem uma grande quantidade de recursos computacionais, que permanecem subutilizados por boa parte do tempo de atividade e, na maioria das vezes, esses dispositivos ficam ociosos (XU et al., 2018). Além de tudo, os dispositivos contam com o aumento contínuo dos recursos de processamento, armazenamento e opções de conectividade sem fio (PANWAR et al., 2017).

De acordo com a Cisco (2017), o número total de *smartphones* (incluindo *phablets*) corresponderá a mais da metade dos dispositivos e conexões globais até 2021, alcançando

¹Refere-se à proposição de ideias inovadoras, que desconsidera técnicas e/ou conceitos pré-concebidos e rompe com as tecnologias atuais (BRITO; VELLOSO; MORAES, 2012).

uma média de 1,5 dispositivos móveis *per capita*. Dessa forma, investigar os problemas relacionados à mobilidade dos nós é um requisito fundamental para o sucesso da Internet do Futuro, tornando indispensável uma arquitetura de rede adequada às demandas do novo modelo de acesso aos dados.

1.3 PROBLEMA

O projeto precursor da CCN (JACOBSON et al., 2009), deixa implícito que a mobilidade dos nós produtores é suportada intrinsecamente pela arquitetura. No entanto, Farahat e Hassanein (2016) destacam que o pressuposto de que a mobilidade é suportada intrinsecamente é impraticável. Os autores afirmam que um projeto de um sistema de gerenciamento de mobilidade é inevitável para o sucesso da NDN. Além disso, a capacidade de os usuários de mover-se entre redes (i.e., processo chamado *handoff* ou *handover*), sem afetar o desempenho das aplicações é essencial para a implantação dessas redes.

Embora a CCN suporte a mobilidade do consumidor (i.e., aquele que requisita os dados), não fornece o suporte adequado à mobilidade do produtor (i.e., aquele que gera os dados) (HUYNH et al., 2017; ZHANG et al., 2016; LEHMANN; BARCELLOS; MAUTHE, 2016). Para gerenciar a mobilidade do produtor, a CCN básica propôs algoritmos para atualizar as informações de roteamento em todos os roteadores (JACOBSON et al., 2009). Dessa forma, o nome do conteúdo, cujo prefixo identifica o domínio referente à localização do nó, não sofre alterações, mesmo que o produtor mude de rede. Em vez disso, as entradas para as interfaces nas tabelas de roteamento dos roteadores devem ser atualizadas para alcançar o novo domínio do produtor móvel, portanto, o consumidor continua a solicitar interesses com o mesmo prefixo. No entanto, na medida que há uma expansão na dimensão da rede, ocorre uma poluição nas tabelas dos roteadores com as informações de roteamento sobre a nova localização do produtor, o que compromete a escalabilidade e o desempenho da rede (HUYNH et al., 2017; XYLOMENOS et al., 2014; GAO et al., 2017).

Para Lehmann, Barcellos e Mauthe (2016), a mobilidade dos produtores pode ser classificada em dois períodos distintos: indisponibilidade e reconexão. Enquanto o primeiro período é caracterizado pela falta de conectividade de rede do produtor móvel durante o seu movimento, o último refere-se ao processo de reunir a rede e restaurar a conectividade do produtor. Segundo os autores, o período de indisponibilidade representa um desafio de pesquisa mais relevante, pois necessita de suporte adequado na NDN atual. O último período, em contraste, pode ser razoavelmente tratado através de mensagens de anúncio emitidas pelos protocolos de roteamento.

Alguns trabalhos recentes na literatura investigaram técnicas para prover a mobilidade em CCN/NDN. Para Gao e Zhang (2016), a mobilidade dos produtores é desafiadora devida à dupla semântica do nome do conteúdo que representa seu identificador e localizador. Para Farahat e Hassanein (2016), um dos principais desafios na NDN é apoiar uma operação sem interrupção durante a mobilidade. Em Luo, Eymann e Timm-Giel (2015), são apresentados os problemas de mobilidade na CCN para as aplicações em tempo real. Em Lehmann, Barcellos e Mauthe (2016), os autores consideram a mobilidade do usuário como uma das limitações mais relevantes a serem abordadas. Para Ge et al. (2016) e

Zhang et al. (2016), o apoio à mobilidade do produtor em NDN permanece um desafio de pesquisa em aberto, que carece de ser investigado.

Diante das questões e previsões apresentadas, é possível notar que o modelo de acesso à Internet vem se modificando nos últimos anos, deixando de ser uma comunicação fim a fim entre duas máquinas finais para um modelo orientado a conteúdo. Além disso, o aumento do tráfego na rede e as características dos dispositivos, que em breve passarão a ser móveis em maioria (CISCO, 2017), representam um desafio para as redes atuais. Com o intuito de atender as novas demandas da Internet, as ICN foram propostas tendo destaque as arquiteturas CCN e NDN, no entanto, surge o problema da mobilidade do produtor. Neste contexto, esta dissertação investiga a seguinte questão de pesquisa: **Como prover o suporte à mobilidade do produtor de conteúdo em NDN, de modo a minimizar os efeitos negativos causados à rede e aos usuários finais?**

Em decorrência da questão levantada foi proposta a *Shared Caching in Named Data Networking Mobile* (SCaN-Mob), uma estratégia de armazenamento em *cache* compartilhado nos dispositivos em NDN. A SCaN-Mob visa auxiliar os produtores a disseminar seus conteúdos na rede local, de modo a manter na *cache* dos dispositivos os conteúdos oriundos dos produtores mais propensos a efetuarem *handoff*. Para isso, se utiliza da descoberta (i.e., *scan*) de vizinhos, da priorização de conteúdos dos produtores em *handoff* e de uma política de *cache* que cumpre tais requisitos. Além disso, se utiliza de uma estratégia de encaminhamento de pacotes que controla o problema do *broadcast storm* na rede.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver uma solução para possibilitar o suporte à mobilidade dos nós produtores de conteúdo na NDN, de modo a reduzir os efeitos causados pela indisponibilidade do produtor durante o *handoff* na rede.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Identificar na literatura as principais técnicas utilizadas para prover o suporte à mobilidade em ICN;
2. Avaliar alguns dos principais simuladores de redes, baseados em eventos discretos, de código aberto, utilizados em trabalhos que envolvem as ICN;
3. Especificar e implementar um cenário de redes móveis no simulador melhor avaliado;
4. Elaborar uma estratégia de suporte à mobilidade de nós produtores de conteúdo, de modo a minimizar os prejuízos causados à rede;
5. Implementar a estratégia proposta no simulador escolhido;
6. Analisar o comportamento da solução desenvolvida, de acordo com métricas, fatores e níveis apropriados;

7. Apresentar e divulgar os resultados obtidos, ao decorrer desta pesquisa, à comunidade científica.

1.5 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizado um extenso estudo bibliográfico, nas principais bases de dados da área de ciência da computação (e.g., IEEE², ACM³ e Elsevier⁴), a cerca de ICN. Ao longo desse estudo pode-se averiguar que as abordagens de CCN e, da sua sucessora, NDN se destacam dentre as demais, como retratam os estudos de Ioannou e Weber (2016) e Gao et al. (2017). Após obter essas primeiras informações, a pesquisa teve seu foco direcionado para tais abordagens, com o intuito de listar os principais problemas de pesquisa relevantes na área. Dessa forma, observou-se que os problemas tendem a se agrupar em torno de questões típicas, como: mobilidade, segurança, transporte, nomeação, roteamento, entre outras, como mostra o trabalho de Xylomenos et al. (2014).

Dentre os principais tópicos de pesquisa em aberto, optou-se por investigar a mobilidade em NDN, em razão dos fatos já apresentados nas seções anteriores. Alguns trabalhos já foram propostos com essa temática, no entanto, diversos outros sugerem que a questão da mobilidade em NDN precisa ser melhor investigada. Com o andamento da pesquisa, notou-se que a fase de indisponibilidade do produtor de conteúdo acarreta danos à rede e aos consumidores, excedendo a fase de reconexão do produtor, essa questão foi levantada por Lehmann, Barcellos e Mauthe (2016) e também estudada em Araújo e Sampaio (2017).

Uma vez identificada a problemática, iniciaram-se os estudos voltados à elaboração de uma solução que proporcionasse uma melhoria no desempenho da rede quanto à mobilidade dos produtores. Além disso, foi iniciado o planejamento de um cenário, para validar a proposta, que abrangesse dispositivos móveis, nesse caso como em Gao et al. (2017), optou-se por um ambiente de redes locais sem fio (do inglês, *Wireless Local Area Network* (WLAN)) infraestruturadas.

A fim de validar a pesquisa, foi considerada a viabilidade das três técnicas básicas de validação de pesquisas científicas: medição, modelagem analítica e simulação (JAIN, 1991). Devido à característica inovadora das ICN que remodelam a pilha de protocolos da Internet e, até mesmo, o *hardware* dos equipamentos de rede, a técnica de medição se tornou inviável, uma vez que requer elementos reais na infraestrutura da rede, os quais são escassos e encontram-se em fase de estudo em grandes centros de pesquisa. A técnica de modelagem analítica, por sua vez, apresenta-se complexa para modelar ambientes dinâmicos de redes e, além disso, possui uma alta abstração da realidade. Por outro lado, a técnica de simulação apresenta baixo custo, alta acurácia, além de alta portabilidade de algoritmos simulados para o sistema real. Por essas razões, a validação da proposta foi realizada por meio de simulação.

²*IEEE Xplore Digital Library*. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>. Último acesso em 12 de março de 2018.

³*ACM Digital Library*. Disponível em: <https://dl.acm.org/>. Último acesso em 12 de março de 2018.

⁴*Compendex Engineering Index*. Disponível em: <https://www.engineeringvillage.com/search/quick.url>. Último acesso em 12 de março de 2018.

Após a escolha da técnica de validação da proposta, foi realizada uma pesquisa sobre os simuladores de redes baseados em eventos discretos, os quais são caracterizados por garantir que mudanças estocásticas no estado do sistema ocorrerão apenas em pontos discretizados do tempo. Posteriormente, foi realizada uma avaliação de alguns simuladores de código aberto. Tal avaliação foi composta pelos simuladores ndnSIM⁵, OMNeT++⁶ e ccnSim⁷. O simulador ndnSIM foi considerado o mais adequado para o desenvolvimento desta pesquisa segundo as análises realizadas.

Em seguida, houve um minucioso estudo na documentação do ndnSIM (MASTORAKIS et al., 2016) e a partir disso, tiveram início as especificações e o desenvolvimento do cenário e da proposta. Ao fim dessa etapa, foi planejada uma criteriosa análise de desempenho (JAIN, 1991) da solução. Após isso, os experimentos foram iniciados para gerar os arquivos de *logs* que em seguida, por se tratar de uma pesquisa experimental, foram submetidos a um procedimento de avaliação sob uma análise quantitativa de dados.

1.6 CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições desta dissertação são as seguintes:

- Uma política de substituição de *cache* baseada na prioridade dos conteúdos;
- Uma estratégia de encaminhamento de pacotes responsável por minimizar os efeitos do *broadcast storm*;
- Atribuição de prioridades aos conteúdos, de acordo com o cálculo da predição do tempo de permanência dos produtores na rede;
- Avaliação da proposta em um cenário de redes locais sem fio no modelo de infraestrutura.

1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O restante do texto está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2, é apresentado o referencial teórico que fundamenta esta pesquisa. Os trabalhos relacionados são apresentados e discutidos no Capítulo 3. A solução proposta é apresentada em detalhes no Capítulo 4. O ambiente de simulação, a avaliação da proposta e os resultados alcançados estão apresentados no Capítulo 5 e, por fim, as conclusões obtidas e as discussões de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

⁵<http://ndnsim.net/2.3/>. Após o início desta pesquisa foi lançada a versão 2.4 desse simulador, que atualmente encontra-se na versão 2.5. Disponível em: <http://ndnsim.net/current/>.

⁶<https://www.omnetpp.org/>.

⁷<https://perso.telecom-paristech.fr/drossi/code/ccnSim/>.

REDES CENTRADAS NA INFORMAÇÃO

A Internet foi projetada há algumas décadas, voltada para um público seletivo de usuários especializados que se utilizavam de uma quantidade limitada de máquinas com recursos computacionais restritos. Tais condições favoreciam a troca segura de informações entre as partes envolvidas que eram confiáveis. Entretanto, a popularização dos dispositivos e aplicações trouxeram desafios antes inexistentes para a Internet. Dessa forma, as Redes Centradas na Informação (do inglês, *Information Centric Networking* (ICN)) foram propostas considerando a nova realidade a respeito das exigências impostas à rede, visando resolver os desafios enfrentados pelas redes atuais.

Nesse âmbito, neste capítulo são abordadas as questões sobre o surgimento e as direções das ICN (Seção 2.1), a discussão de suas principais abordagens, dando ênfase no paradigma das Redes de Dados Nomeados (do inglês, *Named Data Networking* (NDN)), respectivamente nas Seções 2.2 e 2.3. Em seguida, apresentam-se as abordagens de mobilidade de produtores em NDN na Seção 2.4 e, por fim, apresentam-se as discussões finais do capítulo na Seção 2.5.

2.1 FUNDAMENTOS DE ICN

A Internet foi projetada entre as décadas de 1960 e 1970, para atender as necessidades de comunicação existentes. Uma época em que uma rede de compartilhamento de recursos escassos e caros era suficiente. No entanto, o crescimento da Internet e o surgimento de novas aplicações para atender as necessidades emergentes têm dado origem a novas exigências impostas à arquitetura, como suporte para a distribuição escalável de conteúdo, mobilidade, segurança, confiança, entre outras (XYLOMENOS et al., 2014). Tais características antes eram inimagináveis, pois o requisito básico exigido na projeção da Internet era apenas encaminhar dados entre um número limitado de máquinas (JACOBSON et al., 2009).

O paradigma das ICN apresenta-se como uma proposta promissora para a arquitetura da Internet do Futuro. Inspirada pelo fato de que o modelo de acesso é cada vez mais voltado para a disseminação de informações (e.g., as abordagens das redes de distribuição

de conteúdo e redes par-a-par (do inglês, *Content Delivery Network* (CDN) e *Peer-to-Peer* (P2P)), respectivamente), ao invés de uma comunicação em pares entre *hosts* finais, a ICN pretende atender as necessidades atuais e futuras, de acordo com previsões de demanda da utilização da rede, e busca remodelar a arquitetura atual de tal forma a evitar a necessidade da implantação de reparos futuros. Ao nomear informações na camada de rede, a ICN favorece a implantação de mecanismos de *cache* em rede e a transferência *multicast* de conteúdos facilitando, assim, a entrega eficiente e oportuna de informações aos usuários (XYLOMENOS et al., 2014; ZHANG et al., 2014).

Nas Figuras 2.1 e 2.2, são apresentadas duas importantes funcionalidades das ICN em relação à rede atual baseada no protocolo da Internet (do inglês, *Internet Protocol* (IP)). A Figura 2.1 (a) ilustra a comunicação IP orientada à localização o *host* de endereço IP 192.168.1.10 deseja solicitar o conteúdo chamado **pasta X**, para isso, informa na requisição o nome do conteúdo desejado e o endereço IP da origem do conteúdo, nesse caso, 200.128.38.2. Dessa forma, a cada requisição o usuário deve especificar não somente o conteúdo, mas também a fonte específica do conteúdo (XYLOMENOS et al., 2014). Entretanto, o *host* de IP 207.21.24.5, que se encontra mais próximo do solicitante, também possui o conteúdo desejado, porém é ignorado na comunicação IP, já que o destino especificado na requisição foi de outra máquina.

Diferente da rede IP, a ICN utiliza o modelo de comunicação centrado no conteúdo, como apresentado na Figura 2.1 (b), o solicitante informa apenas o nome do conteúdo desejado, dispensando o endereço da fonte na requisição, o que beneficia a recuperação de conteúdos localizados mais próximos do solicitante, no exemplo, o *host* equivalente ao identificado com o IP 207.21.24.5 da Figura 2.1 (a). Na ICN, após uma solicitação ser enviada, a rede se responsabiliza por localizar a melhor fonte que pode oferecer o conteúdo desejado (XYLOMENOS et al., 2014). Além disso, tira proveito do armazenamento em *cache* (do inglês, *caching*), fato que possibilita a distribuição de conteúdo e permite a recuperação rápida por outros nós da rede em suas próximas requisições.

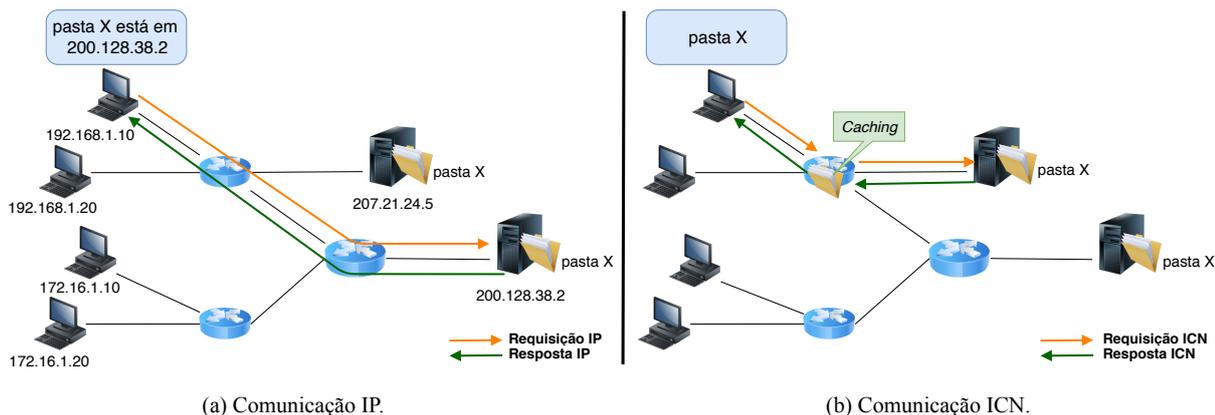


Figura 2.1 Comunicação IP versus ICN. A arquitetura IP orientada à localização (a) e a ICN orientada a conteúdo (b).

Outra funcionalidade das ICN está representada na Figura 2.2. Na Figura 2.2 (a),

duas máquinas na rede 172.16.1.0 com os IPs 172.16.1.10 e 172.16.1.20 requisitam simultaneamente o conteúdo **pasta X** para a máquina 200.128.38.2 e, para isso, informam o nome do conteúdo e o endereço da fonte na requisição. Assim, duas conexões simultâneas fim a fim são estabelecidas para o destino especificado a partir da mesma rede. Duas respostas trazendo o conteúdo solicitado **pasta X** são entregues aos seus respectivos *hosts* solicitantes. Dessa forma, foram necessárias duas requisições e duas respostas fim a fim para atender as duas solicitações da rede 172.16.1.0.

De outra maneira, na Figura 2.2 (b), as mesmas duas máquinas fazem requisições simultâneas ao conteúdo **pasta X** utilizando o modelo de comunicação ICN. O primeiro roteador comum aos clientes (i.e., *gateway*), ao receber as duas solicitações para o mesmo conteúdo, realiza apenas uma requisição ao conteúdo solicitado, na resposta o conteúdo é armazenado na *cache* dos elementos de rede do caminho percorrido pela requisição e quando o *gateway* recebe o conteúdo faz a entrega *multicast* para os *hosts* solicitantes. Dessa forma, apenas uma requisição é realizada ao destino e o *gateway* consegue responder as solicitações pendentes, através do encaminhamento *multicast*, acelerando a comunicação e descongestionando o núcleo da rede.

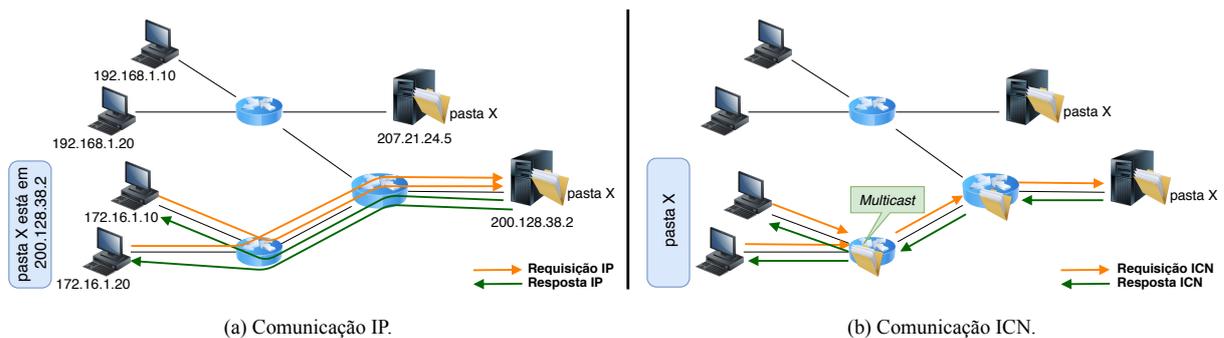


Figura 2.2 Comunicação IP versus ICN. A arquitetura IP com entrega *unicast* (a) e a ICN com entrega *multicast* (b).

Por essas razões, as ICN vêm ganhando espaço nos últimos anos, a academia e a indústria estão desenvolvendo pesquisas na área. Propostas na academia têm atraído um grande número de pesquisadores especialmente depois de o tema ganhar ênfase em eventos importantes, tais como: SIGCOMM, INFOCOM, MobiHoc, IEEE *Communication Magazine* e outras conferências e jornais internacionais de destaque (LIU et al., 2017). Além disso, existem iniciativas envolvendo a indústria através de grandes organizações como a Comissão Europeia de Pesquisa e Inovação¹ que criou o programa *Seventh Framework Program (FP7)*² que permaneceu de 2007 a 2013 incentivando a criação de projetos voltados para o desenvolvimento da Internet do Futuro. A Fundação Nacional de Ciência dos Estados Unidos (do inglês, *National Science Foundation (NSF)*)³ também financiou pesquisas para o desenvolvimento de arquiteturas ICN, através dos programas

¹https://ec.europa.eu/commission/index_pt

²https://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm

³<https://www.nsf.gov/>

Future Internet Architectures (FIA)⁴ em 2010 e *Future Internet Architectures – Next Phase* (FIA-NP)⁵ em 2013. Outro marco importante, para as ICN, foi o fato da *Internet Research Task Force* (IRTF) ter criado o grupo de trabalho denominado *Information-Centric Networking Research Group* (ICNRG)⁶ em 2012, para realizar pesquisas voltadas ao desenvolvimento e padronização das arquiteturas ICN.

Uma grande variedade de projetos de arquiteturas ICN têm surgido com propósitos similares, compartilhando algumas das características citadas anteriormente. Os projetos relacionados à ICN, após sua fase inicial, podem ser divididos em dois estágios de desenvolvimento, como mostrado na Figura 2.3. Uma descrição detalhada das propostas do primeiro estágio pode ser encontrada nos trabalhos de Xylomenos et al. (2014) e Ahlgren et al. (2012), enquanto o segundo estágio é abordado no trabalho de Liu et al. (2017).

Na seção seguinte é apresentada uma visão geral das principais propostas presentes na Figura 2.3.

2.2 PROJETOS DE ICN

Os projetos de arquiteturas ICN estão presentes, em ordem cronológica, na Figura 2.3. O projeto pioneiro foi o TRIAD (CHERITON; GRITTER, 2000) desenvolvido na Universidade de Stanford⁷. O TRIAD introduziu as primeiras ideias de mudança de paradigma do projeto de rede centrada no *host* para um projeto de rede centrada na informação (XYLOMENOS et al., 2014; AHLGREN et al., 2012; BRITO; VELLOSO; MORAES, 2012). Na sequência, surgiram os projetos OceanStore (KUBIATOWICZ et al., 2000), Redes baseadas em conteúdo (do inglês, *Content-based networking*) (CARZANIGA; WOLF, 2002), Infraestrutura Indireta da Internet (do inglês, *Internet Indirection Infrastructure* (I3)) (STOICA et al., 2002), Roteamento de Anel Virtual (do inglês, *Virtual Ring Routing* (VRR)) (CAESAR et al., 2006a), Roteamento por Rótulos Planos (do inglês, *Routing on Flat Labels* (ROFL)) (CAESAR et al., 2006b) e as ideias iniciais das Redes Centradas no Conteúdo (do inglês, *Content-Centric Networking* (CCN)) (JACOBSON, 2006). Todos esses projetos compuseram o estágio inicial dos fundamentos das ICN.

O primeiro estágio de desenvolvimento das ICN foi marcado por projetos de arquiteturas avançadas. De acordo com Xylomenos et al. (2014) e Liu et al. (2017), se destacam: a Arquitetura de Rede Orientada a Dados (do inglês, *Data Oriented Network Architecture* (DONA)) (KOPONEN et al., 2007), Paradigma de Roteamento da Internet publicador Assinante (do inglês, *Publish-Subscribe Internet Routing Paradigm* (PSIRP)) (PSIRP, 2008) e seu sucessor Tecnologia da Internet Publicador Assinante (do inglês, *Publish-Subscribe Internet Technology* (PURSUIT)) (PURSUIT, 2010), 4WARD (4WARD, 2008) e seu sucessor Soluções de Internet Escaláveis e Adaptáveis (do inglês, *Scalable and Adaptive Internet soLutions* (SAIL)) (SAIL, 2010), Arquitetura Mediadora de Conteúdo para Redes Sensíveis ao Conteúdo (do inglês, *COntent Mediator architecture for content-aware nETworks* (COMET)) (COMET, 2010), CONVERGENCE (CONVERGENCE,

⁴<https://www.nsf.gov/pubs/2010/nsf10528/nsf10528.htm>

⁵<https://www.nsf.gov/pubs/2013/nsf13538/nsf13538.htm>

⁶<https://trac.ietf.org/trac/irtf/wiki/icnrg>

⁷<https://www.stanford.edu/>

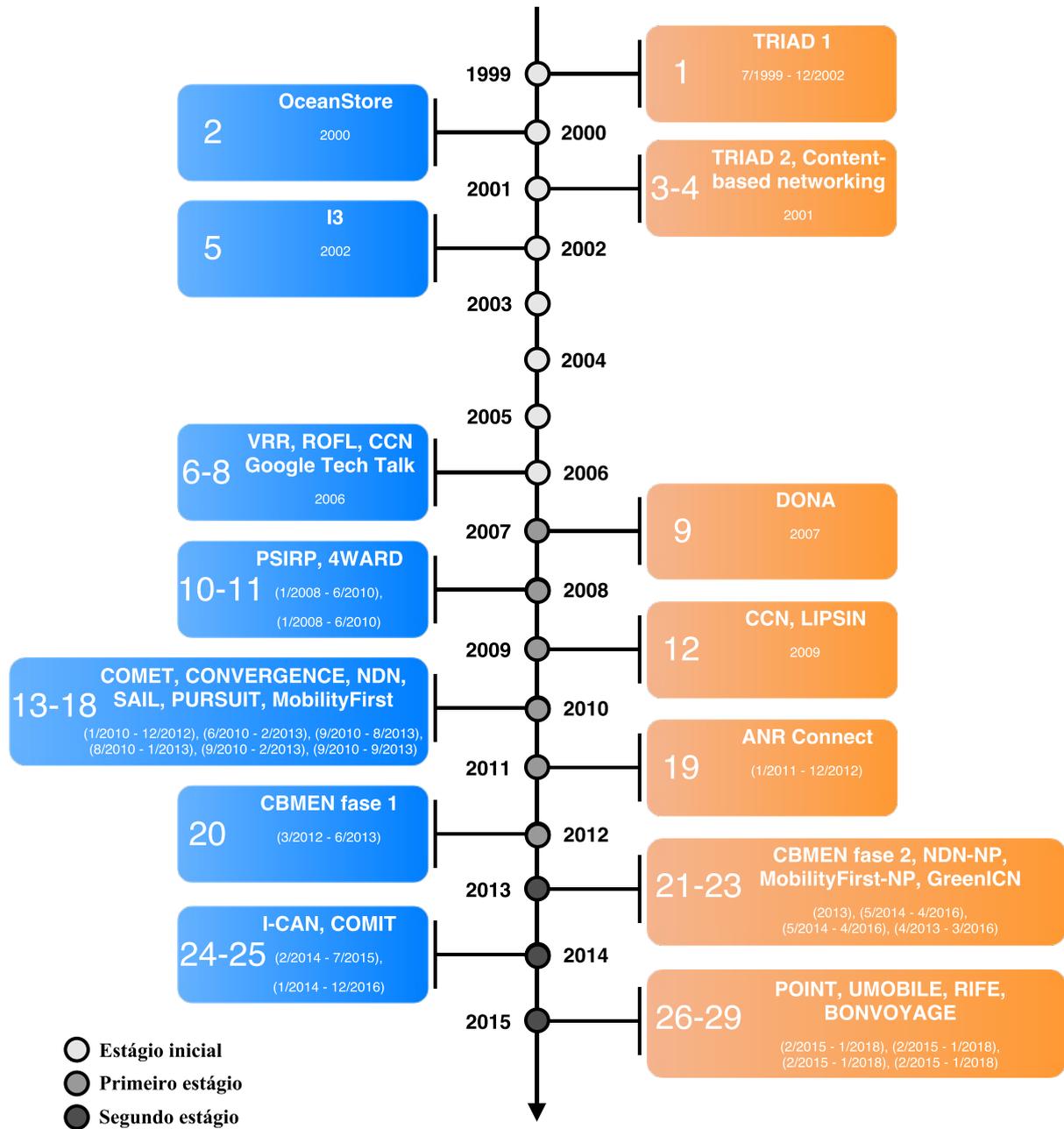


Figura 2.3 Linha do tempo dos projetos de arquiteturas ICN. Adaptado de Xylomenos et al. (2014) e Liu et al. (2017).

2010), CCN (JACOBSON et al., 2009) e seu sucessor NDN, MobilityFirst (MOBILITY-FIRST, 2010), e ANR *Content-Oriented Networking: a New Experience for Content Transfer* (CONNECT) (ANR CONNECT, 2010) que também adota a arquitetura NDN.

