



MODELAGEM MATEMÁTICA DO ATRASO DE ENTREGA DE MENSAGENS
EM REDES OPORTUNISTAS COM TAXAS DE ENCONTRO
HETEROGÊNEAS

Gabriela Moutinho de Souza Dias

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientadores: José Ferreira de Rezende
Ronaldo Moreira Salles

Rio de Janeiro
Dezembro de 2018

MODELAGEM MATEMÁTICA DO ATRASO DE ENTREGA DE MENSAGENS
EM REDES OPORTUNISTAS COM TAXAS DE ENCONTRO
HETEROGÊNEAS

Gabriela Moutinho de Souza Dias

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

Prof. Ronaldo Moreira Salles, Ph.D.

Prof. Artur Ziviani, Dr.

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, Ph.D.

Prof. Daniel Ratton Figueiredo, Ph.D.

Prof. Sidney Cunha de Lucena, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2018

Dias, Gabriela Moutinho de Souza

Modelagem matemática do atraso de entrega de mensagens em redes oportunistas com taxas de encontro heterogêneas/Gabriela Moutinho de Souza Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XV, 110 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: José Ferreira de Rezende

Ronaldo Moreira Salles

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 99 – 104.

1. Modelagem matemática. 2. Redes Oportunistas.
3. *Multi-copy*. 4. Heterogeneidade. I. Rezende, José Ferreira de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

Para Lucas.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus, Criador de todas as coisas e de toda a ciência, que me permitiu chegar até aqui graças ao Seu incomparável Amor e Sua eterna Misericórdia. Louvado seja o Senhor Jesus Cristo.

Agradeço também à minha família, cujo apoio foi indispensável para a conclusão deste trabalho.

Ao meu filho Lucas, pelos seus sorrisos e por existir.

Ao meu marido Gustavo pelo apoio, compreensão, parceria e paciência.

Aos meus pais Maralice e Eduardo pelo apoio e suporte nos momentos difíceis. Em especial, à minha mãe, que por muitos finais de semana abdicou de seu descanso para ficar com meu filho e cuidar da minha casa enquanto eu trabalhava.

À Vera, terceira avó do Lucas, pela sua ajuda preciosa e pela disponibilidade em cuidar do meu filho sempre que eu precisei, e pelo amor e carinho por ele.

À minha sogra Socorro pelo apoio e por todas as vezes que foi até a minha casa para cozinhar para nós, para que eu pudesse me dedicar ao trabalho.

Às minhas primas-irmãs Daniela e Juliana, por compreenderem meu comprometimento ao trabalho e me ajudarem sempre que precisei.

À minha tia Licelma e à minha avó Maura, pelo apoio emocional e por sempre acreditarem que tudo daria certo.

Aos colegas do LAND, em especial a Fábio David, Daniel Neto, Raphael Melo e Guilherme Dutra.

A todos os responsáveis, direta ou indiretamente, pela manutenção das máquinas do LAND, que permitiram a realização dos experimentos deste trabalho.

Ao Professor Daniel Ratton e aos demais professores do PESC.

Aos meus orientadores, José Rezende e Ronaldo Salles, pela dedicada orientação, ajuda, conselhos, paciência e sabedoria.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

MODELAGEM MATEMÁTICA DO ATRASO DE ENTREGA DE MENSAGENS
EM REDES OPORTUNISTAS COM TAXAS DE ENCONTRO
HETEROGÊNEAS

Gabriela Moutinho de Souza Dias

Dezembro/2018

Orientadores: José Ferreira de Rezende
Ronaldo Moreira Salles

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Esta tese apresenta o desenvolvimento de dois modelos matemáticos para predição do atraso de entrega de mensagens fim-a-fim em redes oportunistas, para processos de encaminhamento *single-copy* e *multi-copy*, quando o nó origem pode criar múltiplas cópias da mensagem.

A área de pesquisa em redes oportunistas vem crescendo ao longo dos anos, mas, apesar da diversidade de propostas de protocolos e soluções para os desafios desse ambiente, existe um problema em aberto na literatura que é a carência de modelos matemáticos. Essa lacuna é a principal motivação do presente trabalho.

O foco principal desta modelagem é a dinâmica de encontros entre os nós, levando em consideração a heterogeneidade na mobilidade dos mesmos, que pressupõe que as taxas de encontro de cada par de nós são diferentes.

O primeiro modelo proposto foi inspirado em um modelo *single-copy* da literatura e expandido para o caso *multi-copy*. O segundo modelo, que engloba ambos os casos *single-copy* e *multi-copy*, segue uma abordagem diferente e foi desenvolvido com a finalidade de eliminar aproximações usadas no primeiro.

Os modelos foram validados por meio da comparação dos resultados analíticos com resultados de simulação. Três ferramentas de simulação foram utilizadas: um simulador próprio especialmente desenvolvido para este trabalho e os simuladores de redes ns-3 e The ONE. Os resultados obtidos mostram uma alta precisão da modelagem, tanto para *traces* sintéticos quanto para *traces* reais.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

MATHEMATICAL MODELLING OF MESSAGE DELIVERY DELAY FOR
OPPORTUNISTIC NETWORKS WITH HETEROGENEOUS PAIRWISE
ENCOUNTER RATES

Gabriela Moutinho de Souza Dias

December/2018

Advisors: José Ferreira de Rezende
Ronaldo Moreira Salles

Department: Systems Engineering and Computer Science

This thesis presents the development of two mathematical models to capture the expected end-to-end message delivery delay in opportunistic networks, for single-copy and multi-copy forwarding process, when the source node can generate multiple copies of the message.