O segundo estágio de desenvolvimento teve início com o investimento financeiro da NSF através do programa FIA-NP que abrangeu o projeto NDN e o MobilityFirst, os quais entraram numa próxima fase (do inglês, *Next Phase* (NP)) de desenvolvimento, NDN-NP e MobilityFirst-NP (LIU et al., 2017). Outros projetos surgiram, como o projeto japonês GreenICN (GREENICN, 2013), o americano Rede de Borda Móvel Baseada no Conteúdo (do inglês, *Content-Based Mobile Edge Networking* (CBMEN)) (CBMEN, 2013), o europeu Redes de Acesso sem fio e Móveis Futuras Centradas na Informação (do inglês, *Information-Centric future mobile and wireless Access Networks* (I-CAN)) (I-CAN, 2014), e o britânico Gerenciamento de Conteúdo na Escala da Internet (do inglês, *Content Management at Internet Scale* (COMIT)) (COMIT, 2014).

Um novo programa europeu de incentivo à pesquisa, o Horizon 2020⁸, envolve quatro projetos de ICN, são eles: POINT (POINT, 2015), UMOBILE (UMOBILE, 2015), RIFE (RIFE, 2015) e BONVOYAGE (BONVOYAGE, 2015). Todos esses projetos encontram-se em fase de desenvolvimento.

2.2.1 Principais Projetos e Arquiteturas

Uma visão geral das principais arquiteturas do primeiro estágio de desenvolvimento é apresentada a seguir:

- DONA – é uma das primeiras arquiteturas completas de ICN, que substituiu o localizador padrão de recursos (do inglês, *Uniform Resource Locators* (URLs)) por nomes planos (XYLOMENOS et al., 2014). Isso desassocia a informação de sua localização o que permite que haja o armazenamento em *cache* na camada de rede. Os usuários podem verificar se a informação recebida corresponde a solicitada por meio de técnicas de criptografia aplicada ao nome da informação. Por não utilizar o serviço do Sistema de Nomes de Domínio (do inglês, *Domain Name System* (DNS)), a DONA cria um mecanismo de sobreposição para realizar a resolução de nomes, chamado de manipuladores de registros (do inglês, *Resolution Handler* (RH)). Os RHs são compostos por servidores especializados em cada sistema autônomo (do inglês, *Autonomous Systems* (AS)) e implementam um protocolo simples e eficaz (BRITO; VELLOSO; MORAES, 2012).
- CCN/NDN – é uma arquitetura que trata o conteúdo como objeto elementar da rede, visando garantir a disponibilidade e segurança do conteúdo independente da localização (BRITO; VELLOSO; MORAES, 2012). Além disso, preserva algumas das características que tornaram o Protocolo de Controle de Transmissão (do inglês, *Transmission Control Protocol* (TCP)/IP⁹) simples, robusto e escalável (JACOB-

⁸(<http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>)

⁹TCP/IP é o nome da arquitetura que representa o conjunto de protocolos que permitem a comunicação dos diversos equipamentos que constituem a Internet. Disponível em: (https://paginas.fe.up.pt/~mrs01003/TCP_IP.htm). Último acesso em 28 de maio de 2018.

SON et al., 2009). Um aspecto crucial na NDN é que os nomes são hierárquicos, permitindo que a resolução de nomes e as informações de roteamento de dados, que são desempenhadas juntas nos mesmos roteadores de conteúdo (do inglês, *Content Routers* (CRs)), possam ser agregadas através de nomes similares, contribuindo para a escalabilidade da arquitetura (XYLOMENOS et al., 2014). Essa arquitetura é abordada em detalhes na Seção 2.3.

- PSIRP/PURSUIT – é uma arquitetura que substitui completamente a pilha de protocolo IP pela pilha de protocolo publicador-assinante (do inglês, *publish-subscribe*). A arquitetura se baseia em três funções: encontro (do inglês, *rendezvous*), gerenciamento de topologia e encaminhamento. A função encontro se responsabiliza pela correspondência da assinatura das publicações e aciona a função de gerenciamento de topologia para criar uma rota entre o publicador e o assinante. Essa rota é utilizada pela função de encaminhamento para realizar a transferência de dados (XYLOMENOS et al., 2014). A função encontro possibilita a resolução de nomes e é implementada como uma tabela *hash* distribuída (do inglês, *Distributed Hash Table* (DHT)) hierárquica (XYLOMENOS et al., 2014).
- 4WARD/SAIL – investiga formas de facilitar uma transição suave da Internet atual. O escopo desse projeto é amplo, no entanto, uma de suas áreas de pesquisa bastante discutida é a Rede de Informação (do inglês, *Network of Information* (NetInf)), que projeta uma arquitetura ICN para suportar a troca de objetos de informação nomeados (XYLOMENOS et al., 2014). A NetInf oferece dois modelos de recuperação dos objetos de informação, através da resolução de nomes e do roteamento baseado em nomes (AHLGREN et al., 2012). A arquitetura SAIL é genérica, combina elementos presentes nas abordagens NDN e PURSUIT e pode operar em modo híbrido (XYLOMENOS et al., 2014).
- COMET – é uma abordagem unificada para a localização, acesso e distribuição de conteúdo (COMET, 2010). Além disso, desenvolve um esquema global de nomeação e de otimização para mapear as informações para as fontes de conteúdo apropriadas, com base nos requisitos de transmissão, nas preferências do usuário e no estado da rede (XYLOMENOS et al., 2014; COMET, 2010). O mapeamento ciente de conteúdo e do estado da rede irá considerar as abordagens das redes atuais, das evolucionárias e das revolucionárias (COMET, 2010). Ao contrário das outras abordagens de ICN que buscam independência de localização, a COMET permite que tanto os assinantes quanto os publicadores possam incluir explicitamente suas preferências de localização para a obtenção das informações, de acordo com as práticas comerciais estabelecidas (XYLOMENOS et al., 2014).
- CONVERGENCE – busca uma fácil transição da rede atual reutilizando as funcionalidades existentes e visa facilitar o acesso do usuário à informação, desde dados e serviços digitais até pessoas e objetos do mundo real (XYLOMENOS et al., 2014). Cada objeto é representado por um item digital versátil (do inglês, *Versatile Digital Item* (VDI)), um container comum para todos os tipos de informações digitais

(XYLOMENOS et al., 2014). O VDI é um pacote de informações digitais com um identificador único, auto certificado e independente de *host*, capaz de encapsular qualquer tipo de informação digital. Um VDI também contém metadados, descrevendo seu conteúdo e pode ser usado para publicar e assinar os conteúdos. A rede permite o armazenamento e o roteamento de VDIs. Para isso, usa-se um *middleware* de código aberto para possibilitar aos provedores de informações e aos consumidores o acesso aos VDIs (CONVERGENCE, 2010).

- MobilityFirst – propõe uma arquitetura *clean-slate* para a Internet com ênfase nos dispositivos móveis e fornece mecanismos detalhados para lidar com os enlaces sem fio e mobilidade, bem como, *multicast*, *multihoming*, armazenamento em *cache* e segurança na rede. A base da arquitetura é a separação dos nomes das entidades de seus endereços de rede (XYLOMENOS et al., 2014). O projeto também considera os fatores de tecnologia, como escassez de espectro de rádio, largura de banda e restrições de energia em sensores e dispositivos móveis (MOBILITYFIRST, 2010).

Na Tabela 2.1, é feita uma comparação das abordagens de ICN, descritas anteriormente, em relação a algumas de suas funcionalidades chave.

Na seção seguinte é abordada em detalhes cada característica da NDN presente na Tabela 2.1.

2.3 REDES DE DADOS NOMEADOS

As ideias iniciais da CCN tiveram início com Jacobson (2006) e posteriormente sua arquitetura foi desenvolvida pelo *Palo Alto Research Center (PARC)*¹⁰ (JACOBSON et al., 2009). Em seguida, surgiu o projeto NDN financiado pela fundação americana NSF, através do programa FIA (NDN, 2010). A NDN adota a arquitetura da CCN que visa remodelar a pilha de protocolos da Internet, utilizando diferentes tecnologias de rede, incluindo, mas não se limitando ao IP (ZHANG et al., 2014). Também adota a estrutura de nomeação hierárquica, permitindo que a resolução de nomes e as informações de roteamento sejam agregadas em nomes semelhantes (XYLOMENOS et al., 2014). Em 2017, a Cisco¹¹ adquiriu do PARC a plataforma CCN com o compromisso de melhorar e expandir essa plataforma.

Motivada pelo fato de que os usuários, cada vez mais, estão menos interessados em saber onde os dados estão armazenados e simplesmente querem obtê-los de forma rápida, a CCN surgiu com o foco no conteúdo em si, em vez da localização de hospedagem dos dados (JACOBSON et al., 2009). Portanto, a CCN é uma arquitetura de comunicação construída com base em dados nomeados. Em seu nível mais baixo não existe noção de *host*, os pacotes são endereçados pelo nome do conteúdo e não pela sua localização. Dessa forma, a CCN remodela a pilha de protocolos da Internet com uma solução baseada no paradigma *content-centric*, diferente do paradigma *host-centric* utilizado pela arquitetura da Internet atual.

¹⁰<https://www.parc.com/>

¹¹<https://www.parc.com/blog/cisco-acquires-parcs-content-centric-networking-ccn-platform/>

Tabela 2.1 Comparativo das arquiteturas ICN. Adaptado de Xylomenos et al. (2014).

	Nomeação	Resolução de nomes e Roteamento de dados	Armazenamento	Mobilidade	Segurança
DONA	Plana, composta de parte principal e de rótulo.	RHs. Acoplado: uma rota de origem é criada na resolução. Desacoplado: RHs retornam o endereço de rede.	<i>Cache</i> no caminho via RHs. <i>Cache</i> fora do caminho requer registros adicionais.	Assinante via novas requisições. Publicador requer registros adicionais.	Principal é um <i>hash</i> da chave pública. Rótulo pode ser um <i>hash</i> do conteúdo imutável.
NDN	Hierárquica, pode ter prefixo específico do publicador.	Protocolo de roteamento inunda a rede com informação do prefixo de nome. Acoplado: o estado de roteamento é estabelecido nos nós na propagação da solicitação.	<i>Cache</i> no caminho nos nós. <i>Cache</i> fora do caminho requer informações de roteamento adicionais.	Assinante via novas requisições. Publicador via protocolo de inundação de interesses.	Assinatura incluída nos pacotes. Corrente de certificação segue a hierarquia de nomes.
PURSUIT	Plana, composta de escopo e parte de encontro. Escopo pode ser hierárquico.	Rede de encontro baseada em DHT corresponde às assinaturas de publicações. Desacoplado: gerência da topologia e encaminhamento são separados do ponto de encontro.	<i>Cache</i> no caminho difícil devido à operação desacoplada. <i>Cache</i> fora do caminho requer registros adicionais.	Assinante via novas requisições. Publicador requer atualização do gerenciador de topologia.	Autenticação em nível de pacote. Nomes podem ser autocertificados.
SAIL	Plana, composta de parte de autoridade e local. Possível agregação de nome para a mesma autoridade.	Acoplado: estado de roteamento é acumulado durante a resolução de nomes. Desacoplado: resolução de nomes baseada em DHT retorna o localizador de conteúdos. Híbrido: resolução de nomes retorna dicas de roteamento para auxiliar a operação acoplada.	<i>Cache</i> no caminho nos nós. <i>Cache</i> fora do caminho requer informações adicionais de roteamento ou registros.	Assinante via novas requisições. Publicador via dicas de roteamento em operações híbridas.	Nomes podem ser autocertificados.
COMET	Não especificado. Nomes agregáveis para conteúdos relacionados.	Acoplado: resolução como em DONA, mas o estado de encaminhamento é instalado nos CRs durante a resolução.	Probabilístico, <i>cache</i> no caminho. <i>Cache</i> fora do caminho requer registros adicionais.	CRs cientes de mobilidade na rede de acesso que trocam o estado do contexto móvel.	Nomes agregáveis tornam a autocertificação impossível.
CONVERGENCE	Plana ou hierárquica.	Prefixo de nome em <i>cache</i> nos CRs. Acoplado: mensagens de interesse acumulam o estado de roteamento durante a resolução.	<i>Cache</i> no caminho nos nós. <i>Cache</i> fora do caminho requer um sistema de resolução de nomes.	Assinante via novas requisições. Publicador via sistema de resolução de nomes.	Assinaturas incluídas nos pacotes.
MobilityFirst	Plana, composta de um único componente.	Resolução de nomes global baseada em <i>hash</i> que mapeia nomes para endereços de rede.	<i>Cache</i> no caminho nos nós. <i>Cache</i> fora do caminho requer registros adicionais.	Assinante e publicador via ligação tardia, primeiro chega a área e depois ao dispositivo.	Nomes podem ser autocertificados.

Uma visão geral das mudanças da arquitetura CCN em relação à arquitetura IP é mostrada na Figura 2.4. A pilha de protocolo IP reflete o papel da camada 3, de rede, como elemento central, através de pacotes IP. A camada de rede exige poucas demandas da camada 2, como serviço de entrega sem estado, não confiável, não ordenada e com melhor esforço. A camada de rede da CCN adota a simplicidade da camada de rede IP e requer poucas demandas da camada 2. Dessa forma, a CCN pode manter simultaneamente múltiplas conectividades (e.g., *ethernet*, 3G, *bluetooth* e 802.11) (JACOBSON et al., 2009). Por outro lado, diferente da camada 3 da rede IP que utiliza uma comunicação fim a fim entre *hosts* finais identificados por endereços IP, a CCN emprega em sua camada de rede pedaços (do inglês, *chunks*) de conteúdo nomeado. Os *chunks* são pacotes de dados sequencialmente segmentados (THAR et al., 2015). Além disso, a CCN adiciona à pilha de protocolos duas novas camadas, a de estratégia e a de segurança que, respectivamente, realiza operações de otimização dinâmica e refinada para explorar as múltiplas conectividades sob condições variáveis; e protege o conteúdo em si, em vez das conexões, evitando muitas das vulnerabilidades enfrentadas pela rede IP (JACOBSON et al., 2009).

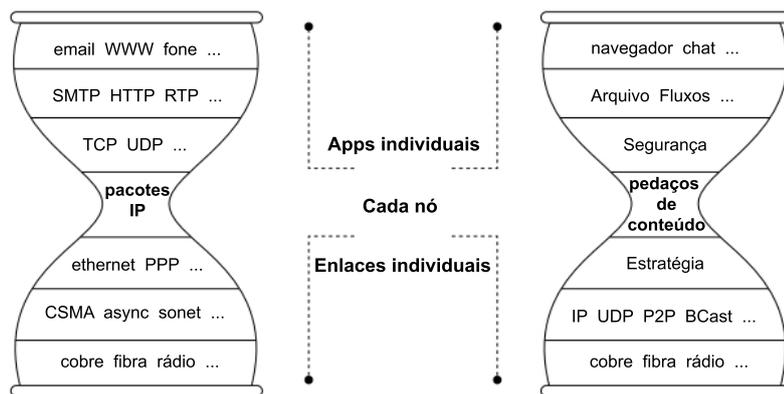


Figura 2.4 Os principais componentes da arquitetura CCN são pedaços de conteúdo nomeado, em contraste com a unidade fundamental de comunicação da arquitetura IP. Traduzido de Jacobson et al. (2009) e Zhang et al. (2014).

Na CCN o solicitante do conteúdo é chamado de consumidor e a fonte do conteúdo de produtor (JACOBSON et al., 2009). A comunicação entre os consumidores e produtores é realizada pela troca de dois tipos de mensagens básicas, chamadas de pacote de interesse e pacote de dados (LUO; EYMANN; TIMM-GIEL, 2015), como ilustrado na Figura 2.5. Ambos os pacotes são identificados pelo nome, o pacote de interesse possui o campo *nonce* que é um valor aleatório para detectar e prevenir os *loops* na rede, mais detalhes dos campos dos pacotes CCN podem ser encontrados em NDN (2010). Um interesse representa o pedido de exatamente um pacote de dados, ou seja, cada interesse obtém apenas um único pacote de dados, assim, o controle de fluxo da rede é mantido por padrão (JACOBSON et al., 2009; ZHANG et al., 2014). Essa técnica é conhecida como modelo de comunicação *receiver-driven* (AMADEO et al., 2014; FARAHAT; HASSANEIN, 2016; LEHMANN; BARCELLOS; MAUTHE, 2016). Os dados seguem o caminho inverso per-

corrido pelos interesses até alcançar o solicitante (ZHANG et al., 2014). Isso possibilita que o balanceamento de fluxo seja mantido na rede e permite uma comunicação eficiente entre máquinas variadas mesmo em redes de velocidades diferentes (ZHANG et al., 2014).

Pacote de Interesse	Pacote de Dados
Nome do conteúdo	Nome do conteúdo
Seletor (Ordem de preferência, filtro do publicador, excluir filtro, ...)	MetaInfo (Tipo de conteúdo, período de atualização, ...)
Nonce	Conteúdo
Guias (Escopo, tempo de vida do interesse)	Assinatura (Tipo de assinatura, localizador de chaves, bits de assinatura, ...)

Figura 2.5 Pacotes da arquitetura CCN.

Para realizar as funções de encaminhamento de pacotes de interesse e dados, cada nó na CCN mantém três estruturas de dados (XYLOMENOS et al., 2014; ZHANG et al., 2014; JACOBSON et al., 2009). A Base de Informação de Encaminhamento (do inglês, *Forwarding Information Base* (FIB)) é usada para encaminhar pacotes de interesse em direção a(s) fonte(s) de dados correspondente(s). Sua função é muito semelhante a desempenhada pela tabela FIB da rede IP, exceto que permite uma lista de interfaces de saída para uma mesma requisição, em vez de uma única. Isso reflete o fato da CCN não está restrita ao encaminhamento em árvore e permite a consulta em várias fontes de dados em paralelo. Um módulo de estratégia de encaminhamento é responsável por determinar quando e onde encaminhar cada pacote de interesse (JACOBSON et al., 2009; ZHANG et al., 2014).

A segunda estrutura é a Tabela de Interesses Pendentes (do inglês, *Pending Interest Table* (PIT)), que mantém os registros de interesses que foram encaminhados para a(s) fonte(s) de conteúdo, para possibilitar que os dados retornados possam ser enviados ao(s) seu(s) solicitante(s). Em CCN, apenas os pacotes de interesse são encaminhados e, à medida que se propagam em direção às potenciais fontes de dados, deixam uma trilha chamada de “migalhas de pão” (do inglês, “*bread crumbs*”) para possibilitar que um pacote de dados correspondente retorne ao solicitante original. Cada entrada na PIT corresponde a uma “*bread crumb*”. As entradas na PIT são removidas logo após serem utilizadas para encaminhar um pacote de dados correspondente (i.e., os dados “conso-mem” os interesses na PIT) (JACOBSON et al., 2009; ZHANG et al., 2014).

A terceira e última estrutura é chamada de Armazenamento de Conteúdo (do inglês, *Content Store* (CS)), semelhante à memória *cache* de um roteador IP, porém, tem capacidade e política de substituição diferente. Como cada pacote IP pertence a uma única conversa fim a fim, o mesmo não tem mais valor depois de ser encaminhado para o destino. Assim, o roteador remove o pacote IP e recicla seu *buffer* imediatamente após a conclusão do encaminhamento (i.e., política *Most Recently Used* (MRU)) (JACOBSON et al., 2009). Os pacotes CCN são auto identificáveis e auto autenticados, isso permite que cada pacote seja potencialmente útil para muitos consumidores (e.g., muitos *hosts* que acessam o mesmo conteúdo). Desse modo, para maximizar a probabilidade de com-

partilhamento, o que minimiza a demanda de largura de banda de *upload* e a latência de *download*, os nós da CCN podem armazenar os pacotes de dados o maior tempo possível (e.g., política *Last Recently Used* (LRU) ou *Least Frequently Used* (LFU)) (JACOBSON et al., 2009; ZHANG et al., 2014).

A arquitetura original da CCN é descrita em detalhes em Jacobson et al. (2009) e a sua sucessora NDN é descrita em Zhang et al. (2014), Xylomenos et al. (2014) e NDN (2010). Para Xylomenos et al. (2014), os pontos chave na arquitetura que merecem ser discutidos, são os seguintes:

2.3.1 Nomeação

Na CCN os dados são identificados exclusivamente por um nome (LUO; EYMANN; TIMM-GIEL, 2015). O nome em um pacote NDN pode identificar qualquer coisa, como um *host*, um pacote de dados, um livro, um filme, etc (ZHANG et al., 2014). Os nomes são estruturados hierarquicamente, assim, são compostos de vários componentes. Cada componente é formado por um número arbitrário de octetos de tamanho variável (JACOBSON et al., 2009). A estrutura hierárquica de nomes permite a agregação de grandes coleções de conteúdo com prefixo em comum (LUO; EYMANN; TIMM-GIEL, 2015).

A Figura 2.6 mostra que os nomes são hierárquicos e podem ser semelhantes às URLs (XYLOMENOS et al., 2014; ZHANG et al., 2014) (i.e., legível para humanos). O caractere “/” é utilizado para separar os componentes dos nomes (JACOBSON et al., 2009; ZHANG et al., 2014), mas esses delimitadores não fazem parte dos nomes, propriamente, e não são incluídos nas codificações dos pacotes (i.e., codificação binária). O componente final de cada nome de pacote de dados inclui um resumo SHA256 dos dados em si (JACOBSON et al., 2009). Os componentes, ainda nas URLs, são divididos basicamente em três partes: nome globalmente roteável é a parte conhecida e utilizada pelos outros nós para realizar o roteamento; nome organizacional é a parte responsável por identificar a instituição ou origem dos dados; e a parte convencional que é gerada automaticamente para controlar o versionamento e a segmentação dos dados transmitidos.

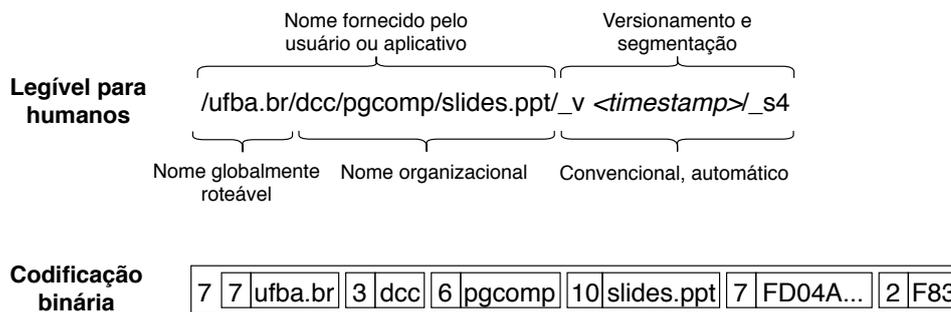


Figura 2.6 Exemplo da nomeação de dados. Adaptado de Jacobson et al. (2009).

A NDN é flexível, dessa forma, os nomes podem ser, inclusive, diferentes de URLs, sua primeira parte não é um nome de DNS ou um endereço IP e não necessitam ser legíveis por humanos. Cada componente de nome pode ser qualquer sequência de caracteres, incluindo uma *string* legível ou até mesmo um valor de *hash* (XYLOMENOS et al.,

2014). As codificações binárias de inteiros ou outros valores complexos podem ser usadas diretamente sem conversão em texto e os componentes de nome podem até ser criptografados para privacidade (JACOBSON et al., 2009). Os nomes planos podem ser um caso especial, provavelmente útil em ambientes locais, no entanto, os nomes hierárquicos são essenciais para escalar o sistema de roteamento e fornecer o contexto necessário para os dados (ZHANG et al., 2014).

O nome de um interesse pode ser considerado para combinar com o nome de qualquer parte de informação que tem o nome solicitado como um prefixo (XYLOMENOS et al., 2014). Como mostrado na Figura 2.6, o prefixo `/ufba.br/dcc/pgcomp/slides.ppt` identifica uma coleção de dados que representa um arquivo de uma apresentação (e.g., uma aula). A partir desse nome, um interesse pode ser gerado solicitando o próximo pacote de dados com exatamente esse prefixo, isso tem o efeito semântico de solicitar o primeiro pacote disponível da apresentação `slides.ppt`. No exemplo, os nomes dos pacotes individuais são construídos com um marcador de versão (`_v`) seguido de um número de versão inteiro e um marcador de segmento (`_s`) constante, também seguido de um valor inteiro que representa o número dos quadros (JACOBSON et al., 2009). Por exemplo, `/ufba.br/dcc/pgcomp/slides.ppt/_v1/_s4` representa o quarto segmento da primeira versão dos dados solicitados (XYLOMENOS et al., 2014; ZHANG et al., 2014). Após receber esse pacote, o consumidor poderia solicitar o próximo segmento de dados, requisitando diretamente `/ufba.br/dcc/pgcomp/slides.ppt/_v1/_s5`, ou o segmento seguinte desta versão. Alternativamente, o consumidor poderia requisitar a próxima versão, através da primeira `/ufba.br/dcc/pgcomp/slides.ppt/_v1` (XYLOMENOS et al., 2014).

2.3.2 Resolução de Nomes e Roteamento de Conteúdo

Na CCN as mensagens são encaminhadas salto a salto pelos CRs até atingir seus destinos (XYLOMENOS et al., 2014). Cada CR mantém as três estruturas: PIT, FIB e CS (JACOBSON et al., 2009; ZHANG et al., 2014; XYLOMENOS et al., 2014). Na Figura 2.7, é possível observar o processo de encaminhamento de pacotes de interesse e dados. Ao receber um pacote de interesse o CR verifica suas estruturas CS, PIT e FIB, respectivamente (THAR et al., 2015). No entanto, a consulta na estrutura seguinte apenas é realizada se não existir correspondência na estrutura anterior (JACOBSON et al., 2009).

Dessa forma, o roteador primeiro verifica sua CS em busca dos dados equivalentes ao interesse de entrada. Se existir, na CS, dados armazenados que correspondam ao interesse, então o roteador retorna o pacote de dados pela interface de chegada do interesse. Caso não exista correspondência de dados, é realizada uma consulta na PIT em busca do interesse em questão. Se o interesse é encontrado na PIT (i.e., já tinha sido solicitado e está aguardando a chegada dos dados), apenas é registrada a interface de entrada do interesse e o mesmo é descartado. Na ausência do interesse na PIT é feita uma consulta na FIB em busca das melhores rotas para as possíveis fontes de dados (THAR et al., 2015). Se existir rota(s) para a(s) fonte(s), o interesse é finalmente encaminhado na rede, através dessa(s) rota(s). Nos casos que não existir rotas conhecidas na FIB, o enlace de saída estiver inativo ou ocorrer congestionamento extremo, o roteador pode optar por

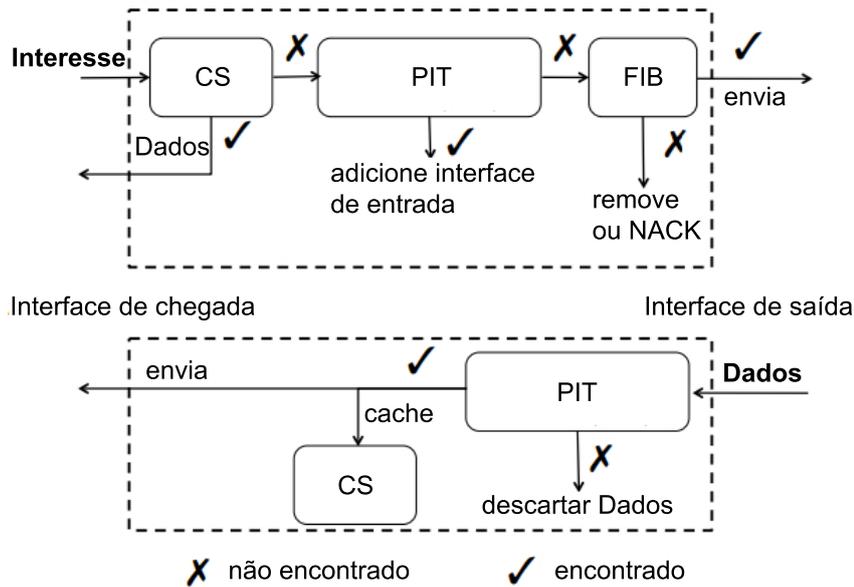


Figura 2.7 Processo de encaminhamento em um nó da NDN. Adaptado de Zhang et al. (2014).

remover o pacote de interesse ou responder com um pacote *nack* (i.e., o destino encontra-se inalcançável e o interesse não pode ser satisfeito) (ZHANG et al., 2014). Nesse caso, o roteador pode, ainda, inundar o interesse na rede, através das interfaces disponíveis (THAR et al., 2015), ou apenas removê-lo (LUO; EYMANN; TIMM-GIEL, 2015).

As entradas na FIB podem ser atualizadas através de protocolos de roteamento como o protocolo de sistema intermediário para sistema intermediário (do inglês, *Intermediate System to Intermediate System* (IS-IS)) ou o protocolo aberto que testa o menor caminho primeiro (do inglês, *Open Shortest Path First* (OSPF)) para anúncios intra-domínio e o protocolo de *gateway* de borda (do inglês, *Border Gateway Protocol* (BGP)) para anúncios de prefixos inter-domínio (JACOBSON et al., 2009). A própria FIB é preenchida por um protocolo de roteamento baseado em prefixo de nome e pode ter várias interfaces de saída para cada prefixo (ZHANG et al., 2014).

Quando um roteador recebe vários pacotes de interesse para o mesmo objeto de dados, ele encaminha apenas o primeiro interesse de entrada para o(s) produtor(es) de dados (ZHANG et al., 2014). Em seguida, descarta os interesses iguais, após adicionar suas respectivas interfaces de chegada nas entradas da PIT, conseqüentemente, cria-se a trilha de volta aos consumidores (i.e., as *“bread crumbs”*). Ao atingir o produtor do conteúdo ou uma CS que tenha o conteúdo requisitado, o interesse é removido e os dados são enviados, rumo aos consumidores, seguindo a trilha das *“bread crumbs”* deixadas na PIT dos roteadores (XYLOMENOS et al., 2014).

De volta à Figura 2.7, quando um pacote de dados chega em um roteador NDN é realizada uma busca pelo nome dos dados nas entradas da PIT e, em seguida, o encaminhamento desse pacote para todas as interfaces listadas na entrada PIT correspondente (ZHANG et al., 2014). Se uma entrada PIT possui múltiplas interfaces, os dados são duplicados para alcançar a entrega *multicast* (XYLOMENOS et al., 2014; JACOBSON

et al., 2009). Uma vez encontrada a correspondência, a entrada PIT é removida e uma cópia dos dados é armazenada na CS (ZHANG et al., 2014). Por outro lado, se não há entrada correspondente para os dados na PIT, o roteador pode descartar os pacotes de dados como sendo duplicados (XYLOMENOS et al., 2014). Os pacotes de dados sempre tomam o caminho inverso ao percorrido pelos interesses, portanto, na ausência da perda de pacotes, um pacote de interesse resulta em um pacote de dados, fornecendo o equilíbrio do fluxo de pacotes na rede (ZHANG et al., 2014).

Além das estruturas presentes na Figura 2.7, a NDN possui um módulo de estratégia de encaminhamento que decide o que deve ser feito com os pacotes de interesse (e.g., decide se encaminha o interesse, para onde e quando) nos roteadores que não possuem o conteúdo requisitado (THAR et al., 2015). Para cada interesse, esse módulo recupera a entrada de prefixo mais longo correspondente da FIB e pode decidir remover um interesse em certas condições, por exemplo, se os enlaces de saída estiverem congestionados ou se o interesse for suspeito de ser parte de um ataque de negação de serviço (do inglês, *Denial of Service* (DoS)) (ZHANG et al., 2014).

2.3.3 Armazenamento em Cache

Na CCN existem dois tipos de armazenamento em *cache*, o armazenamento em *cache* no caminho (do inglês, *on-path caching*) e o armazenamento em *cache* fora do caminho (do inglês, *off-path caching*) (IOANNOU; WEBER, 2016; THAR et al., 2015). Se os dados são armazenados nos roteadores que estão no caminho da requisição, tem-se o processo do *on-path caching*. De outra forma, se os dados são armazenados em roteadores não pertencentes ao caminho de entrega entre uma fonte e o consumidor, tem-se o processo do *off-path caching* (IOANNOU; WEBER, 2016; THAR et al., 2015). A NDN suporta nativamente o armazenamento em *cache* no caminho, uma vez que cada roteador consulta sua CS sempre que recebe um pacote de interesse e armazena os dados recuperados pelos interesses trafegados (XYLOMENOS et al., 2014). O *on-path caching* é integrado ao mecanismo de encaminhamento da rede ICN (IOANNOU; WEBER, 2016).

Existem, ainda, as estratégias de decisão de *cache* e de substituição de *cache*. A estratégia de decisão define uma política para decidir se deve armazenar ou não os dados no roteador corrente, enquanto a estratégia de substituição define qual conteúdo deve ser excluído para liberar espaço, quando a *cache* do roteador atingir seu limite de armazenamento (THAR et al., 2015). A estratégia de armazenamento em *cache* padrão da CCN é deixar uma cópia em todos os lugares (do inglês, *Leave Copy Everywhere* (LCE)), que armazena os dados em cada roteador localizado no caminho das requisições de interesse, mas seu uso é suscetível a causar redundância de dados entre as *cache* (LIU et al., 2017; THAR et al., 2015), tornando a utilização do espaço em *cache* ineficiente (THAR et al., 2015), além de desperdiçar os recursos de rede (LIU et al., 2017).

A CS pode usar LRU ou outra política de substituição, mas realisticamente não pode ser usada para armazenamento de longo prazo, pois tende a armazenar tudo que passa pelo nó, sendo útil, principalmente, para a recuperação de perdas de pacotes e para lidar com tráfego em rajadas. A *cache* fora do caminho é suportada através da entrega de um interesse a qualquer fonte de dados que hospeda o conteúdo solicitado, por exemplo,

a camada de estratégia pode direcionar o interesse para um servidor CDN em vez do produtor de origem (XYLOMENOS et al., 2014).

2.3.4 Segurança

Em contraste com a arquitetura TCP/IP, que deixa a responsabilidade pela segurança para os dispositivos finais, a NDN protege os dados exigindo que os produtores assinem criptograficamente cada pacote de dados (JACOBSON et al., 2009; ZHANG et al., 2014). A implantação da segurança diretamente no conteúdo, reduz a necessidade de confiança que os consumidores precisam colocar nas redes intermediárias, pois todo o conteúdo é autenticado com assinaturas digitais e o conteúdo privado é protegido por criptografia (JACOBSON et al., 2009).

Cada pacote de dados contém uma assinatura sobre o nome e as informações incluídas no pacote, além de informações a respeito da chave usada para produzir a assinatura (e.g., a chave pública do assinante ou um certificado para essa chave pública) (XYLOMENOS et al., 2014). Essa assinatura garante a integridade e permite a determinação da proveniência dos dados, possibilitando que a confiança do consumidor nos dados seja desassociada de como ou onde eles foram obtidos (ZHANG et al., 2014).

Qualquer nó, inclusive os roteadores, pode verificar a ligação entre o nome do pacote e as informações que o acompanham. No entanto, para verificar se as informações vêm de uma fonte autorizada, o consumidor deve confiar no proprietário da chave pública usada para assinar o conteúdo (XYLOMENOS et al., 2014). A estrutura hierárquica de nomes simplifica a construção de relações de confiança (ZHANG et al., 2014), por exemplo, o conteúdo `/ufba.br/dcc/pgcomp/slides.ppt` pode ser assinado pelo proprietário do domínio `/ufba.br/dcc/pgcomp`, cuja chave pode ser certificada pelo proprietário do domínio `/ufba.br/dcc` (XYLOMENOS et al., 2014).

O uso do encaminhamento por vários caminhos (do inglês, *multipath*), junto com o módulo de estratégia de encaminhamento adaptável, mitiga o sequestro de prefixo, pois os roteadores podem detectar anomalias causadas por invasões e recuperar dados através de caminhos alternativos (ZHANG et al., 2014). Devido ao fato dos pacotes NDN fazerem referência ao conteúdo em vez dos dispositivos, se torna mais difícil direcionar um dispositivo em particular, embora sejam necessários mecanismos de mitigação contra outros ataques específicos da NDN (e.g., inundação de interesse para realizar ataque de DoS) (ZHANG et al., 2014).

A segurança centrada em dados na NDN tem aplicações naturais para o controle de acesso ao conteúdo e segurança da infraestrutura. As aplicações podem controlar o acesso aos dados por meio de criptografia e distribuir chaves como dados criptografados, limitando o perímetro de segurança de dados ao contexto de uma simples aplicação (ZHANG et al., 2014).

2.3.5 Mobilidade

O suporte à mobilidade dos nós é um requisito fundamental para o futuro da Internet, apesar disso, não existe um esquema para apoiar a mobilidade na NDN e o único apoio oferecido é baseado na retransmissão de pacotes de interesse (FARAHAT; HASSANEIN,

2016). Contudo, devido ao fluxo bidirecional de pacotes de interesse e dados, a mobilidade na NDN pode ser dividida em dois subproblemas: (i) mobilidade do consumidor – se refere a como os dados solicitados podem ser devolvidos a um consumidor em movimento; e (ii) mobilidade do produtor – se refere a como os interesses dos consumidores, móveis ou não, podem alcançar os dados gerados pelos produtores em movimento (ZHANG et al., 2016).

A arquitetura da NDN, através de seu modelo de comunicação, oferece naturalmente o suporte para a mobilidade do consumidor (ZHANG et al., 2016; GAO; ZHANG, 2016; LEHMANN; BARCELLOS; MAUTHE, 2016). Dessa maneira, quando um consumidor se move para outra rede, o mesmo pode retransmitir os interesses insatisfeitos a partir de sua nova localização (XYLOMENOS et al., 2014; FARAHAT; HASSANEIN, 2016; HUYNH et al., 2017; GAO et al., 2017; LEHMANN; BARCELLOS; MAUTHE, 2016). Os interesses retransmitidos podem recuperar os dados, solicitados anteriormente, da CS do primeiro roteador comum em ambas as rotas de entrega (i.e., antes e depois do *handoff*) (ZHANG et al., 2016), ou podem ser suprimidos pela PIT do roteador, assim os dados serão entregues na rede atual do consumidor móvel, e também na sua antiga localização (XYLOMENOS et al., 2014; ZHANG et al., 2016).

Por outro lado, o apoio à mobilidade de produtores na NDN ainda é um desafio de pesquisa em aberto (GE et al., 2016; LEHMANN; BARCELLOS; MAUTHE, 2016). Quando um produtor se move para outra rede, as entradas da FIB dos roteadores que apontam para o produtor precisam ser atualizadas para possibilitar o encaminhamento correto dos pacotes de interesse, isso exige do protocolo de roteamento a republicação dos prefixos de nome para os dados que o produtor hospeda (XYLOMENOS et al., 2014; FARAHAT; HASSANEIN, 2016; GAO et al., 2017; GAO; ZHANG, 2016).

No entanto, essa solução afeta negativamente a escalabilidade do plano de roteamento, devido à sobrecarga de atualização (GAO; ZHANG, 2016; GAO et al., 2017). Além disso, pode causar instabilidade na entrega de dados durante o período de convergência (i.e., procedimento de *handoff* e atualização de localização), o que provoca inevitavelmente o atraso na entrega de dados (GAO et al., 2017). Outro fato é que os interesses dos consumidores podem ser encaminhados para os antigos locais desatualizados do produtor, o que causa *timeout* e retransmissões dos pacotes de interesse (GAO; ZHANG, 2016; FARAHAT; HASSANEIN, 2016).

A mobilidade do produtor pode, ainda, ser dividida em dois períodos: (i) indisponibilidade – é o período caracterizado pela falta de conectividade de rede do produtor durante o movimento; e (ii) reconexão – se refere ao processo de reunir a rede e restaurar a conectividade do produtor. O período de indisponibilidade é um desafio de pesquisa mais relevante, pois carece de suporte adequado na NDN atual. O período de reconexão, em contraste, pode ser razoavelmente tratado através de mensagens de anúncio do protocolo de roteamento (LEHMANN; BARCELLOS; MAUTHE, 2016).

Um esquema de apoio à mobilidade do produtor é necessário para substituir o atual projeto proposto na NDN (FARAHAT; HASSANEIN, 2016). O suporte à mobilidade do produtor é crítico e, por essa razão, é o objeto de estudo desta pesquisa.

2.4 ABORDAGENS DE MOBILIDADE DE PRODUTORES EM NDN

Vários esquemas de gerenciamento de mobilidade em NDN têm sido propostos na literatura com foco na mobilidade do produtor, uma vez que é mais crítica que a mobilidade do consumidor (FARAHAT; HASSANEIN, 2016; GAO; ZHANG, 2016). Dessa forma, existem muitas classificações e denominações diferentes para as abordagens de mobilidade.

Em geral, as pesquisas existentes sobre mobilidade de produtores podem ser classificadas em duas categorias: esquema baseado em roteamento e esquema baseado no IP móvel (do inglês, *Mobile IP* (MIP)). O gerenciamento de mobilidade baseado em roteamento requer a inserção de nós extras envolvidos nesta tarefa e pode trazer complexidade e custo adicional para o sistema de gerenciamento. Por outro lado, há várias abordagens baseadas no MIP, que são semelhantes às soluções de mobilidade empregadas nas redes TCP/IP, uma dessas abordagens é a separação do localizador e identificador que é frequentemente utilizada em trabalhos que buscam resolver o problema da mobilidade do produtor na NDN (GAO; ZHANG, 2016).

Outro esquema baseado no MIP é a abordagem de âncoras de apoio à mobilidade, que utiliza nós especiais (i.e., âncoras) nas redes domésticas, as âncoras encaminham os interesses para o produtor, mesmo quando o produtor está em movimento para outra rede. Nesse caso, os interesses não serão descartados, mas podem percorrer caminhos mais longos para alcançar o produtor móvel (FARAHAT; HASSANEIN, 2016). Essa abordagem também é chamada de ponto de indireção e engloba outras denominações (e.g., ponto de fixação e repositório doméstico (do inglês, *Point of Attachment* e *Home Repository*)) (GAO et al., 2017). Já a abordagem de resolução de localização é semelhante à usada no serviço de DNS, em que o consumidor consulta a localização do produtor antes de enviar um pacote de interesse (FARAHAT; HASSANEIN, 2016). Essa abordagem pode utilizar um servidor de resolução de nomes para manter as informações de localização do produtor sempre atualizadas (GAO et al., 2017).

De acordo com Zhang et al. (2016), o problema da mobilidade do produtor na NDN pode parecer semelhante à mobilidade IP, no entanto, existe uma diferença conceitual a NDN consiste na recuperação de dados e não na entrega de pacotes para um nó móvel. Portanto, o apoio à mobilidade do produtor se resume em fazer o encontro dos interesses com os dados gerados por um produtor móvel. Para isso, os autores classificaram duas direções de apoio à mobilidade do produtor:

1. Perseguição do produtor móvel – usa um ponto de encontro para descobrir a localização do produtor na rede. Os interesses são direcionados rumo ao produtor móvel para recuperar dados (os quais também podem ser encontrados na CS dos roteadores no caminho). Isso é semelhante ao suporte de mobilidade IP com suas abordagens baseadas em roteamento, mapeamento e rastreamento, que podem ser facilmente adaptadas para a NDN. No entanto, a abordagem baseada no roteamento é menos relevante, pois é improvável que o produtor anuncie o prefixo dos dados no sistema de roteamento na escala da Internet (ZHANG et al., 2016).
2. Encontro de dados – baseia-se em garantir a fácil localização dos dados produzidos por produtores móveis, uma vez que a segurança é aplicada diretamente aos dados,

os mesmos podem ser facilmente retirados dos produtores originais. Por exemplo, os dados gerados por um produtor podem ser movidos para um local estacionário e de fácil acesso. Além disso, as aplicações que geram dados em um determinado local, podem construir o nome dos dados “estacionário” que independe do produtor. Esse nome permite que os interesses possam ser direcionados para o local e recuperem os dados de qualquer produtor nessa área (ZHANG et al., 2016).

Em Zhang et al. (2016) é feita uma revisão da literatura sobre as abordagens de mobilidade de produtores na NDN. Os autores identificaram duas abordagens de perseguição de produtores móveis (i.e., mapeamento e rastreamento) e duas de encontro de dados (i.e., depósito de dados e local de dados), como representado na Tabela 2.2. Por questões didáticas, o restante deste capítulo utiliza os termos empregados em Zhang et al. (2016) para classificar as abordagens de mobilidade de produtores na NDN.

Tabela 2.2 Abordagens de mobilidade do produtor. Adaptado de Zhang et al. (2016).

Perseguição do produtor móvel		
2.4.1	Mapeamento	Produtor informa ao ponto de encontro seu ponto de fixação através do qual seus dados podem ser recuperados.
2.4.2	Rastreamento	Produtor cria uma trilha de migração, que pode ser seguida por interesses do ponto de encontro, para alcançá-lo.
Encontro de dados		
2.4.3	Depósito de dados	Os dados produzidos pelo produtor móvel são movidos para um servidor estacionário conhecido.
2.4.4	Local de dados	Os dados são produzidos e disponibilizados em uma região estacionária.

As subseções seguintes (2.4.1, 2.4.2, 2.4.3 e 2.4.4) abordam em detalhes os itens presentes na Tabela 2.2.

2.4.1 Perseguição do Produtor – Baseada em Mapeamento

As soluções baseadas em mapeamento se fundamentam nas ideias da mobilidade IP, ou seja, usando pontos de encontros estáveis para acompanhar os produtores. O produtor deve informar ao ponto de encontro o mapeamento do seu nome de dados “estável” para o seu nome de ponto de fixação atual “temporário”, sempre que o produtor migrar para um novo ponto de fixação (ZHANG et al., 2016). Grande parte das soluções existentes se enquadram nessa categoria. Seus projetos podem ser divididos em duas dimensões, com base no papel que o ponto de encontro desempenha e como os nomes do ponto de fixação mapeados são transportados nos pacotes de interesse (ZHANG et al., 2016).

1. O papel do ponto de encontro – pode fornecer o mapeamento a partir do nome dos dados produzidos por um produtor para o seu nome de ponto de fixação atual;

um agente doméstico que encaminha, através de túneis, interesses para o produtor; ou ser um sistema híbrido que inclui mapeamento de nomes e mecanismos de tunelamento de interesses (ZHANG et al., 2016).

A Figura 2.8 (a) mostra quando o ponto de encontro atua apenas como um serviço de mapeamento, os consumidores primeiro o contactam para obter o mapeamento entre o nome dos dados e o nome do ponto de fixação atual do produtor e, em seguida, encapsulam os interesses em direção ao ponto de fixação obtido (ZHANG et al., 2016). Por outro lado, a Figura 2.8 (b) mostra quando o ponto de encontro atua como um agente doméstico do produtor os dados são publicados sob o nome estacionário do ponto de encontro, que é globalmente alcançável. Os interesses do consumidor chegam ao ponto de encontro, que usa um túnel para encaminhá-los em direção ao produtor, no seu ponto de fixação atual, de acordo com as informações de mapeamento disponíveis (ZHANG et al., 2016).

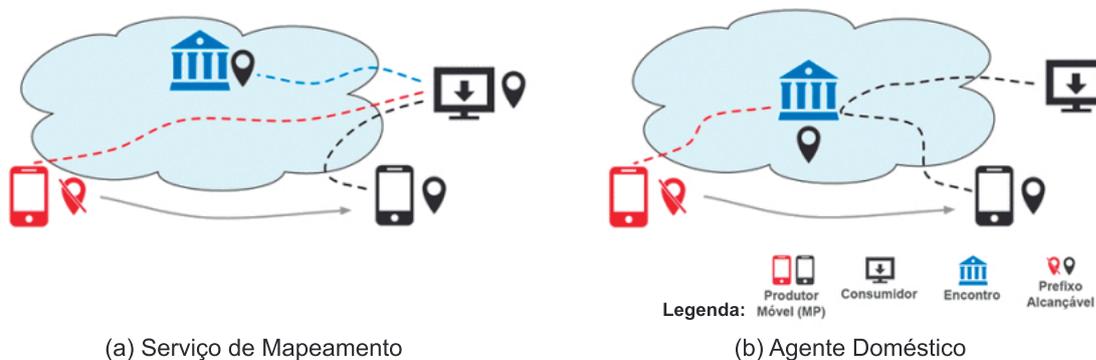


Figura 2.8 Abordagem baseada em mapeamento, o papel do ponto de encontro. Adaptado de Zhang et al. (2016).

No modo híbrido, o ponto de encontro atua como um agente doméstico que encaminha, através de túnel, apenas o primeiro interesse para o produtor. O pacote de dados retornado carrega o nome do ponto de fixação atual do produtor, que pode ser usado pelo consumidor para encaminhar interesses diretamente via túnel para o produtor (ZHANG et al., 2016).

2. Buscar dados através de nomes de ponto de fixação mapeados – para orientar o interesse que transporta um nome inacessível do atual ponto de fixação do produtor, o nome do ponto de fixação corrente precisa ser anexado ao interesse de alguma forma. As propostas existentes exploraram duas opções: (i) antecipar o nome do ponto de fixação ao nome dos dados transportado no interesse e (ii) anexar o nome do ponto de fixação em um novo campo do pacote de interesse, chamado dica (ZHANG et al., 2016). No entanto, não é possível alterar o nome de qualquer pacote de dados, logo antecipar o nome do ponto de fixação requer a criação sob demanda de um novo pacote de dados, que tem o nome composto (i.e., nome do ponto de fixação mais o nome do conteúdo) e encapsula o pacote de dados original como seu

conteúdo. Por outro lado, o uso de dica não altera o nome original dos dados, mas requer modificações no processo de encaminhamento de interesses (ZHANG et al., 2016).

2.4.2 Perseguição do Produtor – Baseada em Rastreamento

As soluções baseadas em rastreamento aproveitam e estendem o plano de encaminhamento da NDN, a fim de criar a trilha de migração, para recuperar os interesses dos consumidores. Nessa abordagem, os dados são publicados sob o prefixo globalmente acessível do ponto de encontro (i.e., prefixo compartilhado, semelhante ao mapeamento com agente doméstico, Seção 2.4.1). Sempre que o produtor se move, envia interesse de comando de rastreamento para o ponto de encontro para criar ou atualizar um caminho inverso salto a salto (i.e., o rastreio produtor \leftarrow ponto de encontro). Em vez de recuperar dados, os interesses de comando de rastreamento solicitam interesses dos consumidores para recuperar os dados no produtor. Portanto, um interesse regular será encaminhado ao longo do rastreio se existir, caso contrário, será encaminhado usando a lógica de encaminhamento padrão da NDN (ZHANG et al., 2016). A Figura 2.9 ilustra essa abordagem.

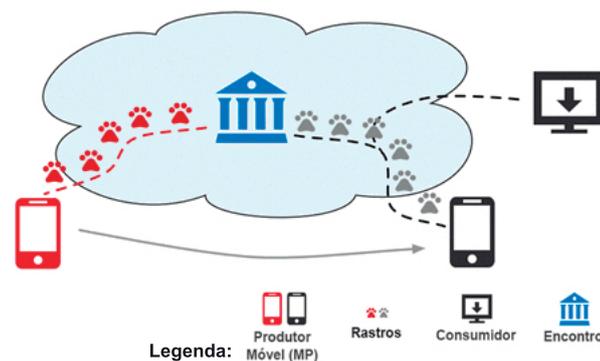


Figura 2.9 Abordagem baseada em rastreamento do produtor. Adaptado de Zhang et al. (2016).

Na abordagem baseada em rastreamento o ponto de encontro não precisa participar diretamente da comunicação entre o consumidor e o produtor, em vez disso, faz anúncios de roteamento com o prefixo do nome de dados, para atrair os interesses dos consumidores para os dados do produtor e os interesses de comando de rastreamento para si. Quando o produtor se move e o novo rastro (i.e., produtor \leftarrow ponto de encontro) cruza com um rastro anterior, os interesses dos consumidores que estão pendentes ao longo do rastro antigo podem ser encaminhados automaticamente para o novo rastro. Existem algumas propostas que, além de enviar o interesse de comando de rastreamento para o ponto de encontro, o produtor também envia o interesse de comando de rastreamento para o seu antigo ponto de fixação para buscar os interesses pendentes e minimizar a interrupção na transferência de dados (ZHANG et al., 2016).

De acordo com Zhang et al. (2016), foram exploradas duas alternativas para armazenar o estado de rastreamento, baseadas na FIB e na PIT:

1. O rastreamento na FIB – introduz uma tentativa de FIB (tFIB) dedicada, separada da FIB padrão. A tFIB é preenchida e atualizada com os interesses de comando de rastreamento. Um interesse regular será encaminhado ao longo do rastreamento, se existir uma correspondência na tFIB (ZHANG et al., 2016).
2. O rastreamento na PIT – estende a função da PIT para recuperar interesses. Insere um novo campo, *traceName*, nos pacotes de interesse, reservado para o nome do interesse de comando de rastreamento, para criar o rastro produtor \Leftarrow ponto de encontro, e um sinalizador para indicar se um interesse pode ser rastreado por outros interesses. Ao receber um interesse que contém um *traceName*, o roteador primeiro procura uma correspondência exata do *traceName* com as entradas “*bread crumbs*” da PIT. Se houver uma correspondência, o interesse será encaminhado através da interface de entrada do interesse de comando de rastreamento, caso contrário, será encaminhado usando o mecanismo padrão (ZHANG et al., 2016).

2.4.3 Encontro de Dados – Baseado em Depósito de Dados

Na NDN os dados podem ser facilmente separados do produtor original, portanto, em vez de perseguir o produtor é possível resolver o problema da mobilidade movendo os dados para um local de fácil acesso (e.g., estacionário) (ZHANG et al., 2016), como ilustrado na Figura 2.10.

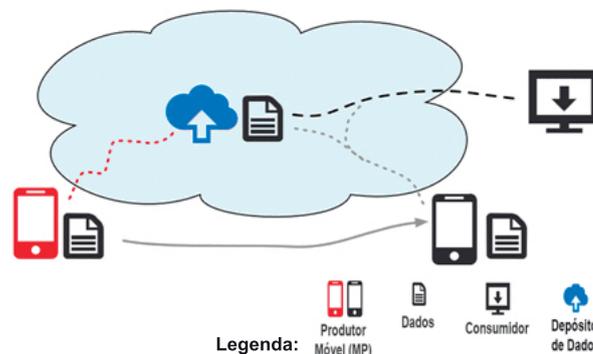


Figura 2.10 Abordagem baseada em depósito de dados. Adaptado de Zhang et al. (2016).

Um depósito de dados é semelhante a um agente doméstico nas soluções baseadas em mapeamento (Subseção 2.4.1), exceto que armazena os dados em vez de apenas encaminhar interesses. Por exemplo, um depósito de dados pode hospedar uma coleção de fotos enviadas por vários telefones móveis. Quando o depósito receber uma solicitação de foto, retornará a fotografia, se a mesma já havia sido carregada de um dispositivo para o depósito, ou tentará buscá-la sob demanda usando mapeamento (Subseção 2.4.1) ou rastreamento (Subseção 2.4.2) (ZHANG et al., 2016).

Em geral, um depósito de dados representa um encontro baseado em nomes, que atrai dados e interesses para si, para promover o encontro de ambos. A Internet atual executa essas funções na camada de aplicação. O armazenamento em nuvem, é um exemplo, atua

como um local de encontro baseado em nome e um depósito de dados para os usuários que constantemente geram dados. Uma vez que os dados são carregados para a nuvem, podem ser facilmente recuperados por outros usuários. Diferente da rede atual, a NDN suporta o encontro baseado em nomes na camada de rede, permitindo que o depósito de dados anuncie seu prefixo de nome na tabela de roteamento (ZHANG et al., 2016).

2.4.4 Encontro de Dados – Baseado em Local de Dados

Em algumas aplicações os dados são associados a uma região geográfica específica e podem ser gerados por qualquer produtor no local, como ilustrado na Figura 2.11. Por exemplo, nas aplicações de tráfego em rodovias os dados sobre as condições das vias em um determinado local podem ser gerados por qualquer um dos carros presentes na região. Outro exemplo é a coleta de informações de diagnóstico de um modelo de carro específico, por um determinado fabricante de automóveis, dentro de uma região (ZHANG et al., 2016).

O encaminhamento de interesses pode ser realizado usando um geo-roteamento ou dependendo de unidades de acostamento nas vias, para anunciar os prefixos específicos da região no sistema de roteamento. Quando um produtor na região receber um interesse, irá avaliá-lo (e.g., usando coordenadas do sistema de posicionamento global (do inglês, *Global Positioning System* (GPS)) atuais e informações cartográficas associadas) e, se as condições forem atendidas, responderá com os dados recém-gerados. De outra forma, o produtor também pode responder ao interesse recebido sem avaliações adicionais, se possuir em *cache* os dados correspondentes. Uma vez que o produtor se move para fora da região do local de dados, pode já não mais receber interesses para os dados da região, que podem ser respondidos por outro produtor no local. Assim, na abordagem de local de dados, o nó será um produtor por acaso (ZHANG et al., 2016).

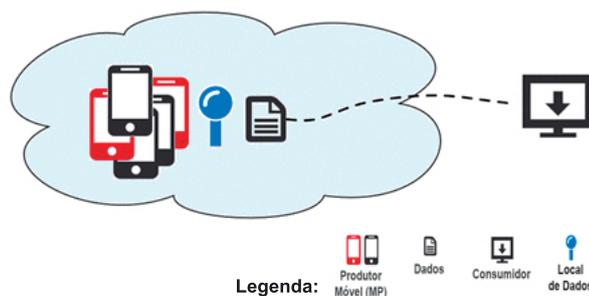


Figura 2.11 Abordagem baseada em local de dados. Adaptado de Zhang et al. (2016).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo discutiu os fundamentos gerais da abordagem de ICN, mostrou os seus principais projetos e arquiteturas, além das direções dessas redes. Dentre as arquiteturas abordadas, a CCN teve um maior enfoque, uma vez que é adotada pela NDN. Dessa forma, foram apresentados os detalhes da arquitetura da CCN/NDN tais como nomeação,

roteamento, armazenamento, segurança e mobilidade e, por fim, se discutiu as abordagens existentes na literatura de apoio à mobilidade de produtores nessas redes.

TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura abordando a problemática da mobilidade de produtores na NDN, como mencionado no capítulo anterior (Seção 2.4). Neste capítulo, são aprofundadas as discussões referentes aos principais trabalhos relacionados a esta pesquisa. Esses trabalhos lidam com a problemática da mobilidade, sob diversos aspectos e desenvolvem diferentes meios de apoio à mobilidade do produtor. De modo geral, os trabalhos existentes se diferem da *Shared Caching in Named Data Networking Mobile* (SCaN-Mob), principalmente, devido ao fato deles não considerarem a capacidade computacional dos dispositivos da borda da rede (e.g., *hosts* e *gateways*) para apoiar o movimento do produtor.

Os trabalhos relacionados são apresentados de acordo com a forma da abordagem empregada para apoiar a mobilidade. Para isso, os trabalhos foram divididos em duas abordagens gerais baseadas nos conceitos de redes *clean-slate* e redes evolucionárias (REX-FORD; DOVROLIS, 2010), como segue: (i) soluções puramente baseadas na NDN e (ii) soluções baseadas nas ideias empregadas no MIP das redes atuais. As duas abordagens são apresentadas nas seções seguintes, respectivamente. Além disso, são apresentadas algumas soluções que investigaram a cooperação dos dispositivos móveis na borda da ICN para resolver outros problemas.

3.1 SOLUÇÕES PURAMENTE NDN

Algumas soluções foram desenvolvidas seguindo os paradigmas da NDN, sem a utilização de mecanismos empregados pelas redes atuais. No trabalho de Lehmann, Barcellos e Mauthe (2016), os autores se concentraram em manter o conteúdo disponível no período de indisponibilidade do produtor. Para isso, desenvolveram uma estratégia baseada na replicação proativa e descarregamento de conteúdo. A estratégia segue os princípios da NDN e tira proveito de suas principais características para superar a perda de disponibilidade de conteúdo induzida pela mobilidade dos produtores. Dessa forma, quando um produtor cria um objeto de conteúdo, pode enviar uma ou mais réplicas para outros nós,

considerando os aspectos de tamanho da vizinhança do nó, grau de replicação de dados e política de colocação de conteúdo.

Como na arquitetura da NDN não existe o conceito de empurrar dados, devido à disseminação de conteúdo ser reativa (i.e., comunicação *receiver-driven*) em vez de proativa, na estratégia apresentada, os produtores sugerem a outros dispositivos que eles devem solicitar um determinado conteúdo. Um dispositivo que recebe a indicação pode segui-la ou não. No caso de usar a dica, o usuário requisita o conteúdo e o recupera do produtor. Essa alternativa é implementada na camada de aplicação, o que a torna compatível com o projeto da arquitetura da NDN. Sua desvantagem é o número de mensagens trocadas (e.g., dois pacotes de interesse para obter um pacote de dados) e o tempo para concluir a operação, o que diminui o desempenho da disseminação de conteúdo. Além disso, apresenta sobrecarga no produtor que deve replicar os dados periodicamente e na rede pela carga de pacotes extras trafegados. Assim como na SCaN-Mob, a estratégia deixa a cargo do mecanismo padrão da NDN a tarefa de executar a atualização das informações de roteamento após a reconexão do produtor em um novo local.

O trabalho de Farahat e Hassanein (2016), como no trabalho anterior, foca na fase de indisponibilidade do produtor. Os autores desenvolveram um esquema de otimização de *cache* para o suporte à mobilidade do produtor, chamado OpCacheMob (*optimal caching for producer mobility support*), que explora os preditores de localização e os padrões de solicitações de dados para armazenar, proativamente em *cache*, os conteúdos antes da ocorrência do *handoff* do produtor. Assim, espera-se que os interesses gerados durante um evento de mobilidade do produtor possam ser satisfeitos pelos itens de dados colocados em *cache* intencionalmente. Para isso, foi desenvolvida uma formulação matemática para o problema de *cache*, que limita o custo de atualização de *cache* e o atraso do consumidor, enquanto minimiza a sobrecarga da rede causada pelas alterações de disponibilidade de conteúdo.

A OpCacheMob faz as estimativas dos dados que poderão ser solicitados durante o período de convergência, com base nas informações de tempo de *handoff* do produtor e padrões de requisição de dados. Dessa forma, encontra os potenciais interesses que podem ser removidos e os dados que devem ser armazenados. No entanto, para tal, assume a premissa que essas informações estão sempre disponíveis e corretas (i.e., perfeito conhecimento do futuro). Além disso, armazenar os dados antecipadamente em *cache* causa uma sobrecarga que pode ser de três tipos: atualização de caminho quando é usado o *off-path caching* para hospedar os dados; custo de *cache* devido à alta substituição de dados e, por último, o tráfego do produtor que deverá lidar com as solicitações proativas, além de sua carga regular. Esse tráfego causa uma sobrecarga no produtor e deve ser limitado. Os autores propuseram, ainda, uma divisão da *cache* com um espaço reservado para as solicitações móveis, de modo a evitar a substituição dos dados antes de serem respondidos. A OpCacheMob embora apresente resultados significativos, em alguns casos, possui erros de predição de localização do produtor móvel, afetando o desempenho do armazenamento de dados e pode também haver erro de predição de falso *handoff* para o produtor estático, impactando numa sobrecarga extra gerada pela otimização desnecessária.

No trabalho de Woo et al. (2014), os autores propuseram uma solução, chamada de PNPCCN (*Proactive Neighbor Pushing CCN*), que considera a popularidade e a raridade

de dados para apoiar a mobilidade do produtor na CCN. A PNPCCN, assim como a SCaN-Mob e a estratégia proposta por Lehmann, Barcellos e Mauthe (2016), apresenta uma avaliação comparativa com a abordagem da arquitetura da CCN padrão. No entanto, a PNPCCN realiza um estudo simplificado com uma limitada quantidade de nós móveis (i.e., apenas um consumidor e um produtor). A proposta é semelhante a SCaN-Mob por fazer alterações nos pacotes, contudo, altera os pacotes de interesse e dados, além de criar outras variações desses pacotes. A PNPCCN é proativa e necessita fazer alterações no mecanismo de comunicação *receiver-driven* da arquitetura original da CCN, assim como a estratégia de Lehmann, Barcellos e Mauthe (2016). Por fim, a PNPCCN apesar de estender a função do ponto de acesso (do inglês, *Access Point* (AP)) para apoiar a mobilidade do produtor, a mesma ignora a capacidade computacional dos dispositivos móveis para tal tarefa.

Em Gao e Zhang (2016) é proposto um *framework* escalar, chamado SMM (*scalable mobility management*), para gerenciar a mobilidade do produtor. O SMM adota um mecanismo de separação para prover o mapeamento do identificador e localizador do produtor, visando manter a estabilidade do plano de roteamento. No SMM o nome do conteúdo é usado apenas para identificar os dados requisitados, em vez de rotear os pacotes de interesse. O produtor define o nome de localização dos conteúdos armazenados localmente, como o nome do AP. Para suportar a mobilidade, o produtor precisa registrar a ligação entre o nome do conteúdo e o nome de localização no sistema de mapeamento identificador/localizador. Dessa forma, quando uma pesquisa da rota do interesse falha na FIB do AP, este enviará uma mensagem especial de pesquisa para consultar o nome de localização dos dados solicitados e, após isso, encaminhará o interesse para a localização atual do conteúdo diretamente. O SMM introduz uma carga extra na rede através do envio de pacotes especiais. Além disso, necessita da adição de elementos extras na rede para desempenhar a função de servidor de mapeamento.

3.2 SOLUÇÕES BASEADAS NO MIP

Algumas abordagens tentaram resolver o problema da mobilidade do produtor na NDN, através da adoção de mecanismos utilizados na rede IP. No trabalho de Ge et al. (2016), os autores propuseram um algoritmo de encaminhamento de pacotes capaz de atualizar a FIB dos nós com base nos padrões de mobilidade e estado da rede. A abordagem integra a NDN com as Redes Definidas por *Software* (do inglês, *Software Defined Networking* (SDN)). Na solução, o produtor móvel relata suas informações de movimentação para o controlador SDN antes do *handoff*. O controlador atualiza a FIB dos roteadores com base nas informações coletadas, a respeito da localização dos produtores móveis, e no estado da rede. Entretanto, a FIB dos nós deve ser atualizada rapidamente para suavizar o processo de solicitação de conteúdo, uma vez que qualquer atraso na atualização da FIB pode deteriorar o desempenho da rede, pois os pacotes trafegados, entre o produtor e os consumidores, podem percorrer um caminho mais longo do que o esperado.

O trabalho se concentrou em melhorar o desempenho da etapa de reconexão do produtor após o seu *handoff* e, assim, não considerou os períodos de indisponibilidade do produtor durante sua movimentação, ou seja, assumiu que na topologia da rede sempre há

interseção entre a cobertura do sinal dos APs. No entanto, em cenários reais de rede é comum existir a disjunção entre o sinal dos APs, causando os períodos de indisponibilidade do produtor. Além disso, a solução empregada não seguiu puramente os princípios da NDN por envolver o paradigma da SDN, deixando a cargo do controlador as atualizações das rotas nas FIBs.

No trabalho de Gao et al. (2017), os autores propuseram uma abordagem de suporte à mobilidade do produtor baseada em uma entidade de *proxy* (i.e., semelhante a ideia da rede IP), chamada de PMNDN (*Proxy based Mobility support approach for mobile NDN environment*). Nessa abordagem, os APs tiveram suas funcionalidades estendidas para rastrear o estado de mobilidade do produtor e sinalizar para a entidade *proxy* sobre o evento de *handoff*. O *proxy*, por sua vez, tem a função de gerenciar a mobilidade do produtor e manter as suas informações de localização. A PMNDN se assemelha a SCaN-Mob por alterar a estrutura original dos pacotes e adicionar os identificadores locais nos dispositivos. No entanto, a PMNDN modifica a regra de pesquisa na FIB para, primeiro, consultar a correspondência de prefixo mais longo no identificador inserido no pacote de interesse e, em seguida, no nome do interesse se a pesquisa anterior falhar. Dessa forma, na PMNDN os identificadores são utilizados no processo geral de encaminhamento, diferente da SCaN-Mob que os utiliza apenas com contexto local.

3.3 SOLUÇÕES NA BORDA PARA OUTROS FINS

Alguns trabalhos recentes têm investigado a capacidade computacional e a cooperação dos dispositivos na borda da rede sem fio em conjunto com a abordagem da ICN, entretanto, para resolver outros problemas diferentes ao da mobilidade dos produtores. Isso mostra que a SCaN-Mob tem potencial e relevância. Em Panwar et al. (2017), é apresentada uma estratégia de encaminhamento para ICN, chamada DICE (*Dynamic Multi-RAT Selection in the ICN-enabled Wireless Edge*), que auxilia os dispositivos na seleção dinâmica de interfaces entre as disponíveis, uma vez que os dispositivos móveis atuais possuem múltiplas tecnologias de acesso a rádio. A DICE avalia o estado dos enlaces de borda e o congestionamento da rede para determinar o número mínimo de interfaces necessárias para executar a entrega de dados.

No trabalho de Rehman e Kim (2017), os autores propuseram um protocolo, chamado LOMCF (*location-aware on-demand multipath caching and forwarding*), para ambientes de redes móveis *ad hoc* (do inglês, *Mobile Ad hoc Networks* (MANETs)) baseados em NDN. Esse protocolo visa reduzir os problemas causados pela natureza *broadcast* do meio de acesso sem fio (e.g., colisões de pacotes, inundação, redundância de dados e retransmissões de pacotes) que degradam o desempenho da rede. O LOMCF é composto principalmente de uma política de *cache* baseada na distância dos nós, uma vez que os enlaces *ad hoc* do ambiente são extremamente instáveis, e um mecanismo de encaminhamento *multipath*. De modo geral, o protocolo se assemelha a SCaN-Mob, porém foi planejado para um outro tipo de ambiente e com uma finalidade diferente.

No trabalho de Hahm et al. (2017), os autores propuseram um protocolo, chamado CoCa (*Cooperative Caching*), para a NDN que permite o armazenamento cooperativo e distribuído de conteúdo proveniente dos dispositivos da Internet das coisas (do inglês,

Internet of Things (IoT)). O CoCa visa possibilitar que o conteúdo relevante da IoT permaneça disponível a qualquer momento, enquanto os dispositivos permaneçam no modo de espera na maior parte do tempo com os recursos de suspensão e economia de energia habilitados. Dessa forma, menos dispositivos precisam estar ativos, enquanto outros podem hibernar, e os dados ainda estarão disponíveis localmente a qualquer momento.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram discutidos vários trabalhos que se relacionam com a presente dissertação. Além dos trabalhos apresentados, ainda, existem outros na literatura. Pode-se notar que alguns trabalhos já abordaram a problemática da mobilidade do produtor na NDN. Entretanto, os trabalhos propostos até então não consideram a capacidade computacional dos dispositivos móveis para apoiar a mobilidade do produtor, enquanto outros trabalhos investigaram a capacidade computacional desses dispositivos na ICN para outras finalidades. Dessa forma, o presente trabalho é pioneiro por considerar os recursos computacionais de armazenamento dos dispositivos, localizados na borda da rede sem fio, para auxiliar no suporte à mobilidade do produtor.

SOLUÇÃO SCAN-MOB

Este capítulo apresenta a solução proposta SCaN-Mob, que viabiliza o uso eficiente da *cache* dos dispositivos na borda da rede sem fio para apoiar a mobilidade dos produtores. A proposta é apresentada como segue: a Seção 4.1 inicia o capítulo apresentando uma visão geral da SCaN-Mob. Na Seção 4.2, discute-se o formato dos pacotes e o envio das sondas. A Seção 4.3 apresenta a estratégia de encaminhamento proposta. Em seguida, na Seção 4.4, são detalhadas as modificações realizadas na camada de estratégia da NDN para desenvolver a SCaN-Mob. Após isso, a Seção 4.5 aborda a política de substituição de *cache* proposta. Por fim, são discutidas as considerações finais do capítulo na Seção 4.6.

4.1 VISÃO GERAL DA SCAN-MOB

Este trabalho apresenta uma solução que visa minimizar os impactos causados na rede, pela mobilidade de produtores na NDN, através do uso oportunista da *cache* dos nós presentes na borda da rede sem fio. Ao usar sua *cache*, um nó móvel pode até servir como meio de rede entre áreas desconectadas ou fornecer conectividade atrasada em enlaces esporadicamente conectados (JACOBSON et al., 2009). O objetivo é proporcionar que os produtores sejam capazes de replicar seus dados, de forma a manter a maior diversidade de conteúdos entre os nós e que estes possam armazenar os dados com o mínimo de esforço, para que os interesses futuros consigam ser satisfeitos mesmo durante o período de indisponibilidade do produtor.

A solução se baseia no princípio básico de armazenar os dados que trafegam na rede sem fio, de modo a evitar as replicações em todos os nós do domínio, com o intuito de alcançar uma maior diversidade de conteúdos na rede. Isso é possível, pois a NDN possui características como *cache* na camada de rede e entrega *multicast*, além de viabilizar que os dados possam ser facilmente retirados dos produtores originais, uma vez que a proteção é aplicada diretamente sobre os mesmos e não no meio de acesso, como no caso da rede IP (ZHANG et al., 2016). A SCaN-Mob se beneficia dessas características da NDN e permite que os dados sejam armazenados sem esforço e oportunisticamente,

através da comunicação *broadcast* das redes sem fio. Por outro lado, as retransmissões de interesses inundam a rede, devido à característica citada do canal sem fio, por isso, a solução controla essas retransmissões.

Para desenvolver a solução houve a necessidade de realizar pequenas modificações na arquitetura original da NDN, a fim de alcançar os objetivos almejados. A Figura 4.1 retrata a arquitetura padrão da NDN, bem como as alterações realizadas. É possível observar que as modificações se deram na camada de estratégia e na camada de aplicação (i.e., topo da pilha). Na camada de aplicação foi adicionado um novo tipo de pacote, chamado de pacote sondas (do inglês, *probes*), que tem a função de permitir que os nós conheçam os seus vizinhos. Além disso, o pacote de dados sofreu o acréscimo de dois novos campos: `nodeIdToCaching` e `dataPriority`, o primeiro é destinado a manter o identificador (i.e., id) do nó selecionado para armazenar o conteúdo em *cache* e o último é destinado a armazenar a prioridade do conteúdo. Já na camada de estratégia foi acrescentada uma nova estratégia de encaminhamento de pacotes e uma nova política de substituição de *cache*, além de uma estrutura para manter em cada nó uma lista de seus vizinhos, chamada de tabela de identificação de vizinhos (do inglês, *Neighbors Identification Table* (NIT)).

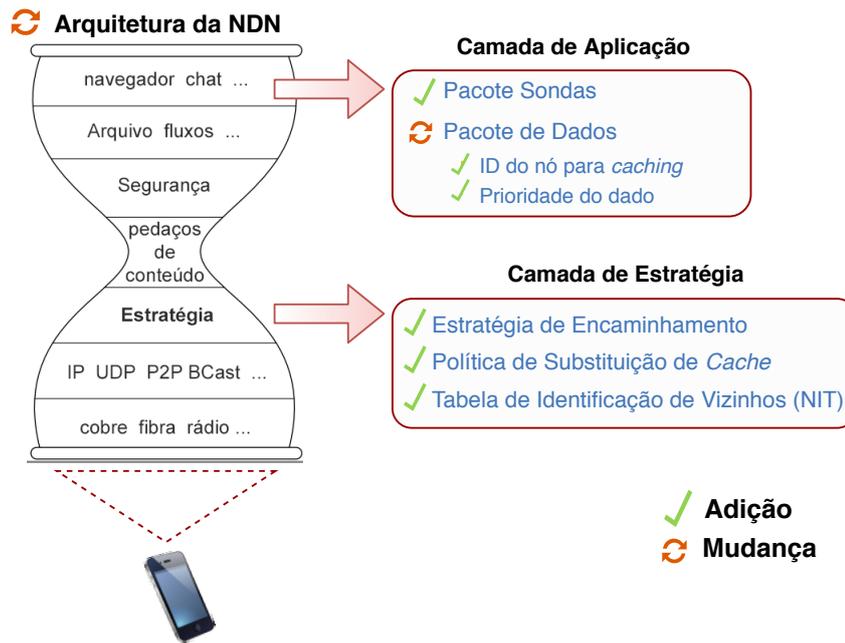


Figura 4.1 Modificações na arquitetura da NDN.

As modificações mais significativas realizadas na arquitetura da NDN para o desenvolvimento da SCan-Mob foram a criação do pacote sondas e da estrutura NIT. As demais alterações efetuadas apresentam-se genéricas, uma vez que os pacotes de dados da SCan-Mob podem ser utilizados pela NDN padrão sem haver problemas, pois os campos adicionados nesses pacotes poderiam ficar vazios (i.e., a NDN simplesmente ignora os campos adicionados pela SCan-Mob). Além disso, a estratégia de encaminhamento

e a política de *cache* propostas são incrementos e atuam com a finalidade de atender os objetivos da proposta. Visto que existem várias estratégias e políticas, com finalidades específicas, presentes na literatura.

A SCaN-Mob pode inclusive atuar em conjunto com a NDN padrão, por exemplo, o núcleo da rede pode adotar a arquitetura padrão e a borda empregar a SCaN-Mob. Outra possível situação é a ocorrência de nós na borda que utilizam a SCaN-Mob junto com os nós que utilizam a NDN. O impacto que isso provoca é que os nós da proposta não conseguem utilizar a *cache* dos nós da NDN (i.e., não haverá a priorização e/ou remoção de dados de acordo com os objetivos da proposta, nesses nós), uma vez que os mesmos não possuem a política de *cache* proposta. Apesar disso, a interoperabilidade entre os nós das duas abordagens (i.e., NDN e SCaN-Mob) é mantida.

A arquitetura da solução e os detalhes de suas funcionalidades são apresentados nas próximas seções.

4.2 PACOTES DA SCAN-MOB

Na camada de aplicação da SCaN-Mob foram adicionados os pacotes sondas e as modificações no pacote de dados, o formato desses pacotes está representado na Figura 4.2. Contudo, o pacote de interesse não sofreu nenhuma modificação e permaneceu igual ao da arquitetura original da NDN, como apresentado no Capítulo 2 (Seção 2.3). Os pacotes sondas foram implementados como uma variante dos pacotes de interesse, no entanto, a funcionalidade de cada um representa uma diferença fundamental entre esses tipos de pacotes. Enquanto os pacotes de interesse têm a função de recuperar dados, os pacotes sondas têm a função de anunciar a presença do nó para os seus vizinhos na rede. Essa tarefa simples dos pacotes sondas permite que sua função seja desempenhada utilizando o campo nome, portanto, sua carga útil é vazia tornando esses pacotes bastante leves, assim como os pacotes de interesse.

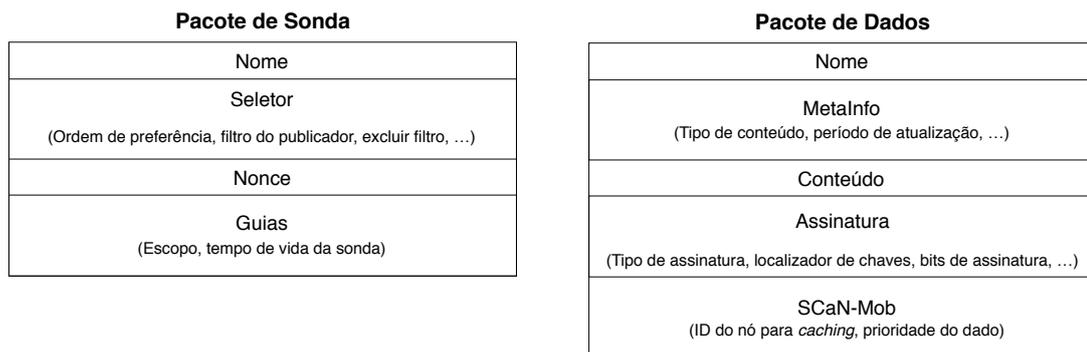


Figura 4.2 Formato dos pacotes da SCaN-Mob.

Os pacotes de dados da SCaN-Mob ganharam dois novos campos, o `nodeIdToCaching` que é reservado para transportar o identificador (i.e., id) do nó selecionado para armazenar em sua *cache* a réplica do pacote de dados e o segundo campo `dataPriority` que é reservado para transportar a prioridade atribuída ao conteúdo. Medidas semelhantes foram tomadas nos trabalhos de Gao et al. (2017), Woo et al. (2014), Gao e Zhang

(2016), que adicionaram novos campos nos pacotes originais da NDN. A modificação no pacote de dados foi necessária para evitar a criação de um tipo de pacote específico, que seria destinado apenas para desempenhar o controle da solução, o que resultaria na geração de mais tráfego na rede.

Na SCaN-Mob os nós da borda da rede possuem um simples identificador, o que permite a distinção entre os mesmos, para facilitar o alcance de um determinado nó em específico dentro do domínio. Uma medida semelhante, baseada em identificadores para os nós, foi adotada no trabalho de Gao et al. (2017). Entretanto, no caso da SCaN-Mob essa medida não contraria os princípios da NDN, pois os identificadores não são utilizados para manter uma comunicação fim a fim como na rede IP, em vez disso, têm valor apenas no contexto da rede local, semelhante a função do endereço de controle de acesso ao meio (do inglês, *Media Access Control* (MAC)). Dessa forma, a função do endereço MAC pode ser estendida para identificar os nós na SCaN-Mob. Essa medida foi necessária para possibilitar que o produtor possa escolher um certo nó para depositar seus dados, uma vez que todos os nós da rede sem fio podem receber os pacotes trafegados (i.e., visto que o AP tem amplo alcance no domínio) e, além disso, os nós poderiam não estar identificados, já que na arquitetura da NDN não há a necessidade de endereço IP nos nós. O prefixo não foi utilizado como identificador, pois os nós recém-ingressantes na rede ou aqueles não produtores não teriam prefixo para anunciar, portanto, não seriam conhecidos pelos vizinhos.

Periodicamente os nós da rede sem fio enviam pacotes sondas contendo no campo nome o seu identificador, no seguinte formato: */id*, o caractere */* é utilizado pela estratégia de encaminhamento do nó para enviar o pacote na rede e o *id* representa o nó exclusivamente. As sondas chegam no AP que retransmite esses pacotes na rede. Dessa forma, todos os nós da rede sem fio recebem as sondas, via *broadcast*. Ao receber um pacote desse tipo, o nó extrai do campo nome o *id* para inserir ou atualizar uma entrada em sua estrutura NIT. Após esse processo, a NIT de cada nó se mantém atualizada, permitindo que os nós conheçam os seus vizinhos da rede local. Dessa forma, as sondas são responsáveis pela manutenção da NIT dos nós.

4.3 ESTRATÉGIA DE ENCAMINHAMENTO

Na arquitetura da NDN, sempre que um interesse chega em um determinado nó, primeiro é verificada sua *cache* em busca dos dados correspondentes, se não for encontrada correspondência para os dados na *cache*, o nó encaminha o interesse na rede (ZHANG et al., 2014). Para encaminhar interesses é utilizado um módulo de estratégia de encaminhamento a NDN padrão possui algumas estratégias como, por exemplo, *best-route* e *multicast* (MASTORAKIS; AFANASYEV; ZHANG, 2017). A estratégia de encaminhamento é que determina o que deve ser feito com o pacote de interesse (e.g., se o encaminha, quando e para onde) e pode inclusive removê-lo em determinadas situações (e.g., congestionamento ou ataque na rede) (ZHANG et al., 2014).

Seguindo o propósito desta pesquisa foi desenvolvida uma nova estratégia de encaminhamento, que controla o repasse de pacotes de interesse e bloqueia os pacotes *nacks* nos dispositivos móveis, a fim de minimizar os efeitos do *broadcast storm* na rede sem

fi. Os interesses podem ser encaminhados em até um salto dentro do domínio, pois em um ambiente de rede local, o envio de um pacote com um salto permite que os nós presentes no domínio sejam alcançados com o pacote. Portanto, as retransmissões dentro do domínio representam uma redundância desnecessária que prejudica o desempenho da rede, através da inundação de pacotes.

A lógica do funcionamento da estratégia de encaminhamento desenvolvida está representada na Figura 4.3. É possível observar que após um determinado nó receber um pacote e ler as informações presentes em sua FIB, o mesmo verifica se o pacote vem de sua aplicação local (i.e., o nó gerou o pacote) e, em seguida, se o pacote é interesse ou sonda, em caso positivo, o pacote é encaminhado na rede, caso contrário, o pacote é removido. Dessa forma, os pacotes de interesse e as sondas podem ser encaminhados, no entanto, os pacotes *nacks* são bloqueados nos dispositivos móveis.

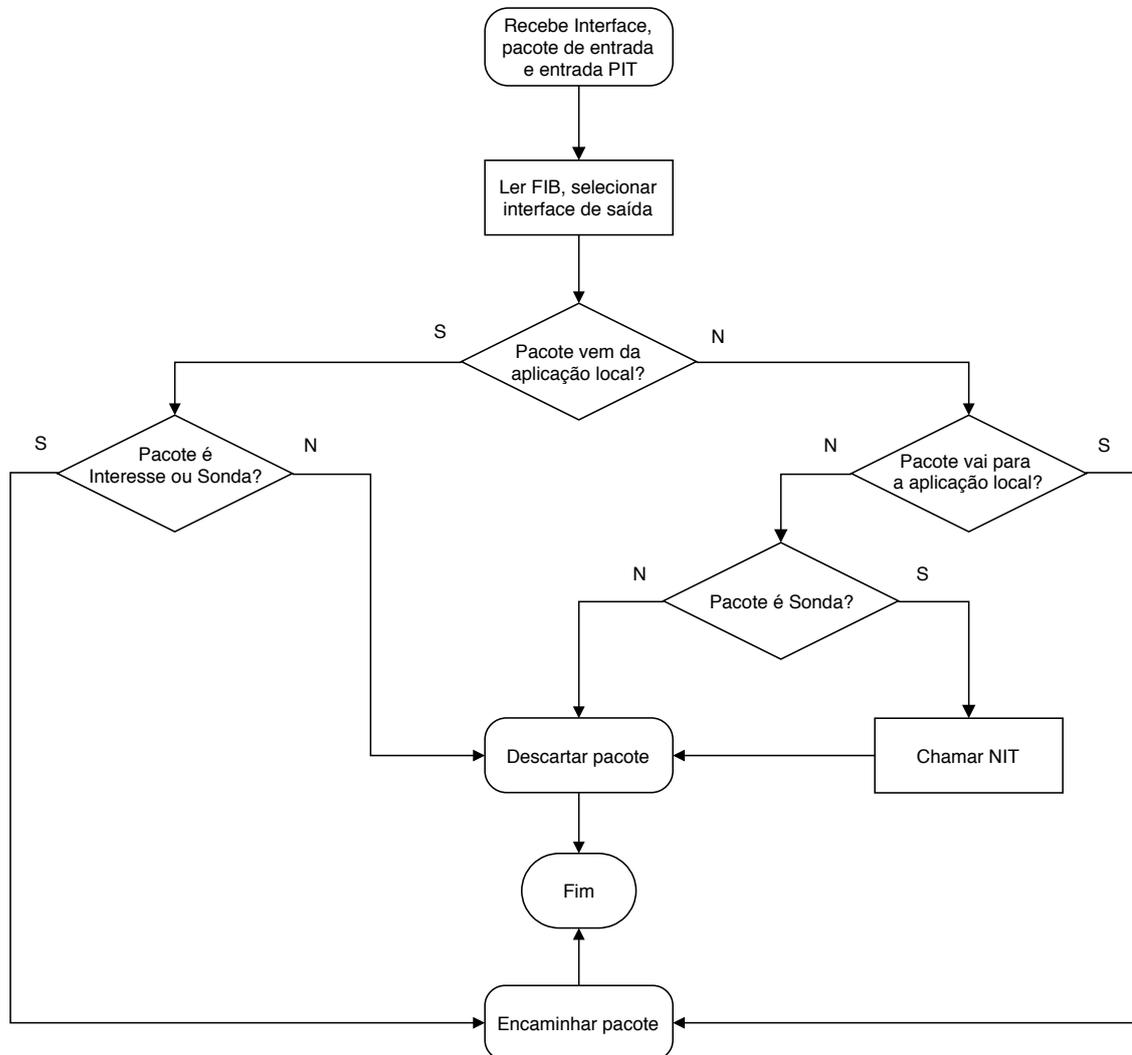


Figura 4.3 Fluxograma da estratégia de encaminhamento proposta.

Quando o pacote não vem da camada de aplicação do nó (i.e., vem da rede) é verificado

o seu destino. Se o pacote se destina para a aplicação local, o mesmo é encaminhado para as camadas superiores. Por outro lado, se o pacote tem outro destino (i.e., a rede) é verificado o seu tipo. Caso o pacote seja do tipo sonda, o mesmo é utilizado para atualizar a NIT do nó com o identificador presente na sonda e, em seguida, é descartado. De outra forma, caso o pacote não seja uma sonda é apenas removido imediatamente.

4.4 CAMADA DE ESTRATÉGIA

Na camada de estratégia da NDN é onde ocorre a tomada de decisões quando o nó recebe um determinado pacote. Podem ser feitas consultas na CS, PIT e FIB se o pacote é de interesse e consultas na PIT e CS se o pacote é de dados. Os pacotes de interesse são repassados para a estratégia de encaminhamento do nó e os pacotes de dados são repassados para as camadas inferiores (ZHANG et al., 2014). Além disso, a camada de estratégia explora as múltiplas conectividades do nó, analisa e mede o desempenho de vários caminhos para um determinado destino assim, pode selecionar dinamicamente a melhor interface disponível para enviar pacotes, adaptando-se às mudanças de desempenho da rede (JACOBSON et al., 2009).

Neste trabalho, as modificações realizadas na camada de estratégia representam duas importantes decisões: (i) qual nó deve armazenar a réplica do dado, já que todos os nós do domínio sem fio irão recebê-lo e, (ii) qual prioridade este dado terá sobre aqueles presentes na *cache* do nó, selecionado na decisão anterior, visto que a *cache* pode ter atingido sua capacidade de armazenamento. As respostas e reflexões para esses dois questionamentos estão detalhadas nas subseções seguintes, 4.4.1 e 4.4.2, respectivamente.

4.4.1 Seleção do Nó para Armazenamento

Na NDN padrão os nós armazenam todos os conteúdos que passam por eles e usam a política de colocação de dados LCE (THAR et al., 2015; REHMAN; KIM, 2017). Contudo, em decorrência da restrição do limite de espaço de armazenamento em *cache*, utilizam políticas de substituição de dados. Por outro lado, nas redes sem fio os pacotes trafegam via *broadcast* para os nós, através do AP. Portanto, em um ambiente de NDN sem fio um determinado dado é armazenado na *cache* de todos os nós presentes no domínio, pois os pacotes são transmitidos sem qualquer referência de destinatários ou localização (BRITO; VELLOSO; MORAES, 2014). Como resultado, o número de pacotes duplicados é aumentado na rede (REHMAN; KIM, 2017) e o espaço da *cache* é utilizado de forma ineficiente (THAR et al., 2015). Esses mecanismos apresentam-se inadequados e desperdiçam os recursos computacionais dos dispositivos, através das replicações redundantes de dados.

Devido à ineficiência dos mecanismos apresentados e a limitação dos recursos computacionais dos dispositivos, na solução proposta sempre que um determinado nó gera um novo dado ou recebe uma requisição para um dado já existente, o mesmo insere no campo `nodeIdToCaching` do pacote de dados o identificador do nó que deve armazená-lo, após realizar uma simples consulta em sua NIT (e.g., que foi atualizada pelas sondas). Em seguida, o pacote de dados é finalmente encaminhado. Dessa maneira, apenas o nó

selecionado deve armazenar o respectivo dado, que pode ser removido pelos demais nós que o receberem. Assim, evita-se as replicações desnecessárias o que maximiza o espaço na *cache* dos nós para armazenar uma maior quantidade de dados, possibilitando diversificar os conteúdos na rede e, conseqüentemente, aumentando as chances de resposta aos interesses futuros.

O processo de seleção do nó para armazenar a réplica do dado, bem como a inserção de sua prioridade, está representado no Algoritmo 1. O algoritmo aplica a política de escalonamento Round-Robin na NIT, com a finalidade de distribuir os dados entre os nós do domínio e evitar as replicações redundantes. A arquitetura da SCan-Mob apresenta-se modular, dessa forma, poderia ser utilizado algum outro algoritmo de seleção de nós na NIT (e.g., randômico, *First-In First-Out* (FIFO), etc).

Algoritmo 1: Seta a prioridade do dado e seleciona o nó para armazená-lo.

```

Entrada: pacote de dados, (data) e interface de saída, (outFace)
Saída: pacote de dados, (data)
1 início
   // calcular tempo de vida do enlace.
2  linkTime = GETLINKLIFETIME(ap, node)
3  dp = dpmax - linkTime
4  data.SETDATAPRIORITY(dp)
5  se NIT ≠ ∅ então
   // linkTime crítico, provável handoff.
6    se linkTime ≤ α então
7      | data.SETNODEIDTOCACHING(apid) /* marca AP id          */
8      senão
9        | // linkTime não crítico, escolhe um nó.
10       | frontid = id do primeiro nó vizinho ∈ NIT
11       | data.SETNODEIDTOCACHING(frontid) /* marca nó id      */
12       | NIT.ROUNDROBIN(frontid)
13     fim
14   fim
15   outFace.SENDATA(data) /* encaminha o dado                */
fim

```

Na linha 2, é calculado o tempo de vida estimado do enlace do nó (i.e., que corresponde ao tempo máximo de permanência do nó na rede), *linkTime*, detalhes na subseção 4.4.2. Em seguida, na linha 3, foi definida a prioridade máxima de um certo dado (do inglês, *data priority maximum* (*dp_{max}*)) igual ao valor 100. Portanto, os dados encaminhados pelos nós com baixo *linkTime* terão uma alta prioridade de dados (do inglês, *data priority* (*dp*)) (i.e., quanto menor for o *linkTime*, maior será o *dp*, dada a operação, *dp_{max}* - *linkTime*). Uma vez que o dado teve sua prioridade calculada, a mesma é inserida no campo *dataPriority* do pacote de dados (linha 4). A informação da prioridade dos dados será utilizada pela política de *cache* proposta, quando os dados chegarem no seu

destino.

Na linha 5, é feita uma verificação na NIT do nó em busca de vizinhos conhecidos, a fim de selecionar o vizinho que deve armazenar o conteúdo. Esse conteúdo pode ter sido recém-gerado no produtor (e.g., vindo da aplicação), poderia já estar presente na *cache* do nó ou pode ser um reencaminhamento (e.g., vindo da rede), no caso do AP. Se o nó, ainda, não conhecer vizinhos (i.e., sua NIT está vazia), o dado é repassado para as camadas inferiores na pilha de protocolos NDN com o identificador do nó atual (linha 14).

Caso o nó já possua algum vizinho em sua NIT, é preciso decidir em qual deles a réplica dos dados deverá ser armazenada, além dos dispositivos existe a opção de selecionar o AP para o armazenamento (i.e., na arquitetura NDN os nós possuem uma CS para armazenar os dados). O processo de seleção do nó para armazenamento de dados é ilustrado na Figura 4.4. Na figura, é possível observar que o alcance de transmissão do AP foi dividido em duas áreas, utilizando a teoria dos conjuntos, como a seguir:

- Área B – é o conjunto que corresponde à área total de alcance da cobertura do AP.
- Área A – é um subconjunto de B , com menor área de cobertura (i.e., $A \subset B$). O intervalo entre A e B corresponde ao complemento da área A , denotado por A^c . Foi definido um limiar α que equivale ao raio da área A^c . Dessa forma, os nós localizados na área A estão numa zona livre de *handoff*. No entanto, os nós localizados na área A^c estão numa zona de *handoff*.

Dessa forma, na zona livre de *handoff* (i.e., representada por A) os nós encontram-se próximos ao AP. Por outro lado, na zona de *handoff* (i.e., representada por A^c) os nós encontram-se numa região com um alto índice de chances de ocorrer *handoff*, devido ao limite de cobertura do sinal do AP.

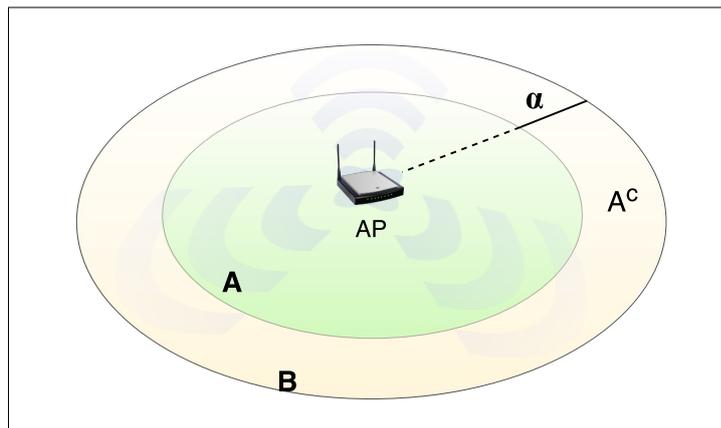


Figura 4.4 Alcance do sinal do AP representado pela área virtual A e área real B .

Após a apresentação da visão geral do cenário e de volta ao Algoritmo 1, é mostrado no algoritmo o processo de seleção dos nós para armazenamento. Na linha 5, caso o nó conheça algum vizinho (i.e., $NIT \neq \emptyset$), então é preciso escolher qual dos vizinhos

presentes na NIT deve armazenar o dado. Na linha 6, é comparado o tempo restante de permanência do nó na rede, `linkTime`, com o limiar α para saber a possível localização do nó. Caso o nó esteja na *zona de handoff*, então o nó está prestes a sair do raio de alcance do AP, dessa forma escolhe o próprio AP para armazenar seus dados, pois o AP apresenta uma maior capacidade de armazenamento (linha 7). Em seguida, o nó encaminha os dados na rede (linha 14).

Por outro lado, se o nó encontra-se na área da *zona livre de handoff*, o mesmo irá selecionar um dispositivo do domínio, já que a ocorrência de *handoff* para o nó é improvável no momento (linha 8). Assim, o nó lê sua NIT para obter um vizinho (linha 9), realiza a marcação do identificador do vizinho escolhido no campo `nodeIdToCaching` do pacote de dados (linha 10), posteriormente, aplica o algoritmo Round-Robin na NIT para agendar o próximo nó vizinho que deverá armazenar a réplica do pacote de dados que estiver sendo solicitado no nó atual (linha 11). Por fim, o nó encaminha o dado na rede, contendo suas devidas informações de destino e prioridade (linha 14).

4.4.2 Cálculo de Prioridade dos Dados

A prioridade dos dados é utilizada pela política de substituição de *cache* proposta (Seção 4.5). O cálculo da prioridade dos dados foi brevemente discutido no Algoritmo 1 da seção anterior. Nesta seção, o cálculo é apresentado como segue: sejam dois pontos P e Q (e.g., os pontos poderiam ser o nó móvel e o AP), com coordenadas vetoriais tridimensionais x , y e z , logo $P = (p_x, p_y, p_z)$ e $Q = (q_x, q_y, q_z)$. Utilizando a fórmula da distância Euclidiana para obter o caminho mais curto, em forma de uma reta, entre os dois pontos, tem-se a Equação 4.1, que também pode fornecer a velocidade v relativa dos nós. Uma medida semelhante foi adotada no trabalho de Rehman e Kim (2017), que também utilizou essa fórmula para o cálculo da distância entre os nós.

$$d_{PQ} = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2 + (p_z - q_z)^2} \quad (4.1)$$

Aplicando a distância d_{PQ} , obtida na Equação 4.1, na variação da fórmula original de velocidade do Movimento Retilíneo Uniforme (MRU), temos a Equação 4.2, para o cálculo do tempo. Seja r , o raio de alcance máximo do sinal do AP, r subtraído a distância atual do nó (i.e., d_{PQ}), tem-se a distância relativa para o limite da área de cobertura do AP. A predição do tempo t é realizada, portanto, por meio da divisão da distância restante do nó para atingir o limite de cobertura do sinal do AP (i.e., $r - d_{PQ}$) pela sua velocidade v .

$$\begin{aligned} t &= \frac{d_{PQ}}{v} \\ &= \frac{r - d_{PQ}}{v} \end{aligned} \quad (4.2)$$

O valor obtido de t é utilizado pelo Algoritmo 1, na variável `linkTime`. Embora, tenha sido considerada a velocidade do nó e a sua distância em relação ao AP, para calcular e atribuir uma prioridade aos seus dados, a prioridade poderia ser obtida de outras formas como, por exemplo, considerando a intensidade de sinal que o nó recebe do AP, o nível da carga de bateria disponível no nó ou a combinação de ambos.

4.5 POLÍTICA DE SUBSTITUIÇÃO DE CACHE

Na NDN padrão existem algumas políticas de substituição de *cache* como, por exemplo, FIFO, LRU, LFU (MASTORAKIS; AFANASYEV; ZHANG, 2017). Essas políticas possuem características particulares, mas compartilham uma finalidade comum de substituir dados na *cache* dos nós. Sempre que um pacote de dados é transmitido na rede NDN sem fio, os nós presentes no domínio podem receber o pacote via *broadcast* e, assim, armazenar os dados. Como consequência disso, a *cache* dos nós terão armazenado praticamente os mesmos conteúdos, gerando uma grande redundância de dados com o espelhamento de *cache*.

A solução proposta apresenta uma nova política de substituição de *cache*, com base na prioridade dos dados. No entanto, a política precisa atuar em conjunto com a camada de estratégia modificada, como apresentado nas seções anteriores, onde é feita a marcação no pacote de dados informando a prioridade que esse dado possui e o identificador do nó que deve armazená-lo. A política de *cache* desenvolvida está representada no Algoritmo 2. Todos os nós da rede sem fio, inclusive o AP, devem possuir essa política instalada em sua pilha de protocolos NDN, para possibilitar um melhor desempenho da solução proposta.

Algoritmo 2: Política de substituição de *cache*.

```

1 Função Gerenciamento da Cache(pacote de dados):
2   datain = pacote de dados
3   se CS está cheia então
4     // compara o nodeIdToCaching com o id do nó atual.
5     se datain é para o nó atual então
6       // buscar dado de menor prioridade na CS.
7       datalowerPriority = primeiro dado ∈ CS
8       para cada data ∈ CS faça
9         se data < datalowerPriority então
10          | atualizar datalowerPriority
11          fim
12        fim
13        // remove o dado armazenado de menor prioridade.
14        REMOVE(datalowerPriority)
15      senão
16        // remove o dado de entrada.
17        REMOVE(datain)
18      fim
19    fim
20  fim

```

Na linha 1, é definida a função que gerencia a *cache* em cada nó da rede sem fio. Essa função recebe os pacotes de dados e é acionada imediatamente após um pacote desse tipo

ser armazenado na CS do nó. Em seguida, a variável $data_{in}$ recebe os dados (linha 2). Na sequência, é realizada uma verificação na capacidade de armazenamento de dados da *cache* (linha 3). Caso o limite de armazenamento da CS não tenha sido atingido, então o pacote de dados permanece armazenado e o algoritmo se encerra para esse dado (linhas 15 e 16). Dessa forma, enquanto a CS, de cada nó, possuir espaço disponível todos os dados que chegam no nó são armazenados, independente da prioridade e do destino do pacote.

Nos casos que a CS tenha atingido seu limite de armazenamento, então, somente os dados destinados ao nó devem ser armazenados, por isso, é verificado se o dado em questão é destinado ao nó atual (i.e., se o `nodeIdToCaching` do dado é igual ao `id` do nó), linha 4. Se o dado não é destinado para o nó atual (i.e., o valor contido no campo `nodeIdToCaching` do pacote é diferente do `id` do nó) (linha 12), o algoritmo simplesmente descarta o pacote (linha 13). Desse modo, somente o nó que teve o seu identificador marcado no pacote de dados irá armazenar esse pacote reduzindo, portanto, as replicações redundantes de dados na *cache* dos demais nós da rede local. Ainda assim, outras réplicas do dado em questão poderão também ser encontradas em outros nós (e.g., roteadores do núcleo da rede ou dispositivos em outros domínios), desde que tenham sido requisitadas previamente de fora do domínio atual do produtor (i.e., réplicas que foram armazenadas através do *on-path caching*).

Por outro lado, se o dado é destinado para o nó atual, o nó deve decidir qual dos dados já armazenados na sua *cache* deve ser removido para hospedar o pacote de dados recém-chegado. Para isso, o nó realiza uma busca na sua CS para encontrar o dado armazenado de menor prioridade (do inglês, $data_{lowerPriority}$) (linhas 5 a 10). Uma vez encontrado, o dado de menor prioridade é removido (linha 11). Após esse processo, apenas os dados de maior prioridade (i.e., aqueles oriundos dos produtores mais propensos a efetuarem *handoff*) permanecerão na *cache* dos nós, obedecendo a sua capacidade de armazenamento.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a SCaN-Mob, uma nova solução de apoio à mobilidade de produtores nas redes ICN. A solução proposta se beneficia das características da arquitetura da NDN e das redes sem fio, para realizar o armazenamento oportunista de dados na *cache* dos dispositivos presentes na borda da rede sem fio. Dessa maneira, forma-se uma rede de *cache* compartilhada e distribuída entre os nós, para possibilitar que os produtores móveis possam descarregar seus dados minimizando os efeitos do *handoff*.

No próximo capítulo serão apresentados os detalhes da condução dos experimentos e serão discutidos os resultados obtidos, comparando a SCaN-Mob com a NDN padrão.

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Este capítulo aborda o estudo relacionado à avaliação da proposta, desde a técnica de validação utilizada (Seção 5.1), a descrição do cenário de avaliação (Seção 5.2), a metodologia empregada na condução dos experimentos (Seção 5.3), a apresentação da análise dos resultados obtidos (Seção 5.4) e, por fim, as discussões finais do capítulo (Seção 5.5).

5.1 SIMULAÇÃO

Entre as técnicas de avaliação de sistemas, a modelagem analítica apresenta algumas desvantagens, por exemplo, os resultados deduzidos não são precisos em termos de energia consumida, memória e poder de processamento. Embora a implementação no mundo real forneça resultados realistas, a implementação física é um processo demorado e dispendioso, pois pode exigir muitos recursos humanos e de *hardware*. Alternativamente, a simulação é acessível e fornece bons resultados de maneira econômica para avaliar o desempenho dos protocolos/esquemas propostos (KHAN; BILAL; OTHMAN, 2012). Diante da relação custo-benefício do uso de simulação, esta foi a técnica empregada no desenvolvimento e avaliação da proposta do presente trabalho.

5.1.1 Seleção de Simuladores

A pré-seleção dos simuladores tratados neste trabalho se deu pelo fato de ser gratuito e o grau de popularidade em experimentações em redes em geral e em ICN especificamente, fato observado nos trabalhos da revisão bibliográfica. Na literatura existem diversos simuladores para experimentação em redes de computadores, uma análise mais detalhada pode ser encontrada em Khan, Bilal e Othman (2012). No presente trabalho, foram avaliados os seguintes simuladores: OMNeT++ com seu *framework* INET¹; NS-3² com seu módulo ndnSIM; e ccnSim, como representado na Tabela 5.1. As versões de ambos

¹<https://inet.omnetpp.org/>

²<https://www.nsnam.org/>

os simuladores avaliados foram as mais recentes disponíveis para *download*, no momento da pesquisa.

O OMNeT++ é um simulador de eventos discretos, baseado em C++ e em uma linguagem específica de descrição de topologia `.ned`, para modelar comunicações de redes (VARGA; HORNIG, 2008). Através do *framework* INET é disponibilizada a pilha de protocolos da Internet e o suporte à mobilidade, contudo, para a arquitetura TCP/IP. Embora, suporte várias plataformas (i.e., binários de 32 *bits*), possua um ambiente de desenvolvimento integrado (do inglês, *Integrated Development Environment* (IDE)) nativo (baseado no Eclipse³) e seja bem documentado, este simulador não fornece suporte nativo à ICN (ver Tabela 5.1), ou seja, requer a construção de boa parte da arquitetura ICN (equivalente às camadas 3, 4 e 5 do modelo TCP/IP). Portanto, para pesquisas em ICN o OMNeT++ requer um maior esforço para a construção do ambiente de simulação.

O `ccnSim` é um simulador escalável voltado à ICN, construído sobre o OMNeT++, apresenta-se modular, flexível e capaz de lidar com diferentes algoritmos de políticas de *cache*, estratégias de encaminhamento, topologias e leis de popularidade (CHIOCCHETTI; ROSSI; ROSSINI, 2013). Apesar de possibilitar o suporte nativo à ICN, o `ccnSim` tem uma documentação desatualizada e escassa, além disso, sua instalação e configuração mostrou-se complexa.

O `ndnSIM` é um simulador de eventos discretos para ICN baseado no NS-3 e escrito em C++, oferece uma plataforma de simulação comum e amigável, além disso, está em sincronia com a equipe de pesquisa NDN, o que resulta em uma combinação da plataforma de simulação com os mais recentes avanços da pesquisa na área (MASTORAKIS et al., 2016). Além desses fatos, o `ndnSIM` dispõe de uma documentação favorável, uma lista de discussão⁴ ativa e outras características (ver Tabela 5.1) que levaram a concluir que o `ndnSIM` é um simulador adequado para o desenvolvimento de experimentações em ICN.

Tabela 5.1 Avaliação de simuladores.

Crítérios	OMNeT++/INET 3.4	NS-3/ndnSIM 2.3	ccnSim 0.4alpha2
Plataformas	Linux x86-64 Windows 7, 10 Mac OS X 10.10 +	Ubuntu 14.04, 16.04 x86-64 Mac OS 10.10 + Fedora Linux	Ubuntu x86-64
Linguagens	C++ e <code>.ned</code>	C++ ou Python	C++ e <code>.ned</code>
IDE	Nativa	Eclipse; NetBeans; QtCreator	OMNeT++
Instalação e configuração	Intermediário	Intermediário	Difícil
Documentação	Boa	Boa	Ruim
Suporte nativo à ICN	Não	Sim	Sim
Interface gráfica (GUI)	IDE	Visualizer; NetAnim	IDE

O `ndnSIM` implementa toda a arquitetura básica da CCN, através de modelos funcionais de interfaces de aplicação e de rede, estruturas de encaminhamento como PIT, FIB, CS e a própria camada de estratégia, bem como, todo o núcleo básico do protocolo CCN,

³<http://www.eclipse.org/>

⁴<http://www.lists.cs.ucla.edu/mailman/listinfo/ndnsim>

baseado no encaminhamento de pacotes de interesse e de dados (BRITO; VELLOSO; MORAES, 2014).

5.1.2 Resultados Iniciais

Os resultados iniciais demonstram, através de simulações, a problemática tratada nesta pesquisa a qual se propôs uma solução que é apresentada nas seções seguintes. Dessa forma, inicialmente foi demonstrada a problemática investigada, portanto, o problema de pesquisa foi modelado e implementado sobre uma rede centrada no conteúdo básica usando o simulador escolhido, ndnSIM. A topologia inicial da rede, que retrata o *handoff* do nó móvel, consiste em seis nós: dois APs (i.e., AP1 e AP2), dois roteadores (i.e., UFBA-rt1 e UFBA-rt2), um nó estático denominado Nó-A e um nó móvel identificado com o número 5, como ilustrado na Figura 5.1.

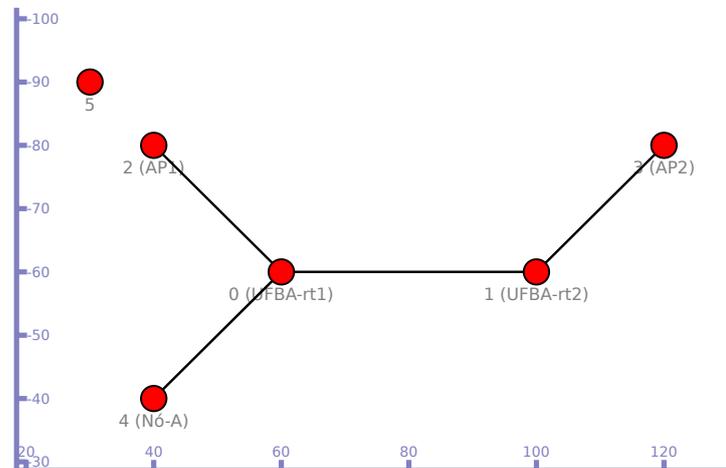


Figura 5.1 Topologia da rede. Caso 1: consumidor móvel (Nó 5) e produtor estático (Nó-A), e caso 2: o inverso (ARAÚJO; SAMPAIO, 2017).

Os resultados iniciais da pesquisa evidenciam as diferenças na forma com que a arquitetura da rede reage, diante da mobilidade do consumidor e da mobilidade do produtor. A Figura 5.2 retrata a reação da rede quando o consumidor é móvel (i.e., Nó 5), na Figura 5.2(a), e o produtor é estático (i.e., Nó-A), na Figura 5.2(b). Nesse caso, a arquitetura da rede consegue restabelecer a comunicação do consumidor para o produtor, logo após o seu *handoff* do AP1 para o AP2. Uma pequena queda na comunicação é registrada por volta do tempo 25 segundos, período de indisponibilidade do consumidor em seu trajeto, o que causa uma elevação inversamente proporcional da taxa de *timeout* de interesses (Figura 5.2(a)), que é normalizada com a volta da comunicação do consumidor, através do AP2, que simplesmente reexpressa seus interesses a partir da nova rede (ARAÚJO; SAMPAIO, 2017).

A reação da rede diante do caso inverso, ou seja, consumidor estático e produtor móvel, está representada na Figura 5.3. Nesse cenário, apesar do produtor móvel (i.e., Nó 5), na Figura 5.3(b), se conectar ao AP2 após o *handoff*, a rede não consegue resta-

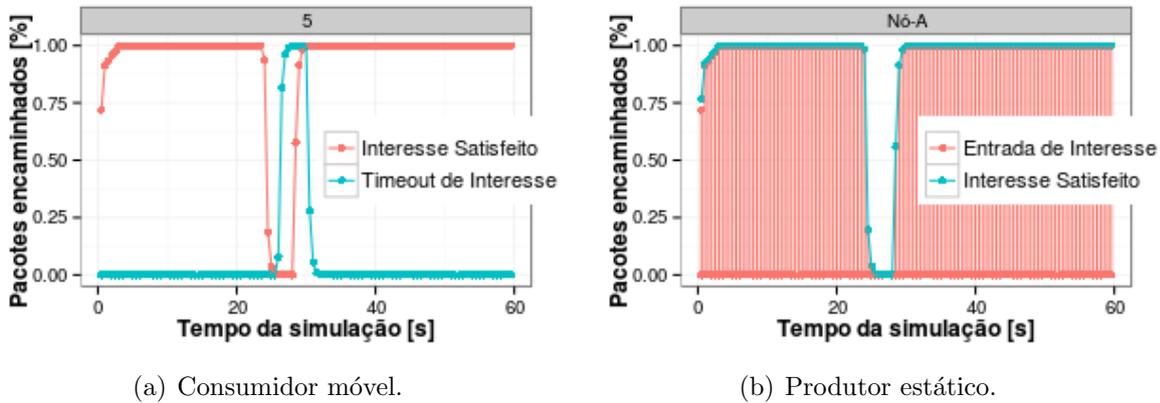


Figura 5.2 Caso 1: consumidor móvel e produtor estático (ARAÚJO; SAMPAIO, 2017).

belecer a comunicação do produtor com o consumidor (i.e., Nó-A), na Figura 5.3(a), já que seria necessário haver uma atualização nas informações de roteamento, na FIB dos roteadores, para alcançar a nova rede do produtor. Dessa forma, o consumidor continua a expressar seus interesses em direção ao AP1 (i.e., antiga localização do produtor) que constantemente atingem *timeout*, pois o produtor móvel agora encontra-se no domínio do AP2 (ARAÚJO; SAMPAIO, 2017).

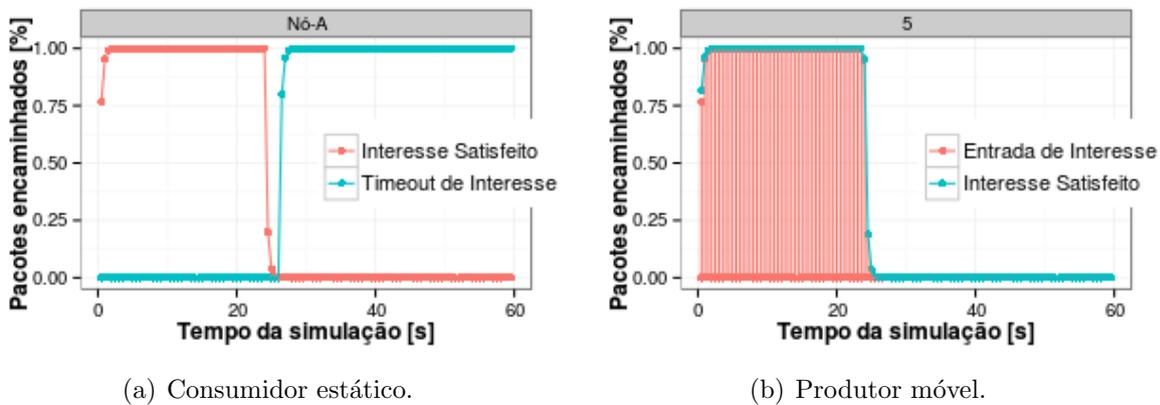


Figura 5.3 Caso 2: consumidor estático e produtor móvel (ARAÚJO; SAMPAIO, 2017).

5.2 CENÁRIO DE AVALIAÇÃO

O cenário de avaliação da solução proposta consiste no modelo de arquitetura de redes sem fio infraestruturadas, como representado na Figura 5.4. Nota-se que há três domínios de redes sem fio distintos, representados pelos APs: AP1, AP2 e AP3. Cada domínio corresponde a uma rede local sem fio (do inglês, *Wireless Local Area Network* (WLAN)) (i.e., WLAN1, WLAN2 e WLAN3), os quais são interligados através de enlaces cabeados ponto a ponto e roteadores (i.e., R1, R2, R3, R4 e R5) localizados no núcleo da rede.

Vale ressaltar que todos os nós da topologia possuem a pilha de protocolos NDN. Alguns trabalhos da literatura estudaram a mobilidade em NDN em cenários semelhantes ao apresentado, como é o caso de Azgin, Ravindran e Wang (2014), Farahat e Hassanein (2016).

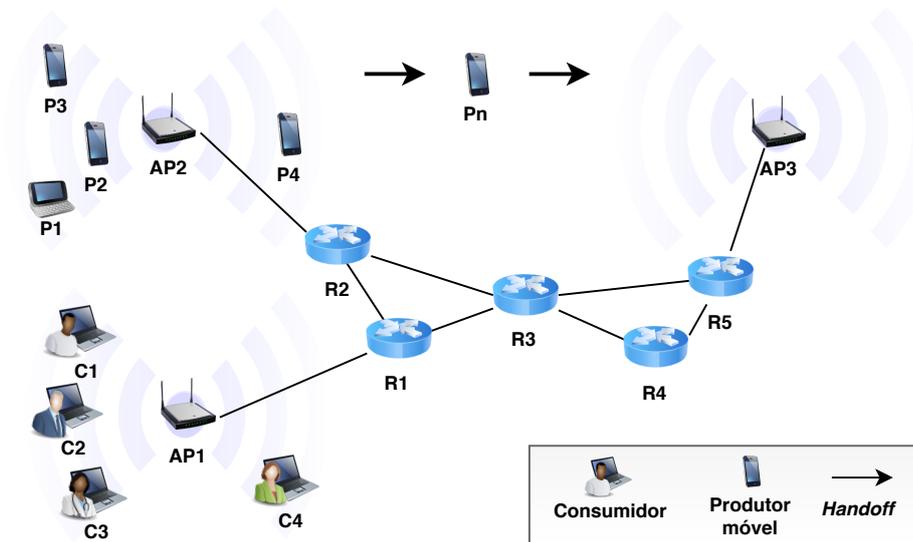


Figura 5.4 Cenário de avaliação da proposta.

O domínio do AP1 contém 4 consumidores estáticos (i.e., c_1 , c_2 , c_3 e c_4), logo não é considerado o *handoff* dos mesmos. O AP2 pode possuir até 30 dispositivos móveis (i.e., $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{30}$), em que no máximo 9 produtores podem efetuar *handoff* simultaneamente em direção ao AP3. O cenário apresentado é suficiente para investigar o *handoff* dos produtores, de acordo com o objetivo para mensurar os impactos causados e avaliar o desempenho da solução proposta. Dessa forma, apenas os produtores no domínio do AP2 efetuam *handoff*. Além disso, o AP2 possui um produtor especial (i.e., produtor competitivo) que, embora móvel, não ultrapassa sua área de cobertura do alcance do sinal. A razão disso é tornar o ambiente mais realístico, possibilitando que os dados desse produtor possam competir, com os dados dos demais produtores, por espaço na *cache* dos nós da rede local. O domínio do AP3, por sua vez, não possui nós e apenas aguarda os produtores móveis oriundos do AP2.

Os consumidores requisitam dados, a cada produtor, através do envio de interesses, cujo nome segue o formato de nomeação hierárquica, da seguinte forma:

/ufba/ p_i /%FE%01

- /ufba – é a parte do prefixo do nome que representa o domínio;
- / p_i – é a parte do prefixo do nome que representa o i -ésimo produtor;
- /%FE%01 – é o sufixo que representa o identificador único de cada conteúdo.

As requisições, de cada consumidor, seguem uma taxa randômica (frequência) que varia de 5 a 8 interesses por segundo, porém o intervalo entre os interesses segue uma distribuição exponencial (i.e., com média = 1 / frequência). Nas experimentações, as requisições de dados se iniciaram com um intervalo de 10 segundos entre os consumidores, ou seja, na sequência $c_1 = 0$ s, $c_2 = 10$ s, $c_3 = 20$ s e $c_4 = 30$ s. No entanto, o consumidor c_4 é um caso especial e inicia requisições, também, no tempo 0 segundo para o produtor competitivo (i.e., aquele que não realiza *handoff*). Dessa forma, c_4 a partir do tempo 30 s do início da simulação mantém uma carga equivalente a 2 consumidores.

A carga (do inglês, *load*) de requisições de interesses por segundo, gerada pelos consumidores a partir do domínio do AP1 e encaminhada para os produtores no domínio do AP2, pode ser representada pela Equação 5.1. Considerando P o conjunto dos produtores; C o conjunto dos consumidores (i.e., $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$); e f um número inteiro aleatório ≥ 5 e ≤ 8 , que representa a frequência de interesses enviados, tem-se:

$$load = f + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} f_c \quad (5.1)$$

O somatório interno representa as requisições dos consumidores por percorrer o conjunto C , calculando o valor aleatório de f_c (índice do somatório), o somatório externo representa as iterações no conjunto P e, a soma de f a requisição extra de c_4 ao produtor competitivo.

Os produtores, por sua vez, aguardam as requisições dos consumidores, geram os dados solicitados e armazenam em *cache* uma cópia dos dados. Dessa forma, cada interesse que alcança o seu respectivo produtor é respondido com o pacote de dados equivalente ao conteúdo solicitado.

É importante ressaltar que a *cache* dos consumidores, AP1, AP3 e roteadores foi desabilitada, permanecendo ativa apenas nos nós que compõem a WLAN2 (inclusive no próprio AP2), essa medida visa destacar o real desempenho da SCaN-Mob sem que haja qualquer interferência de armazenamento em *cache* no caminho entre os consumidores e os produtores. Uma medida semelhante foi adotada por Panwar et al. (2017), que desativaram o armazenamento em *cache* no núcleo da rede, para não afetar as estatísticas das métricas estudadas.

5.3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Para avaliar o desempenho da solução proposta, foi desenvolvido o ambiente de experimentação no simulador de redes, baseado em eventos discretos, ndnSIM, o qual é um módulo do NS-3 específico para NDN. Em tal ambiente, além da estratégia proposta, SCaN-Mob, foi reproduzida a NDN padrão para servir como linha base de comparação.

A avaliação concentrou-se em torno do cenário apresentado na Figura 5.4 (seção anterior), onde os consumidores, localizados no domínio do AP1, requisitam dados aos produtores no domínio do AP2. Tais produtores movimentam-se em direção ao AP3 e quando ultrapassam o limite da área de cobertura do AP, os mesmos entram numa zona de indisponibilidade (i.e., sofrem uma perda de conexão de rede), uma vez que o alcance de cobertura do sinal dos APs são disjuntos. Adiante, ao aproximar-se do raio de cober-

tura do AP3, a conexão é restabelecida no novo AP efetuando, assim, o *handoff* entre os pontos de acesso. Nesse momento a simulação é encerrada e as métricas são computadas, pois o foco desta pesquisa é, justamente, a fase que antecede a retomada da conexão no novo AP, em virtude de sua criticidade.

Os parâmetros empregados nos experimentos, comuns a ambas as soluções, estão presentes na Tabela 5.2. Alguns já foram abordados na seção anterior, como é o caso da frequência de interesses. Nota-se que há três modelos de mobilidade, dois desses na WLAN2 e o outro na WLAN1, onde os consumidores têm suas posições constantes (i.e., modelo *ConstantPosition*), pois o foco desta pesquisa é a mobilidade dos produtores. Para possibilitar o controle da direção e da velocidade dos produtores em *handoff*, na condução dos experimentos, se fez necessária a utilização do modelo de mobilidade *ConstantVelocity*, o qual cumpre tal necessidade. Nos demais nós da WLAN2 foi utilizado o modelo de mobilidade *RandomWaypoint*, o qual simula a movimentação de nós para destinos aleatórios dentro de um determinado espaço, como empregado no trabalho de Lehmann, Barcellos e Mauthe (2016) e semelhante aos trabalhos de Ge et al. (2016), Rehman e Kim (2017), Brito, Velloso e Moraes (2014). O modelo *RandomWaypoint*, apesar de não apresentar um fiel realismo, ainda é um dos mais utilizados para esse tipo de experimento (AZEVEDO et al., 2009).

Tabela 5.2 Parâmetros da Simulação.

Parâmetro	Valor
Modelo de rádio propagação	Nakagami
Protocolo de enlace sem fio	IEEE 802.11a
Alcance de transmissão do AP	100 metros
Modelo de mobilidade dos nós em <i>handoff</i>	<i>ConstantVelocity</i>
Modelo de mobilidade dos nós na WLAN2	<i>RandomWaypoint</i>
Modelo de mobilidade dos nós na WLAN1	<i>ConstantPosition</i>
Tamanho do pacote de dados	1 KB
Capacidade da <i>cache</i> do AP	500 pacotes
Frequência de interesses por consumidor	5 a 8 interesses por segundo
Taxa de dados das interfaces ponto a ponto	1 Mbps
Atraso no enlace ponto a ponto	10 ms
Tamanho da fila de transmissão	10 pacotes
Tempo de início das requisições de c_1 a c_4	0, 10, 20 e 30 segundos
Grade de distribuição inicial dos nós na WLAN2	$50\ m \times 30\ m$
Políticas de <i>cache</i> na WLAN2	LRU e SCA-N-Mob <i>policy</i>
Política de <i>cache</i> nos demais nós da topologia	<i>Nocache</i>
Estratégias de encaminhamento	<i>Best-route</i> e SCA-N-Mob <i>forwarder</i>
Intervalo entre o envio de Sondas	2,5 seg. (apenas na SCA-N-Mob)

No início das simulações os nós na WLAN2 foram distribuídos em posições aleatórias

em torno do AP2, numa área equivalente a $50\text{ m} \times 30\text{ m}$ e, em seguida, assumiam os seus respectivos modelos de mobilidade até o fim das simulações. Nos experimentos com a NDN padrão, foi empregada a estratégia de encaminhamento de interesses *best-route* e a política de substituição de *cache* LRU, enquanto nos experimentos com a SCaN-Mob empregou-se a estratégia de encaminhamento e a política de *cache* próprias, apresentadas no Capítulo 4 (respectivamente nas Seções: 4.3 e 4.5). Além disso, a SCaN-Mob adiciona na rede os pacotes sondas, que eram enviados no intervalo de 2,5 segundos por cada nó na WLAN2 com exceção do AP2. Os eventuais parâmetros ausentes na Tabela 5.2 assumiram os valores padrão do ndnSIM.

Vale ressaltar, ainda, que as simulações foram longas o suficiente para que os produtores móveis partissem do domínio do AP2 e chegassem ao AP3. O período transiente foi tratado, portanto, através dessa característica da simulação.

A metodologia de avaliação utilizada foi baseada no trabalho de Jain (1991). Inicialmente foi realizado um modelo de planejamento de experimentos fatorial completo 2^k (Subseção 5.3.1). Em seguida, foi realizado um projeto fatorial com a redução da quantidade de fatores e o acréscimo de níveis (Subseção 5.3.2), ou seja, com os fatores mais significativos obtidos na primeira etapa.

5.3.1 Projeto Fatorial Completo

Nessa etapa foi realizado um levantamento dos possíveis fatores que podem interferir no desempenho da rede. Após a consulta em alguns trabalhos da literatura verificou-se que havia vários desses fatores o que dificultaria a análise de desempenho. Dessa forma, foram selecionados previamente aqueles considerados mais relevantes para a pesquisa, como retratado na Tabela 5.3. No entanto, seria impraticável realizar uma análise profunda com uma quantidade grande de fatores. Diante dessa questão era necessário escolher, dentre os fatores apresentados, os que causariam maior impacto no desempenho. Para solucionar esse caso, optou-se por realizar um modelo de planejamento de experimentos fatorial completo 2^k , em que os k fatores, cada um, assumem duas alternativas ou níveis (JAIN, 1991).

Tabela 5.3 Fatores e níveis do projeto fatorial completo.

ID	Fator	mín.	máx.
A	Velocidade dos produtores em <i>handoff</i>	1 m/s	3 m/s
B	Quantidade de produtores em <i>handoff</i>	1 nó	9 nós
C	Velocidade dos demais nós da WLAN2	0 m/s	2 m/s
D	Tamanho da <i>cache</i> dos nós da WLAN2	80 pacotes	160 pacotes
E	Quantidade de nós na WLAN2	10 nós	30 nós

Um projeto experimental adequado visa extrair a quantidade máxima de informação com o menor número possível de experimentos, o que resulta em uma redução do esforço

para coletar os dados. Além disso, uma análise apropriada dos experimentos proporciona identificar os efeitos dos fatores que podem afetar no desempenho. Dessa forma, é possível determinar se os fatores apresentam efeitos significativos ou se a diferença observada é simplesmente devido às variações aleatórias causadas por erros de medição e parâmetros que não foram controlados (JAIN, 1991).

Ainda sobre a Tabela 5.3, os fatores foram identificados pelas letras A , B , C , D , E e assumiram valores mínimo e máximo em conformidade com as quantidades encontradas na literatura e com as características do cenário avaliado. O fator A é empregado nos trabalhos de Lehmann, Barcellos e Mauthe (2016), Luo, Eymann e Timm-Giel (2015), entre outros. O fator B em trabalhos como o de Huynh et al. (2017). Os valores dos fatores A e C obedecem à natureza do cenário de WLANs em estudo, e são compatíveis com a pesquisa de Azevedo et al. (2009). O fator D teve seus valores ajustados ao cenário em questão e, para isso, baseou-se em alguns trabalhos como, Hahm et al. (2017) e Ge et al. (2016). Por fim, o fator E tomou como base trabalhos como o de Thar et al. (2015).

As variáveis para o projeto fatorial, referentes aos fatores listados na Tabela 5.3, estão definidas nas Equações 5.2 a 5.6. Nota-se que, para cada fator, o valor mínimo está representado por -1 , enquanto o valor máximo por 1 .

$$x_A = \begin{cases} -1 & \text{se velocidade em } \textit{handoff} \text{ é } 1 \text{ m/s} \\ 1 & \text{se velocidade em } \textit{handoff} \text{ é } 3 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$x_B = \begin{cases} -1 & \text{se } 1 \text{ produtor em } \textit{handoff} \\ 1 & \text{se } 9 \text{ produtores em } \textit{handoff} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$x_C = \begin{cases} -1 & \text{se velocidade dos nós é } 0 \text{ m/s} \\ 1 & \text{se velocidade dos nós é } 2 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5.4)$$

$$x_D = \begin{cases} -1 & \text{se capacidade da } \textit{cache} \text{ é } 80 \text{ pacotes} \\ 1 & \text{se capacidade da } \textit{cache} \text{ é } 160 \text{ pacotes} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$x_E = \begin{cases} -1 & \text{se } 10 \text{ nós na WLAN2} \\ 1 & \text{se } 30 \text{ nós na WLAN2} \end{cases} \quad (5.6)$$

A partir das variáveis apresentadas, aferiu-se os impactos que cada fator exerce sobre a variável de resposta taxa de satisfação de interesse. Essa variável foi escolhida, pois representa a taxa de sucesso do recebimento de dados por parte dos consumidores. Os valores assumidos por k (i.e., do projeto fatorial 2^k) foram os cinco fatores listados na Tabela 5.3. Nesta etapa, do projeto fatorial, apenas os valores mínimo e máximo são considerados por fator e cada experimento foi replicado 5 vezes (i.e., projeto fatorial $2^k r$, onde r representa as replicações para mensurar os erros experimentais (JAIN, 1991)), para obter a média com 95% de confiança.

O resultado da influência dos fatores sobre a variável de resposta, está representado através do gráfico Pareto na Figura 5.5. É possível observar que os fatores dominantes, acima da linha vermelha, são: B (Quantidade de produtores em *handoff*) e A (Velocidade

dos produtores em *handoff*), juntos corresponderam a pouco mais de 80% do impacto na variável de resposta seguindo, portanto, o princípio de Pareto. O fator *A* está intrinsecamente relacionado à predição e detecção do produtor em *handoff*. Os demais fatores exerceram limitada significância para o sistema em relação aos fatores *A* e *B*.

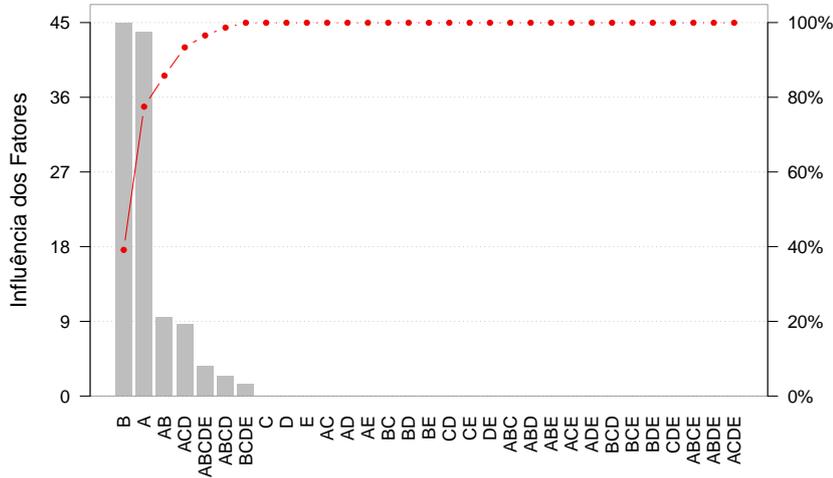


Figura 5.5 Representatividade dos fatores do projeto fatorial completo.

5.3.2 Projeto Fatorial com Redução de Fatores

Nessa etapa, após obter os fatores mais influentes para o sistema, de acordo com a etapa anterior, considerou-se os fatores *A* e *B* da Tabela 5.3, para uma análise mais detalhada da proposta. Para tanto, foi incrementado mais um nível aos fatores obtidos, dessa forma $A = \{1, 2, 3\}$ m/s e $B = \{1, 5, 9\}$ nós, os demais fatores (*C*, *D* e *E*), nessa etapa, assumiram os seus valores máximos sem qualquer variação. De acordo com Jain (1991), após reduzir a quantidade de fatores é possível adicionar mais níveis aos mesmos.

Ao aplicar-se o produto cartesiano de *A* por *B* tem-se a Equação 5.7, a qual gera nove pares ordenados (x, y) tais que $x \in A$ e $y \in B$ (i.e., $A \times B = \{(1, 1), (1, 5), (1, 9), (2, 1), (2, 5), (2, 9), (3, 1), (3, 5), (3, 9)\}$):

$$A \times B = \{(x, y) \mid x \in A \wedge y \in B\} \quad (5.7)$$

ou ainda, o número de cenários n pode ser obtido através da Equação 5.8, em que é feita todas as combinações possíveis em todos os níveis de todos os fatores, considerando k fatores com o i -ésimo fator contendo n_i níveis (JAIN, 1991).

$$n = \prod_{i=1}^k n_i \quad (5.8)$$

Os pares ordenados gerados pela Equação 5.7 representam todas as combinações possíveis entre os níveis dos fatores e, dessa maneira, formam os cenários avaliados. A Tabela 5.4 traz a lista ordenada dos cenários formados. Nessa etapa, cada experimento

foi replicado 10 vezes com diferentes sementes para obter a média com um nível de confiança de 95%, seguindo a distribuição *t-student*. Na subseção seguinte, são apresentadas as métricas empregadas na avaliação de desempenho.

Tabela 5.4 Formação dos cenários, após a combinação dos níveis dos fatores.

Cenário	A	B
1	1 m/s	1 nó
2	1 m/s	5 nós
3	1 m/s	9 nós
4	2 m/s	1 nó
5	2 m/s	5 nós
6	2 m/s	9 nós
7	3 m/s	1 nó
8	3 m/s	5 nós
9	3 m/s	9 nós

5.3.3 Métricas de Desempenho

Diferentes métricas foram avaliadas para mensurar o comportamento da solução, do ponto de vista da rede e dos consumidores. Além disso, foi realizada a comparação do desempenho da SCan-Mob com a NDN padrão. As métricas avaliadas são bastante consolidadas na literatura (IOANNOU; WEBER, 2016) e estão listadas abaixo:

1. Taxa de satisfação de interesses – consiste na razão entre a quantidade total de pacotes de dados efetivamente recebidos pelos consumidores, pela quantidade total de pacotes de interesse enviados pelos mesmos. Essa métrica representa o quão o sistema pode ser eficaz na entrega de dados aos consumidores.
2. Taxa de acerto na *cache* – corresponde a média de pacotes de interesse que são satisfeitos na *cache* dos nós. Dessa forma, o nó não precisa encaminhar o interesse à sua camada de aplicação para gerar o dado correspondente, quando se é o produtor, ou encaminhar o interesse na rede, caso o nó não seja o produtor do conteúdo solicitado. Essa métrica destaca a atuação da política de substituição de *cache* proposta.
3. Taxa de erro na *cache* – corresponde a média de pacotes de interesse que alcançam os dispositivos e não encontram o conteúdo solicitado em *cache*. Vale ressaltar que sempre que um determinado interesse alcança o produtor pela primeira vez, será contabilizado como um erro de *cache*, visto que o conteúdo ainda não tinha sido gerado, portanto, não pode ser encontrado na *cache* do dispositivo. Além disso, um mesmo interesse alcança a todos os nós na WLAN via *broadcast*, o que gera uma

contabilização de erro de *cache* em cada dispositivo presente na rede sem fio. Essa métrica destaca a atuação da estratégia de encaminhamento de pacotes proposta.

4. Taxa de interesses expirados ou *timeout* – equivale a média de pacotes de interesse que foram removidos, após terem atingido seu tempo máximo de permanência na PIT do dispositivo. Isso ocorre quando o interesse não pode ser satisfeito durante o seu tempo de permanência.
5. Tempo de resposta ou atraso – o atraso fim a fim médio, se dá pela diferença de tempo entre o recebimento do pacote de dados pelo envio do primeiro pacote de interesse para o respectivo dado, ou seja, inclui os tempos de retransmissões de pacotes. Essa métrica representa o quão o sistema pode ser eficiente na entrega de dados aos consumidores.
6. Tráfego de pacotes ou *overhead* – consiste na média total da quantidade de pacotes de interesses, dados, *nacks* e sondas que foram enviados na rede sem fio. O tráfego desses pacotes reflete o estado da rede, isso é importante para inferir as proporções que os mesmos são encaminhados e a consequência que podem provocar ao desempenho da rede.
7. Taxa de descarte de pacotes – constitui a média de pacotes de dados que foram descartados no AP, devido ao estouro da fila de transmissão. Isso pode ocorrer quando o tráfego de pacotes se intensifica e ultrapassa a capacidade operacional do dispositivo.

Na seção seguinte encontram-se as análises detalhadas de cada métrica mencionada anteriormente.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As análises consistem em variar a velocidade dos produtores em *handoff*, bem como, a quantidade desses produtores, respectivamente representadas pelos fatores A e B da Tabela 5.3 na Subseção 5.3.1.

5.4.1 Avaliação da Taxa de Interesses Satisfeitos

Na NDN um interesse é satisfeito quando consegue alcançar os dados correspondentes ao nome que transporta. Inicialmente, foi analisado individualmente (i.e., para possibilitar uma melhor visualização dos gráficos devido à escala) o comportamento da NDN e da SCaN-Mob quanto a taxa de satisfação de interesses. Em seguida, foi realizada uma análise geral dessa métrica.

Na Figura 5.6, é possível observar a satisfação de interesses obtida na NDN e na SCaN-Mob, ambas com um produtor em *handoff* (i.e., fator $B = 1$). Quando a velocidade do produtor móvel em *handoff* é baixa, as duas soluções apresentam uma maior taxa de satisfação de interesses. Isso se deve pelo fato de que o produtor passa mais tempo na rede, por isso, consegue distribuir mais dados, conseqüentemente, esses dados podem

satisfazer mais interesses. No entanto, nota-se que a SCaN-Mob alcança taxas superiores à NDN, principalmente, nos casos de velocidades mais baixas do produtor.

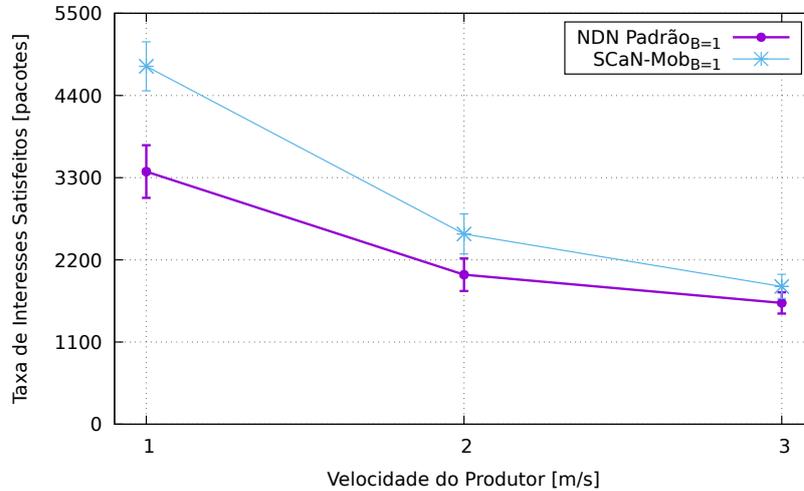


Figura 5.6 Taxa de satisfação de interesses com um produtor em *handoff*.

Na Figura 5.7, a análise se dá para uma quantidade maior de produtores em *handoff* (i.e., fator $B = 5$). Dessa forma, observa-se um comportamento semelhante ao caso anterior. Nota-se que para velocidades menores, ambas as soluções alcançam taxas mais elevadas na satisfação de interesses. Entretanto, a SCaN-Mob atinge melhores resultados de satisfação de interesse. Nota-se, ainda, que a SCaN-Mob, além de obter melhores resultados, consegue atingir valores expressivos para todos os casos (i.e., independente da velocidade do produtor), sobre a NDN.

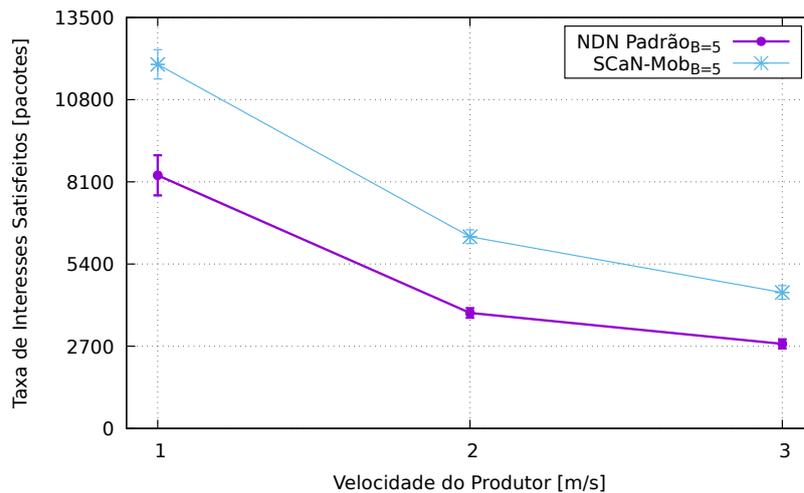


Figura 5.7 Taxa de satisfação de interesses com cinco produtores em *handoff*.

Na Figura 5.8, os resultados obtidos por ambas as soluções confirmam a tendência mostrada nas figuras anteriores. Tanto a NDN quanto a SCaN-Mob conseguem melhores

resultados na satisfação de interesses nos casos que a velocidade dos produtores é menor. Outro ponto importante, é que a SCaN-Mob mantém uma taxa de satisfação de interesses, cada vez mais, superior à NDN na medida que a quantidade de produtores em *handoff* aumenta.

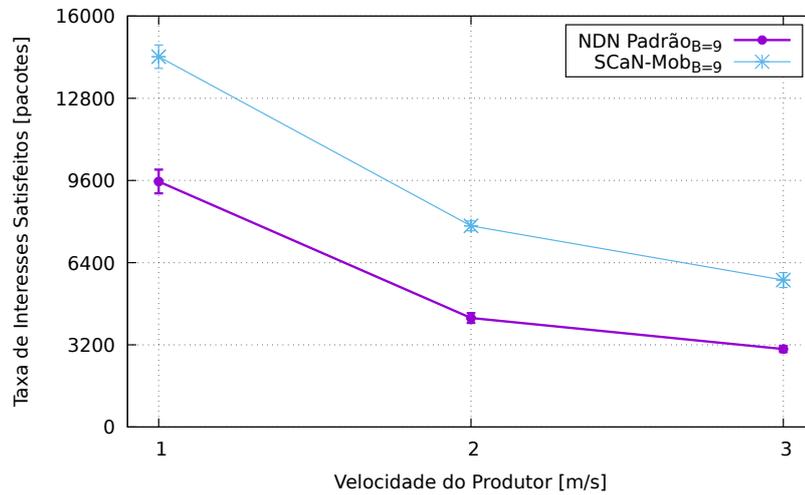


Figura 5.8 Taxa de satisfação de interesses com nove produtores em *handoff*.

A Figura 5.9 apresenta uma visão geral das figuras anteriores, variando a quantidade e a velocidade dos produtores em *handoff*. Ao comparar a NDN com a SCaN-Mob, observa-se o aumento no ganho da taxa de satisfação de interesses da SCaN-Mob que demonstra escalabilidade, ao atingir melhores resultados à medida que a quantidade de produtores em *handoff* aumenta. Isso é crucial para o bom funcionamento da rede, já que podem existir inúmeros dispositivos conectados em sua borda.

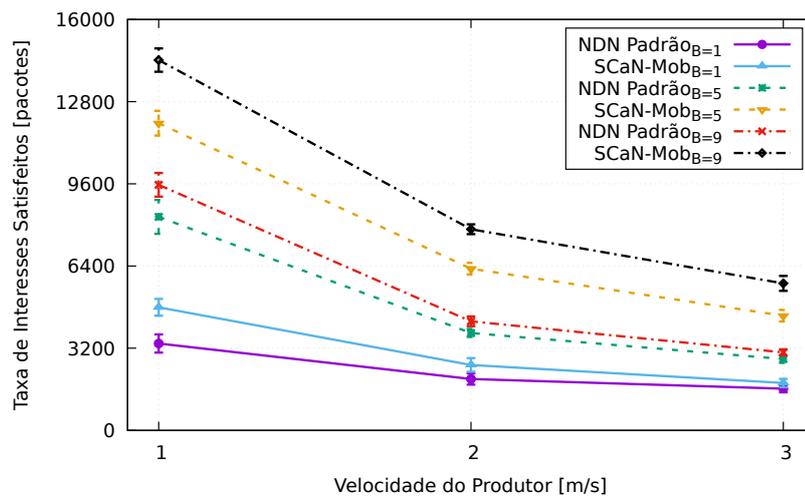


Figura 5.9 Visão geral da taxa de satisfação de interesses com um, cinco e nove produtores em *handoff*.

A Figura 5.10 retrata a taxa de satisfação de interesse geral obtida, individualmente, por cada consumidor em ambas as soluções. É notável que todos os consumidores alcançam uma maior satisfação de interesse quando a solução avaliada é a SCaN-Mob, pois a mesma melhora o processo de distribuição e armazenamento de dados entre os dispositivos na borda da rede. A variação das taxas obtidas pelos consumidores se dá pela ordem de inicialização de suas requisições de dados (i.e., inicialização de c_1 até c_4 , com intervalo de 10 segundos entre os consumidores). Dessa forma, o consumidor c_1 obtém uma alta taxa de satisfação, uma vez que inicia a requisição de dados primeiro. Em seguida, o consumidor c_2 e, na sequência, c_3 que têm menos tempo de requisição, já que iniciam após o anterior. Por outro lado, o consumidor c_4 obtém uma elevada taxa de satisfação de interesse, pois além de se beneficiar com os dados encontrados em *cache* na borda da rede, o c_4 mantém uma carga de requisição de dados dupla (i.e., para os produtores em *handoff* e para o produtor competitivo).

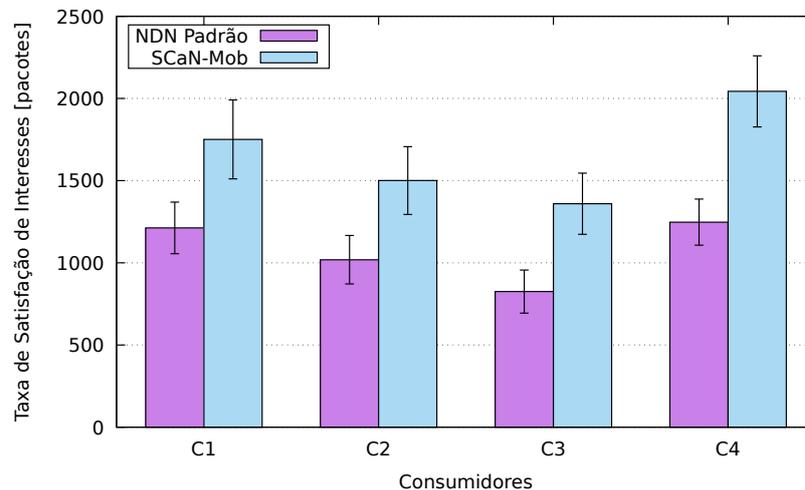


Figura 5.10 Visão geral da taxa de satisfação de interesses por consumidor (ARAÚJO; SOUSA; SAMPAIO, 2018).

5.4.2 Avaliação da Taxa de Acerto na Cache

A análise do uso da *cache* foi realizada na borda da rede sem fio, como em Panwar et al. (2017). A quantidade de interesses que foram satisfeitos na *cache* (i.e., acerto na *cache*) está representada na Figura 5.11. Os resultados de ambas as soluções foram divididos em três grupos, de acordo com a quantidade de produtores em *handoff* (i.e., fator B) e em cada grupo variando a velocidade dos produtores (i.e., fator A). A SCaN-Mob obteve uma taxa de acerto em *cache* superior à NDN nos três grupos, apresentando melhor desempenho, principalmente, quando a velocidade do produtor é baixa e um número maior de produtores efetuam *handoff*.

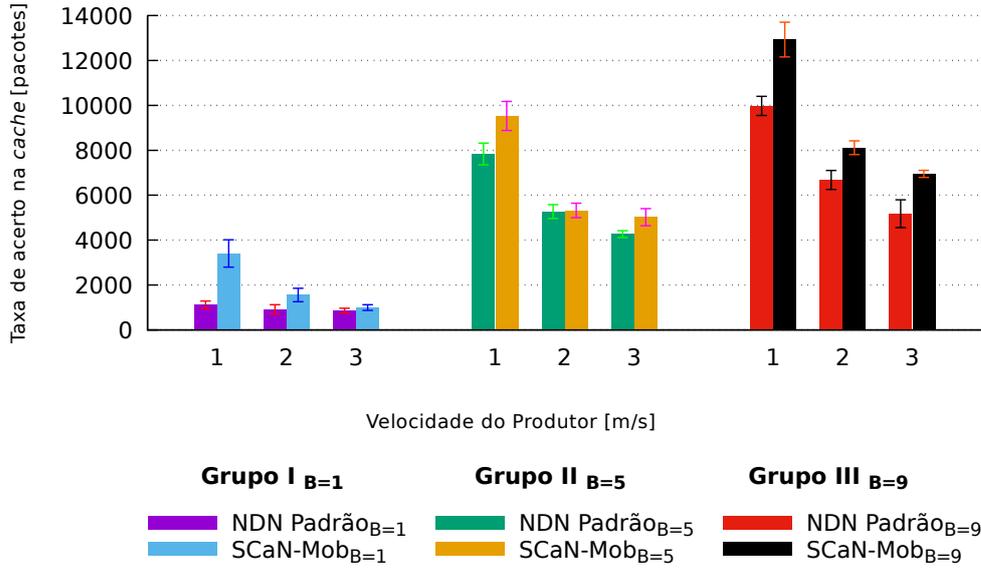


Figura 5.11 Visão geral da taxa de acertos na *cache* com a variação dos produtores em *handoff*.

5.4.3 Avaliação da Taxa de Erro na Cache

Além do acerto na *cache* foi avaliada a sua taxa de erro. Um erro de *cache* é contabilizado sempre que um interesse chega em um determinado nó e não encontra os dados requisitados em sua CS. Como na arquitetura da NDN os interesses verificam primeiro a CS do nó em busca dos dados, mesmo que o nó em questão seja o produtor correspondente, mas não possuir em sua *cache* os dados solicitados (e.g., os dados ainda não tinham sido solicitados ou foram apagados da *cache* pela política de substituição), o interesse não poderá encontrar os dados na CS e, assim, será calculado um erro de *cache*. Outro fato que propicia o aumento da taxa de erro na *cache* é a característica da comunicação *broadcast* das redes sem fio, a qual permite que um mesmo pacote de interesse alcance vários nós da rede, os quais contabilizarão um erro de *cache* para cada pacote de interesse que chega involuntariamente.

A Figura 5.12 retrata a taxa de erro na *cache* e, como na figura anterior, foi dividida em três grupos. Em cada um dos grupos avaliados, a SCaN-Mob obteve uma maior taxa de erro de *cache*. Isso porque um número maior de interesses conseguiram alcançar os nós na borda da rede, uma vez que a estratégia de encaminhamento proposta controla a inundação de pacotes reduzindo as perdas (e.g., geradas pelas colisões de pacotes).

5.4.4 Avaliação da Taxa de Interesses Expirados

Devido ao canal sem fio não confiável, a perda de pacotes e erros podem ocorrer naturalmente no processo de transmissão de pacotes, de modo que o pacote de dados não consiga ser recuperado do nó de origem (LIU et al., 2017). Dessa forma, os interesses presentes na PIT dos nós, que aguardam pelos dados, serão removidos após atingirem seu tempo

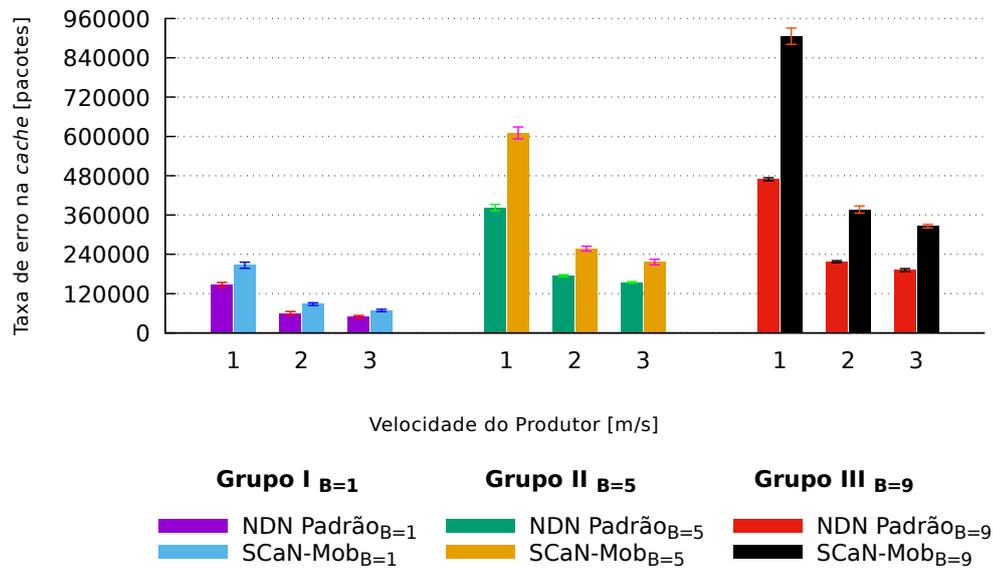


Figura 5.12 Visão geral da taxa de erros na *cache* com a variação dos produtores em *handoff*.

máximo de permanência na PIT (i.e., interesse com tempo expirado (do inglês, *timeout*)), sem que tenham recuperado os dados correspondentes.

A Figura 5.13 traz os resultados da taxa de interesses expirados, de ambas as soluções, separados de acordo com a quantidade de produtores em *handoff*. A análise ocorreu no AP da rede em que se encontravam os produtores (i.e., domínio da WLAN2), uma vez que o AP comuta todo o tráfego dos enlaces em que está conectada. Nos experimentos com apenas um produtor em *handoff*, ilustrado na Figura 5.13 (a), a SCaN-Mob obteve uma taxa de *timeout* inferior a NDN, especialmente quando a velocidade do produtor é menor, visto que o produtor passa mais tempo na rede e pode distribuir uma maior quantidade de dados que podem atender aos interesses futuros. À medida que a quantidade de produtores em *handoff* aumenta, nas Figuras 5.13 (b) e 5.13 (c), tanto a NDN quanto a SCaN-Mob atingem maiores taxas de *timeout*, em virtude do aumento da carga de interesses e conseqüentemente do tráfego de pacotes na rede sem fio. No entanto, a taxa de *timeout* obtida pela SCaN-Mob se mantém bem inferior à alcançada pela NDN, independentemente da quantidade e da velocidade dos produtores em *handoff*.

A Figura 5.14 apresenta uma visão geral da taxa de *timeout* de interesses alcançada pela NDN e pela SCaN-Mob. Como já mostrado na figura anterior, a SCaN-Mob obteve taxas de *timeout* de interesses mais baixas que a NDN em todos os casos avaliados. Dessa maneira, a SCaN-Mob novamente mostra ser escalável mesmo quando a carga de pacotes na rede se eleva.

A taxa de interesses expirados impacta diretamente no tempo de resposta que os consumidores esperam para obter os dados requisitados. Na próxima seção, é realizada uma análise detalhada dos atrasos obtidos em cada cenário.

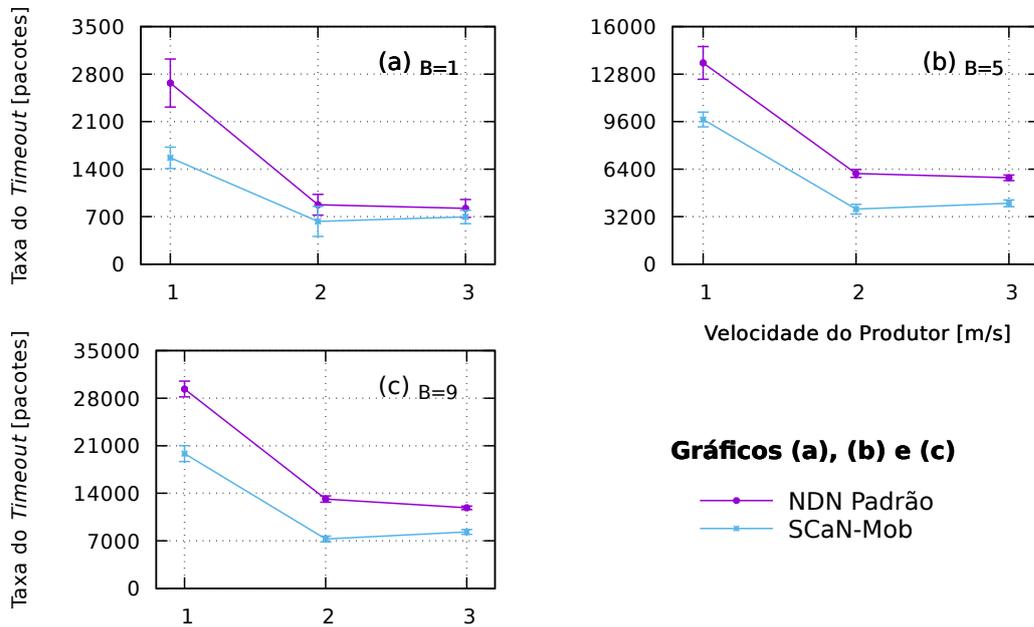


Figura 5.13 Taxa de interesses expirados com um (a), cinco (b) e nove (c) produtores em *handoff*.

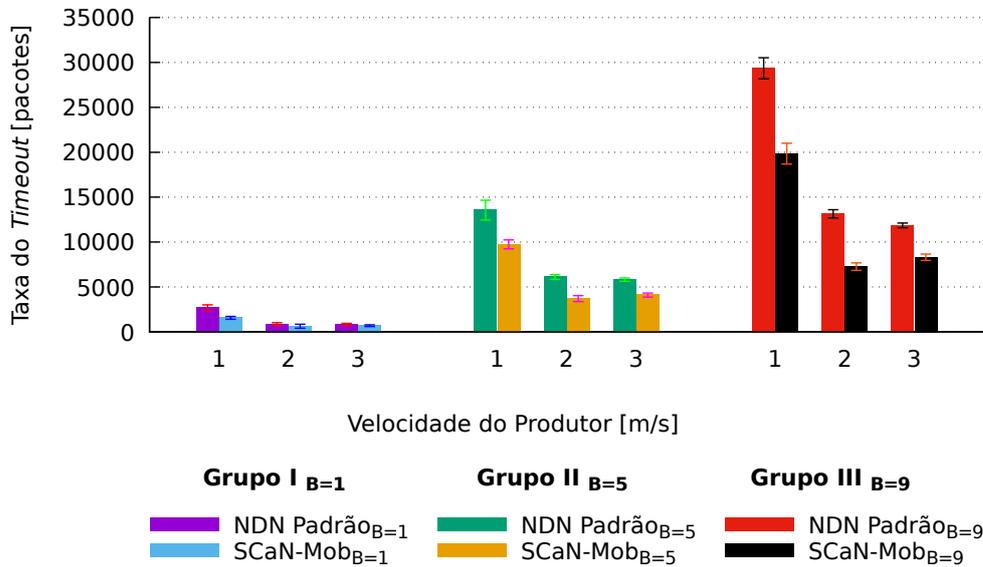


Figura 5.14 Visão geral da taxa de interesses expirados com a variação dos produtores em *handoff*.

5.4.5 Avaliação do Atraso na Obtenção de Dados

Uma forma de reduzir o atraso de entrega de dados é possibilitar que os interesses possam recuperar os dados na *cache* do nó mais próximo ao solicitante (BRITO; VELLOSO; MORAES, 2014). O atraso avaliado corresponde ao tempo total que os consumidores aguardaram para obter os dados solicitados, desde o primeiro interesse encaminhado para obter o dado até o retorno dos dados correspondentes. Portanto, inclui o tempo dos possíveis *timeout* de interesses e, até mesmo, o tempo das possíveis retransmissões desses pacotes. A Figura 5.15 ilustra o atraso alcançado, em ambas as soluções, quando apenas um produtor efetua *handoff* (i.e., fator $B = 1$). Nota-se que, a SCaN-Mob obteve atrasos inferiores, principalmente, nos casos que o movimento do produtor é lento.

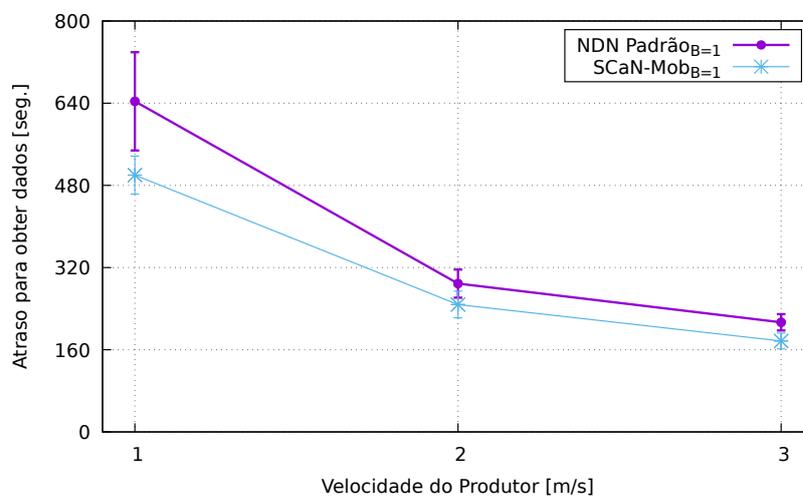


Figura 5.15 Atraso com um produtor em *handoff*.

A Figura 5.16 como a anterior, retrata o atraso de entrega de dados alcançado pelos consumidores. Observa-se que, a SCaN-Mob atinge valores significativamente inferiores aos alcançados pela NDN. Visto que a quantidade de produtores em *handoff* é maior e assim mais dados são distribuídos no domínio, o que possibilita a satisfação dos interesses que chegam no período de indisponibilidade do produtor.

Na Figura 5.17, as soluções avaliadas apresentam maiores taxas de atraso para obter dados, em razão da maior quantidade de produtores em *handoff* que aumentam a carga de pacotes na rede. Semelhante a tendência das duas figuras anteriores, o atraso é maior quando a velocidade dos produtores é baixa. Porém, ainda assim, a SCaN-Mob consegue obter melhores resultados em relação a NDN.

Uma visão geral do atraso, obtido pelas soluções avaliadas, está representada na Figura 5.18. Constata-se, mais uma vez, que os resultados do atraso na SCaN-Mob conseguem se manter bem abaixo da NDN. Desse modo, a SCaN-Mob escala conforme o aumento do número de produtores em *handoff*.

Uma avaliação geral do atraso, para obter dados, sofrido individualmente por cada consumidor está representada na Figura 5.19. A figura torna evidente o bom desempenho da SCaN-Mob que consegue manter, em cada consumidor, taxas de atraso bastante

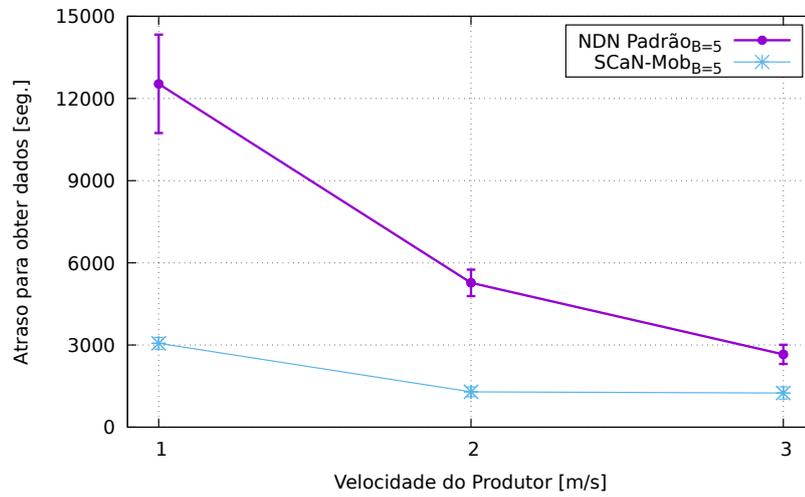


Figura 5.16 Atraso com cinco produtores em *handoff*.

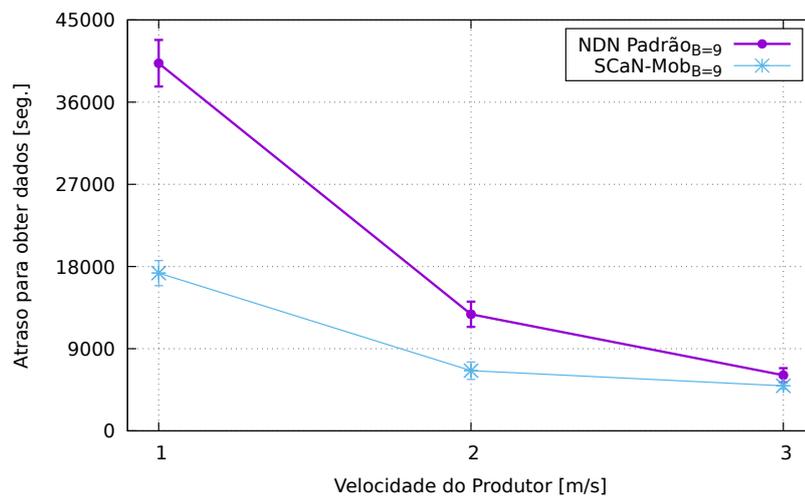


Figura 5.17 Atraso com nove produtores em *handoff*.

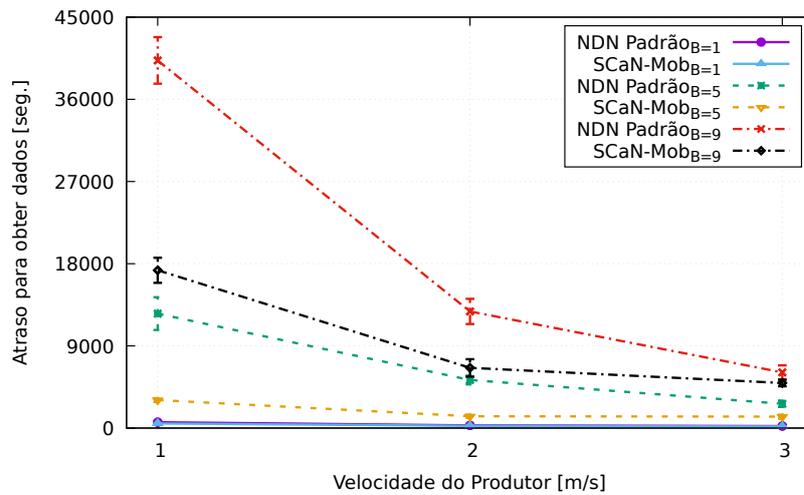


Figura 5.18 Visão geral do atraso com um, cinco e nove produtores em *handoff*.

inferiores se comparada à NDN padrão.

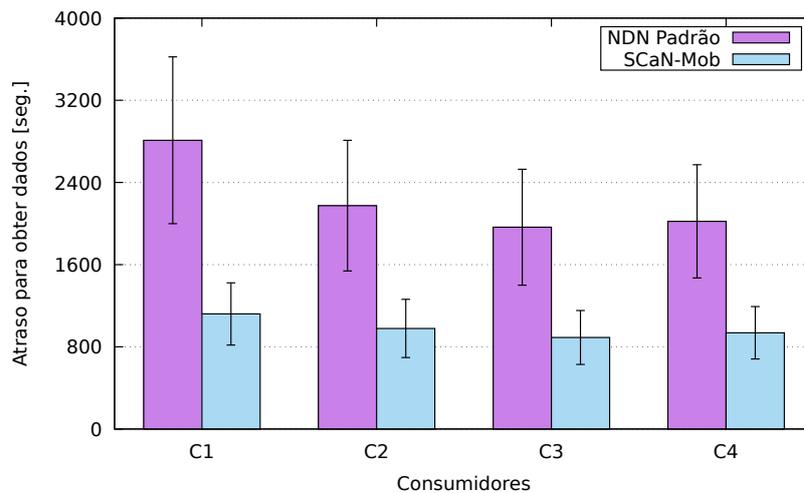


Figura 5.19 Atraso geral para obter dados por consumidor (ARAÚJO; SOUSA; SAMPAIO, 2018).

5.4.6 Avaliação da Sobrecarga de Pacotes na Rede

A sobrecarga de pacotes na rede sem fio foi avaliada individualmente para cada tipo de pacote trafegado. Para cada avaliação os resultados foram divididos em três grupos, de acordo com a quantidade de produtores em *handoff*. Na Figura 5.20, está representado o tráfego de pacotes de interesse. Nota-se que a carga de interesse se eleva conforme o aumento dos produtores em *handoff*. De modo geral, as duas soluções dispõem da mesma quantidade de interesses, com a SCaN-Mob tendendo para uma quantidade menor

desses pacotes. A pequena variação obtida entre os resultados da NDN e da SCaN-Mob, quando os produtores têm igual velocidade, se dá pela característica randômica da carga de interesses emitidos pelos consumidores.

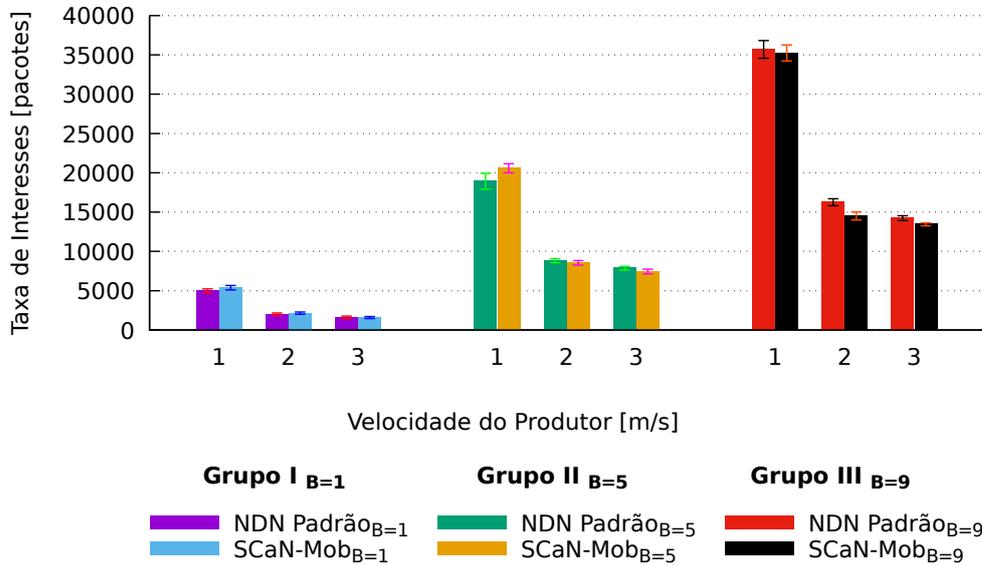


Figura 5.20 Visão geral da taxa de interesses encaminhados na WLAN com a variação dos produtores em *handoff*.

Semelhante a figura anterior, a Figura 5.21 teve seus resultados divididos em três grupos. Porém, avalia a taxa de dados trafegados na rede sem fio, essa taxa se eleva conforme o aumento da quantidade de produtores em *handoff*. Torna-se notável que a taxa de dados é maior quando a velocidade do produtor é baixa, devido ao seu maior tempo de permanência na rede. A SCaN-Mob obteve um maior tráfego de dados, pois os interesses puderam encontrar mais dados na *cache* dos nós. Isso se deve pela política de substituição de *cache* proposta que prioriza os dados dos produtores em *handoff* e reduz a redundância de armazenamento, maximizando a diversidade de conteúdos na rede.

Além do tráfego de pacotes de interesse e dados mostrado anteriormente, foi avaliado o tráfego de pacotes *nacks* e sondas na rede sem fio, de acordo com a quantidade de produtores em *handoff*, fato observado na Figura 5.22. A Figura 5.22 (a) apresenta os resultados obtidos pela NDN. É possível observar que a NDN introduz uma excessiva carga de pacotes *nacks*, à medida que aumenta os produtores que efetuam *handoff* e isso se agrava, ainda mais, quando a velocidade dos produtores é baixa (i.e., os produtores permanecem por mais tempo na rede). Os pacotes *nacks* podem ser gerados e encaminhados pelos nós como resposta aos interesses que não conseguiram alcançar a fonte dos dados (ZHANG et al., 2014). Portanto, essa alta carga de *nacks* na NDN é gerada devido aos interesses não conseguirem encontrar os dados dos produtores após o *handoff* dos mesmos.

Por outro lado, a SCaN-Mob, além de aumentar a disponibilidade de dados, deixa apenas a carga do AP realizar o encaminhamento de pacotes *nacks*. No entanto, acres-

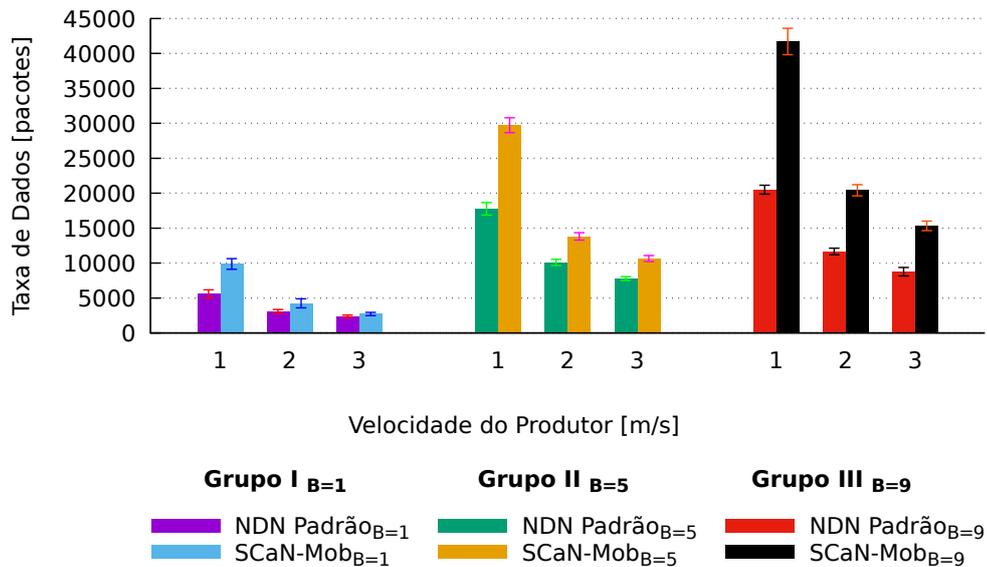


Figura 5.21 Visão geral da taxa de dados encaminhados na WLAN com a variação dos produtores em *handoff*.

centa os pacotes sondas na rede sem fio, como mostrado na Figura 5.22 (b). Os pacotes sondas têm a função de possibilitar que um nó móvel faça a descoberta de seus vizinhos (ARAÚJO; SOUSA; SAMPAIO, 2018). Uma vez que, na SCA-N-Mob todos os nós com mobilidade emitem as sondas na rede periodicamente, a quantidade das sondas enviadas é constante, variando apenas com a mudança do número de nós conectados na rede sem fio. Dessa forma, quando os produtores em *handoff* permanecem mais tempo na rede (e.g., velocidade 1 m/s), mais sondas serão encaminhadas. Em contrapartida, a taxa das sondas enviadas no domínio é reduzida, quando a velocidade dos produtores em *handoff* é maior (e.g., velocidade 3 m/s).

A Figura 5.23 apresenta uma visão geral do tráfego de pacotes no domínio da rede sem fio, obtido pela NDN e pela SCA-N-Mob. Observa-se na Figura 5.23 (a), que os pacotes de interesses encaminhados nas duas soluções foram estatisticamente iguais. A Figura 5.23 (b) ilustra o tráfego de dados, em que a SCA-N-Mob atinge uma taxa superior no encaminhamento desses pacotes, em razão da política de *cache* proposta manter uma maior diversidade de conteúdos na rede. Além disso, a SCA-N-Mob controla a inundação de pacotes na rede através da estratégia de encaminhamento proposta. Por outro lado, a NDN congestiona a rede com os pacotes *nacks*, como mostrado na Figura 5.23 (c), devido os interesses não encontrarem os dados solicitados, o que compromete o desempenho da rede. A Figura 5.23 (d) apresenta os pacotes sondas adicionados na rede sem fio pela SCA-N-Mob, é possível notar que o tráfego geral desses pacotes é baixo, uma vez que é feito de forma controlada, por isso não afetam o desempenho da rede.

A sobrecarga na rede pode gerar perdas de pacotes, como mostrado na seção seguinte.

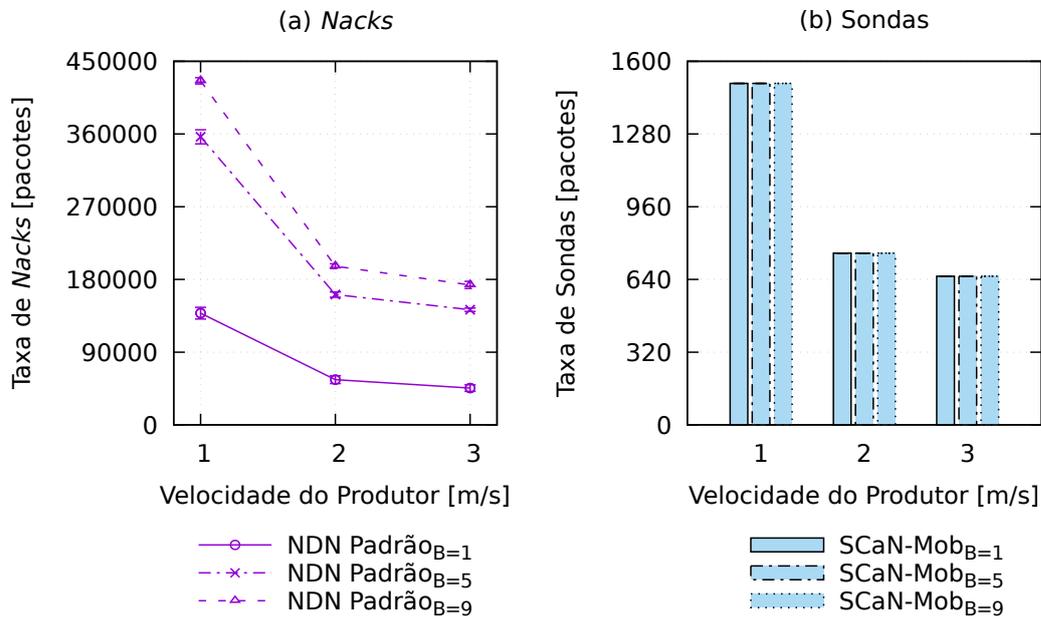


Figura 5.22 Visão geral da taxa de *nacks* e sondas encaminhados na WLAN com a variação dos produtores em *handoff*.

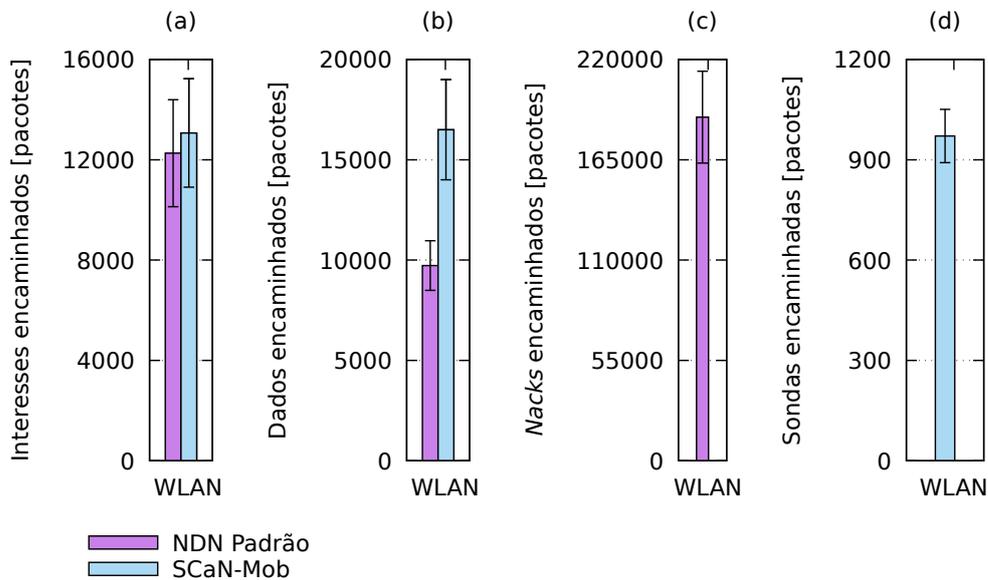


Figura 5.23 Tráfego geral de pacotes encaminhados na WLAN (ARAÚJO; SOUSA; SAMPAIO, 2018).

5.4.7 Avaliação da Taxa de Descarte de Pacotes

Como o AP é responsável por encaminhar todo o tráfego dos dispositivos nele conectados, foi avaliado o AP da rede onde os produtores estavam inicialmente localizados (i.e., AP2). A Figura 5.24 apresenta a taxa de pacotes de dados descartados na camada 2 do AP2, causada, por exemplo, pelo estouro da fila de transmissão (i.e., quando a carga de pacotes é maior que a capacidade operacional do dispositivo). Na SCaN-Mob, os produtores móveis sempre selecionam o AP, para depositarem seus dados, no momento próximo da perda de conexão, causada pela sua distância para o AP (i.e., aproximação da fase final do *handoff*), logo, o descarregamento de dados aumentará proporcionalmente com a quantidade de produtores em *handoff*. Dessa forma, o descarte de pacotes ocorreu somente na SCaN-Mob, devido ao alto descarregamento de dados durante a fase final do *handoff* dos produtores. Isso torna-se evidente quando há uma maior quantidade de produtores em *handoff* (i.e., $B = 5$ e $B = 9$) e com velocidade baixa (i.e., 1 m/s e 2 m/s), o que provoca a intensificação do tráfego de pacotes, elevando as taxas de descarte.

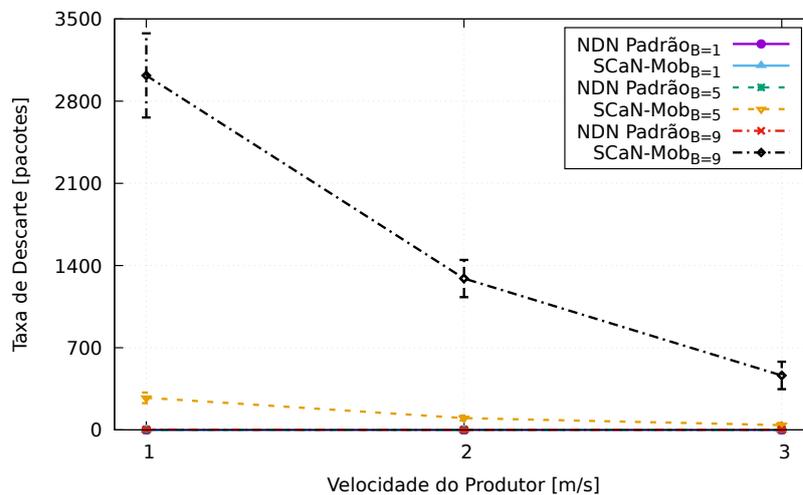


Figura 5.24 Visão geral da taxa de descarte de dados com a variação dos produtores em *handoff*.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo abordou em detalhes a avaliação experimental realizada, desde a técnica de validação escolhida, passando pelo estudo de avaliação dos simuladores até os primeiros resultados alcançados nesta pesquisa. Além disso, mostrou o cenário de avaliação empregado, bem como, uma profunda discussão da metodologia utilizada, com suas relevantes métricas de desempenho e, por fim, mostrou uma análise detalhada dos resultados obtidos na solução proposta SCaN-Mob, comparando-a com a NDN padrão.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A NDN se apresenta como uma arquitetura promissora para a Internet do Futuro. No entanto, apesar de suportar a mobilidade dos consumidores através de sua própria arquitetura, a mobilidade dos produtores ainda não tem um nível de suporte adequado, principalmente quando esses nós perdem a conexão com a rede, tornando-se indisponíveis. Uma vez que na NDN os dados podem ser facilmente retirados dos produtores originais e mantidos na *cache* dos nós, este trabalho se concentrou em desenvolver uma solução para amenizar os problemas causados à rede pela mobilidade dos produtores, de modo a priorizar os dados dos produtores mais propensos a efetuarem *handoff*, na *cache* dos demais nós da rede sem fio. Dessa forma, aumenta-se a diversidade de conteúdos na rede e, conseqüentemente, as chances de resposta aos interesses que chegam no período de indisponibilidade do produtor.

A solução proposta, chamada SCaN-Mob, permite que os dados dos produtores possam ser armazenados oportunisticamente na *cache* dos dispositivos presentes na borda da rede sem fio. Na SCaN-Mob, no momento que o produtor responde uma requisição, o mesmo faz a marcação nos campos do pacote de dados referentes ao nó que o dado deve ser armazenado e a prioridade que o dado terá na *cache* do nó de destino. Dessa maneira, as replicações redundantes de dados são evitadas possibilitando o uso eficiente do espaço de armazenamento da *cache* dos nós e, além disso, apenas os dados com as prioridades mais elevadas se manterão armazenados na *cache*. Esses dados prioritários são oriundos dos produtores mais propensos a realizarem *handoff*.

O cálculo da prioridade dos dados foi baseado na distância do produtor móvel para o AP, ao qual o nó está conectado. Para realizar esse cálculo utilizou-se a bem conhecida fórmula da distância Euclidiana e a variação da fórmula original do movimento retilíneo uniforme. A SCaN-Mob foi comparada com a NDN padrão que empregou a política de *cache* LRU e a estratégia de encaminhamento *best-route*. Para isso, foi realizado um minucioso estudo com base no modelo de planejamento de experimentos fatorial completo 2^k com replicações. Além disso, foi utilizada várias métricas relevantes para avaliar os aspectos da rede e dos consumidores, como exemplo, o desempenho do uso da *cache*, a

taxa de interesses expirados, a sobrecarga na rede, a taxa de pacotes removidos, bem como, a taxa de satisfação de interesse e o tempo de resposta para obter dados.

Os resultados obtidos das simulações se mostraram bastante favoráveis para a solução proposta, pois a mesma consegue manter uma taxa de satisfação de interesse elevada, inclusive, quando os produtores se tornam indisponíveis devido ao *handoff* e, ainda, mantém uma redução significativa do tempo de resposta para os consumidores obterem os dados solicitados. Outra forte característica apresentada pela proposta é que consegue escalar, de acordo com a quantidade de produtores em *handoff* e com a variação da carga de pacotes na rede, quando comparada à NDN padrão.

A SCaN-Mob segue o princípio da NDN, uma vez que mantém o foco nos dados nomeados independentes de localização de hospedagem. Além disso, a solução foi desenvolvida baseada em módulos, o que permite fáceis alterações em seus componentes (e.g., utilizar outro algoritmo de seleção de nós na NIT). Dessa forma, a SCaN-Mob é genérica e pode ser facilmente estendida para sua aplicação a outros cenários de redes sem fio (e.g., 5G, *Mesh*, *Ad hoc*).

6.1 DISCUSSÕES

Inicialmente foi realizado um estudo preliminar a respeito dos simuladores de redes que melhor atenderiam o desenvolvimento desta pesquisa. Dentre os mais usados no meio acadêmico foi encontrado o OMNeT++ e o NS-3, nos quais os estudos foram aprofundados. O NS-3 possui uma extensão que dá suporte à ICN, através do módulo ndnSIM. Ao fim do estudo inicial, concluiu-se que o ndnSIM seria o simulador mais adequado para implementar a proposta desta pesquisa. Dessa forma, uma rede NDN básica foi implementada no ndnSIM simulando o *handoff* do consumidor e do produtor, evidenciando a problemática tratada nesta pesquisa. E mais tarde, foi implementada a solução proposta deste trabalho.

Como resultado obtido ao longo da pesquisa realizada, houve as seguintes publicações científicas:

1. XIII *Workshop* de Redes P2P, Dinâmicas, Sociais e Orientadas a Conteúdo (WP2P+) – a edição de 2017 do *workshop* foi realizada no dia 19 de maio, como parte da programação do XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), que aconteceu entre os dias 15 a 19 de maio de 2017 em Belém – Pará. Artigo aceito na modalidade *short paper*, intitulado — Mobilidade em NDN: Consumidores versus Produtores. Autores: **Francisco R. C. Araújo**, Leobino N. Sampaio.
2. II *Workshop* de Estudantes do PGCOMP (WE.PGCOMP 2017) – a segunda edição do *workshop* aconteceu no dia 30 de junho de 2017, no Instituto de Matemática da UFBA. Resumo estendido aceito na linha de pesquisa sistemas computacionais na modalidade mestrado, intitulado — O Desafio da Mobilidade de Produtores em NDN. Autores: **Francisco R. C. Araújo**, Leobino N. Sampaio.
3. XXXVI SBRC 2018 – a edição de 2018 do simpósio ocorreu de 6 a 10 de maio de 2018 em Campos do Jordão – São Paulo. Artigo aceito na trilha principal do

SBRC, intitulado — Armazenamento Oportunista em Redes de Dados Nomeados Sem Fio como Suporte à Mobilidade de Produtores. Autores: **Francisco R. C. Araújo**, Antonio M. de Sousa, Leobino N. Sampaio.

Além das publicações apresentadas acima também houve contribuições em outros trabalhos, em conjunto com membros do grupo de pesquisa, que envolvem a temática das redes ICN, os quais resultaram nas seguintes publicações:

- XXXVI SBRC 2018 – artigo aceito na trilha principal do SBRC, intitulado — Encaminhamento Seletivo de Interesses em Redes Veiculares de Dados Nomeados Baseado no Tempo de Vida do Enlace. Autores: Antonio M. de Sousa, **Francisco R. C. Araújo**, Leobino N. Sampaio.
- IEEE *Internet Computing* – artigo publicado em junho de 2018, intitulado — *A Link-Stability-Based Interest-Forwarding Strategy For Vehicular Named Data Networks*. Autores: Antonio M. de Sousa, **Francisco R. C. Araújo**, Leobino N. Sampaio.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Existem várias possibilidades de extensão e melhorias da SCaN-Mob que podem ser realizadas posteriormente. Um possível trabalho futuro refere-se a experimentações da SCaN-Mob em outros cenários de redes sem fio, como em redes celulares, redes veiculares ou nos cenários mencionados nas seções anteriores. A SCaN-Mob foi avaliada no cenário de WLANs infraestruturadas (Wi-Fi) baseadas no padrão IEEE 802.11. Dessa forma, é relevante analisar o comportamento da proposta em redes de maior abrangência como na abordagem *Mesh*, em redes baseadas em outros padrões como WiMAX e naquelas com diferentes características como as redes de evolução de longo prazo (do inglês, *Long Term Evolution* (LTE)) e 5G.

Outro possível trabalho futuro é a adoção de outros modelos de mobilidade para os nós. O modelo testado na proposta, para os nós produtores que não efetuavam *handoff*, pode não representar fielmente a realidade. Assim, é importante avaliar a proposta com os modelos de mobilidade mais realistas (e.g., *traces* reais de mobilidade).

Também é importante comparar a SCaN-Mob com outras estratégias de apoio à mobilidade de produtores na NDN, presentes na literatura. Neste trabalho, a proposta foi comparada com a NDN padrão, e encontrou-se dificuldade de realizar comparações com outras soluções de apoio à mobilidade, principalmente, devido ao fato da incompatibilidade da proposta com as soluções existentes, que ignoram a capacidade computacional dos dispositivos da borda da rede sem fio, enquanto a proposta explora os recursos de armazenamento desses dispositivos.

Por fim, podem ser empregados outros critérios de priorização de dados dos produtores propensos a ficarem indisponíveis. O critério de priorização utilizado se baseou na distância e velocidade do produtor, em relação ao AP, para prever seu tempo de permanência na rede, contudo, podem ser empregados outros métodos de priorização, como nível de intensidade de sinal recebido e nível da carga de bateria disponível no nó.

Ainda, se pode utilizar outros algoritmos de seleção de nós para armazenamento de dados e também realizar testes para ambientes de redes densas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 4WARD. *The FP7 4WARD Project*. 2008. Disponível em: <<http://www.4ward-project.eu/>>. Acesso em: 12 jan. 2018.
- AHLGREN, B.; DANNEWITZ, C.; IMBRENDA, C.; KUTSCHER, D.; OHLMAN, B. A survey of information-centric networking. *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 7, p. 26–36, jul. 2012.
- AMADEO, M.; CAMPOLO, C.; MOLINARO, A.; RUGGERI, G. Content-centric wireless networking: A survey. *Computer Networks*, v. 72, p. 1–13, oct. 2014.
- ANR CONNECT. *Project Connect*. 2010. Disponível em: <<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Project-ANR-10-VERS-0001>>. Acesso em: 16 jan. 2018.
- ARAÚJO, F. R. C.; SAMPAIO, L. N. Mobilidade em NDN: Consumidores versus Produtores. In: *XIII Workshop de Redes P2P, Dinâmicas, Sociais e Orientadas a Conteúdo (WP2P+)*. Belém, PA: SBC, 2017. v. 13, p. 8–13.
- ARAÚJO, F. R. C.; SOUSA, A. M. de; SAMPAIO, L. N. Armazenamento Oportunista em Redes de Dados Nomeados Sem Fio como Suporte à Mobilidade de Produtores. In: *XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*. Campos do Jordão, SP: SBC, 2018. v. 36.
- AZEVEDO, T. S.; BEZERRA, R. L.; CAMPOS, C. A. V.; MORAES, L. F. M. de. An Analysis of Human Mobility Using Real Traces. In: *2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1–6.
- AZGIN, A.; RAVINDRAN, R.; WANG, G. Mobility study for Named Data Networking in wireless access networks. In: *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.]: IEEE, 2014. p. 3252–3257.
- BONVOYAGE. *Bonvoyage Project*. 2015. Disponível em: <<http://bonvoyage2020.eu/>>. Acesso em: 19 jan. 2018.
- BRITO, G. M. de; VELLOSO, P. B.; MORAES, I. M. Redes Orientadas a Conteúdo: Um Novo Paradigma para a Internet. In: *Minicurso do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*. Ouro Preto, MG: SBC, 2012. p. 211–264.
- BRITO, G. M. de; VELLOSO, P. B.; MORAES, I. M. Uma análise do desempenho de redes sem-fio orientadas a conteúdo. In: *XXXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*. Florianópolis, SC: SBC, 2014. v. 32, p. 149–162.

CAESAR, M.; CASTRO, M.; NIGHTINGALE, E. B.; O'SHEA, G.; ROWSTRON, A. Virtual Ring Routing: Network Routing Inspired by DHTs. *SIGCOMM Computer Communication Review*, ACM, New York, NY, USA, v. 36, n. 4, p. 351–362, aug. 2006.

CAESAR, M.; CONDIE, T.; KANNAN, J.; LAKSHMINARAYANAN, K.; STOICA, I.; SHENKER, S. Rofi: Routing on flat labels. *SIGCOMM Computer Communication Review*, ACM, New York, NY, USA, v. 36, n. 4, p. 363–374, aug. 2006.

CARZANIGA, A.; WOLF, A. L. Content-Based Networking: A New Communication Infrastructure. In: *Lecture Notes in Computer Science - Developing an Infrastructure for Mobile and Wireless Systems*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2538 LNCS, p. 59–68.

CBMEN. *Content-Based Mobile Edge Networking (CBMEN)*. 2013. Disponível em: <https://www.darpa.mil/program/content-based-mobile-edge-networking>. Acesso em: 17 jan. 2018.

CHERITON, D. R.; GRITTER, M. *TRIAD: A New Next-Generation Internet Architecture*. 2000. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.33.5878>. Acesso em: 28 mar. 2018.

CHIOCCHETTI, R.; ROSSI, D.; ROSSINI, G. ccnSim: An highly scalable CCN simulator. In: *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 2309–2314.

CISCO. *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper*. 2017. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>. Acesso em: 13 mar. 2018.

COMET. *COMET project*. 2010. Disponível em: <http://www.comet-project.org/>. Acesso em: 13 jan. 2018.

COMIT. *COMIT: Content Management at Internet Scale*. 2014. Disponível em: <https://www.ee.ucl.ac.uk/comit-project/>. Acesso em: 18 jan. 2018.

CONVERGENCE. *Convergence Project*. 2010. Disponível em: <http://www.ict-convergence.eu/>. Acesso em: 14 jan. 2018.

FARAHAT, H.; HASSANEIN, H. Optimal caching for producer mobility support in Named Data Networks. In: *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 1–6.

GAO, D.; RAO, Y.; FOH, C. H.; ZHANG, H.; VASILAKOS, A. V. PMNDN: Proxy Based Mobility Support Approach in Mobile NDN Environment. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, v. 14, n. 1, p. 191–203, mar. 2017.

GAO, S.; ZHANG, H. Scalable mobility management for content sources in Named Data Networking. In: *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 79–84.

GE, J.; WANG, S.; WU, Y.; TANG, H.; E, Y. Performance improvement for source mobility in named data networking based on global–local FIB updates. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, v. 9, n. 4, p. 670–680, jul. 2016.

GREENICN. *Architecture and Applications of Green Information Centric Networking*. 2013. Disponível em: <http://www.greenicn.org/>. Acesso em: 17 jan. 2018.

HAHM, O.; BACCELLI, E.; SCHMIDT, T. C.; WÄHLISCH, M.; ADJIH, C.; MASSOULIÉ, L. Low-power Internet of Things with NDN & Cooperative Caching. In: *Proceedings of the 4th ACM Conference on Information-Centric Networking*. New York, NY, USA: ACM, 2017. (ICN '17), p. 98–108.

HUYNH, T.; PRIYONO, O.; LEE, S.-H.; HWANG, W.-J. Simultaneous mobility of data sources and content requesters in content-centric networking. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, v. 10, n. 1, p. 31–44, sep. 2017.

I-CAN. *The I-CAN Project*. 2014. Disponível em: <https://mm.aueb.gr/i-can/>. Acesso em: 18 jan. 2018.

IOANNOU, A.; WEBER, S. A Survey of Caching Policies and Forwarding Mechanisms in Information-Centric Networking. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 18, n. 4, p. 2847–2886, may. 2016.

JACOBSON, V. *A New Way to look at Networking*. 2006. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=oCZMoY3q2uM>. Acesso em: 05 mar. 2018.

JACOBSON, V.; SMETTERS, D. K.; THORNTON, J. D.; PLASS, M. F.; BRIGGS, N. H.; BRAYNARD, R. L. Networking named content. In: *Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies - CoNEXT '09*. New York, USA: ACM Press, 2009. v. 6, n. 1, p. 1–12.

JAIN, R. *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1991.

KHAN, A. R.; BILAL, S. M.; OTHMAN, M. A performance comparison of open source network simulators for wireless networks. In: IEEE. *Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2012 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 34–38.

KOPONEN, T.; CHAWLA, M.; CHUN, B.-G.; ERMOLINSKIY, A.; KIM, K. H.; SHENKER, S.; STOICA, I. A Data-oriented (and Beyond) Network Architecture. *SIGCOMM Computer Communication Review*, ACM, New York, NY, USA, v. 37, n. 4, p. 181–192, aug. 2007.

KUBIATOWICZ, J.; BINDEL, D.; CHEN, Y.; CZERWINSKI, S.; EATON, P.; GEELS, D.; GUMMADI, R.; RHEA, S.; WEATHERSPOON, H.; WEIMER, W.; WELLS, C.; ZHAO, B. OceanStore: An Architecture for Global-scale Persistent Storage. *SIGPLAN Notices*, ACM, New York, NY, USA, v. 35, n. 11, p. 190–201, nov. 2000.

- LEHMANN, M. B.; BARCELLOS, M. P.; MAUTHE, A. Providing producer mobility support in NDN through proactive data replication. In: *NOMS 2016 - 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 383–391.
- LIU, X.; LI, Z.; YANG, P.; DONG, Y. Information-centric mobile ad hoc networks and content routing: A survey. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 58, p. 255–268, apr. 2017.
- LUO, Y.; EYMANN, J.; TIMM-GIEL, A. Mobility support for content centric networking. *Telecommunication Systems*, Springer US, v. 59, n. 2, p. 271–288, jun. 2015.
- MASTORAKIS, S.; AFANASYEV, A.; MOISEENKO, I.; ZHANG, L. *ndnSIM 2: An updated NDN simulator for NS-3*. [S.l.], 2016.
- MASTORAKIS, S.; AFANASYEV, A.; ZHANG, L. On the Evolution of ndnSIM: An Open-Source Simulator for NDN Experimentation. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, ACM, New York, NY, USA, v. 47, n. 3, p. 19–33, set. 2017.
- MOBILITYFIRST. *MobilityFirst Future Internet Architecture Project*. 2010. Disponível em: <http://mobilityfirst.winlab.rutgers.edu/>. Acesso em: 16 jan. 2018.
- NDN. *Named Data Networking (NDN) Project*. 2010. Disponível em: <https://named-data.net/>. Acesso em: 14 jan. 2018.
- PANWAR, G.; TOURANI, R.; MICK, T.; MTIBAA, A.; MISRA, S. DICE: Dynamic Multi-RAT Selection in the ICN-enabled Wireless Edge. In: *Proceedings of the Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture*. New York, NY, USA: ACM, 2017. (MobiArch '17), p. 31–36.
- POINT. *The POINT Project*. 2015. Disponível em: <https://www.point-h2020.eu/>. Acesso em: 19 jan. 2018.
- PSIRP. *PSIRP project*. 2008. Disponível em: <http://www.psirp.org/>. Acesso em: 08 jan. 2018.
- PURSUIT. *FP7 PURSUIT project*. 2010. Disponível em: <http://www.fp7-pursuit.eu/PursuitWeb/>. Acesso em: 10 jan. 2018.
- REHMAN, R. A.; KIM, B. LOMCF: Forwarding and Caching in Named Data Networking Based MANETs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 66, n. 10, p. 9350–9364, oct. 2017.
- REXFORD, J.; DOVROLIS, C. Future Internet Architecture: Clean-slate Versus Evolutionary Research. *Communications of the ACM*, ACM, New York, NY, USA, v. 53, n. 9, p. 36–40, sep. 2010.
- RIFE. *RIFE Project*. 2015. Disponível em: <https://rife-project.eu/>. Acesso em: 18 jan. 2018.

SAIL. *SAIL project*. 2010. Disponível em: <http://www.sail-project.eu/>. Acesso em: 13 jan. 2018.

STOICA, I.; ADKINS, D.; ZHUANG, S.; SHENKER, S.; SURANA, S. Internet Indirection Infrastructure. *SIGCOMM Computer Communication Review*, ACM, New York, NY, USA, v. 32, n. 4, p. 73–86, aug. 2002.

THAR, K.; Thant Zin Oo; Chuan Pham; ULLAH, S.; Doo Ho Lee; HONG, C. S. Efficient forwarding and popularity based caching for Content Centric Network. In: *2015 International Conference on Information Networking (ICOIN)*. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 330–335.

UMOBILE. *Universal, mobile-centric and opportunistic communications architecture*. 2015. Disponível em: <http://umobile-project.eu/>. Acesso em: 18 jan. 2018.

VARGA, A.; HORNIG, R. An overview of the OMNeT++ simulation environment. In: *ICST. Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*. [S.l.], 2008. p. 1–10.

WOO, T.; PARK, H.; JUNG, S.; KWON, T. Proactive neighbor pushing for enhancing provider mobility support in content-centric networking. In: *2014 Sixth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 158–163.

XU, D.; LI, Y.; CHEN, X.; LI, J.; HUI, P.; CHEN, S.; CROWCROFT, J. A Survey of Opportunistic Offloading. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, PP, n. 99, p. 1–39, feb. 2018.

XYLOMENOS, G.; VERVERIDIS, C. N.; SIRIS, V. A.; FOTIOU, N.; TSILOPOULOS, C.; VASILAKOS, X.; KATSAROS, K. V.; POLYZOS, G. C. A Survey of Information-Centric Networking Research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 16, n. 2, p. 1024–1049, 2014.

ZHANG, L.; AFANASYEV, A.; BURKE, J.; JACOBSON, V.; CLAFFY, K.; CROWLEY, P.; PAPADOPOULOS, C.; WANG, L.; ZHANG, B. Named data networking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 44, n. 3, p. 66–73, jul. 2014.

ZHANG, Y.; AFANASYEV, A.; BURKE, J.; ZHANG, L. A survey of mobility support in Named Data Networking. In: *2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 83–88.