The research area of opportunistic networks is becoming stronger over the years. However, despite of the diversity of protocols and solutions proposed for dealing with the challenges of this environment, there is an open issue in the literature that is the lack of general mathematical models. This gap is the major motivation for the present work.

The mathematical modeling proposed in this document focus on the dynamics of encounters among nodes, taking into consideration the heterogeneity in their mobility, which assumes that the pairwise encounter rates are different.

The first model was inspired by a single-copy model of the literature and expanded to the multi-copy case. The second model, which considers both single and multi-copy cases, follows a different approach and was developed to eliminate some approximations used in the first model.

Both models were validated by comparing analytical and simulation results. Three simulation tools were used: a proper simulator specially developed for this work and the network simulators ns-3 and The ONE. The obtained results show the high precision of the estimates, for both synthetic and real life traces.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	6
2.1 Trabalhos relacionados	6
2.2 Modelo <i>single-copy</i> de Boldrini	9
2.2.1 Descrição do processo de encaminhamento <i>single-copy</i>	9
2.2.2 Modelagem matemática	11
3 Modelo I	14
3.1 Descrição do processo de encaminhamento <i>multi-copy</i>	15
3.2 Modelagem matemática	17
3.3 Caso <i>two-copy</i>	21
3.4 Exemplo	24
3.5 Tempo entre encontros com distribuição exponencial	25
3.5.1 Solução do caso <i>two-copy</i>	26
4 Modelo II	27
4.1 Cadeia de Markov absorvente	28
4.2 Modelagem do processo de encaminhamento	29
4.2.1 Espaço de estados da cadeia	29
4.2.2 Probabilidade de transição e tempo para sair do estado	34
4.2.3 Cálculo do atraso de entrega	35
4.3 Tempo entre encontros com distribuição exponencial	37
4.4 Exemplos	38
4.4.1 Exemplo 1: caso <i>single-copy</i>	38
4.4.2 Exemplo 2: caso <i>multi-copy</i>	40

5	Validação	43
5.1	Simulador ns-3	46
5.2	Simulador MCS	47
5.3	Simulador The ONE	49
5.4	BonnMotion	50
6	Resultados	52
6.1	Modelo I	52
6.1.1	Resultados com o simulador MCS	53
6.1.2	Resultados com o simulador ns-3	55
6.2	Modelo II	57
6.2.1	Traces gerados pelo simulador MCS	57
6.2.2	Trace gerado com BonnMotion	74
6.2.3	Cenário Unical	76
6.2.4	Cenário Infocom 2006	87
6.2.5	Consolidação	94
7	Conclusão	95
7.1	Trabalhos Futuros	98
	Referências Bibliográficas	99
A	Análise empírica da distribuição de probabilidade do atraso de entrega para cópias individuais	105
B	Prova completa da Eq. (3.12)	108

Lista de Figuras

2.1	Exemplo. Processo de encaminhamento <i>single-copy</i> de uma mensagem da origem s para o destino d , identificada como C_1	10
2.2	Exemplo. Eventos de encontro e de encaminhamento entre os nós i e $j \in R_i$, com destaque para a diferença entre as variáveis $M_{i,j}$ e $T_{i,j}$. $m_{i,j}^1$ e $m_{i,j}^2$ são referentes à variável $M_{i,j}$, e $t_{i,j}^1$ é referente à variável $T_{i,j}$. 12	12
3.1	Exemplo. Processo de encaminhamento <i>multi-copy</i> de uma mensagem da origem s para o destino d , com um limite de 2 cópias, identificadas como C_1 e C_2	16
3.2	Exemplo de um esquema <i>two-copy</i> . Ilustração de todos os casos possíveis de contatos do nó origem s no primeiro encaminhamento das cópias C_1 e C_2 de uma mensagem destinada a d . Rede com 5 nós: $s, d, 1, 2$ e 3 . $R_s = \{1, 2, 3, d\}$. Os estados com a borda em negrito representam todas as possíveis sequências S_c onde $c = \{1, 2\}$	24
4.1	Diagramas de estados para o cenário S no caso <i>single-copy</i>	39
4.2	Diagrama de estados para o cenário S com $s = 1$ e $d = 4$, para o caso <i>two-copy</i>	41
5.1	Exemplo de CCDF Empírica e Exponencial do tempo entre encontros de um par de nós seguindo o modelo de mobilidade <i>Steady State Random Waypoint</i> implementado no BonnMotion.	51
6.1	Histograma das taxas de encontro efetivas ($1/s$).	54
6.2	Histograma das taxas de encontro efetivas para o cenário $S1_{ns3}$	56
6.3	Histograma das taxas de encontro efetivas do cenário A1.	59
6.4	Atraso de entrega par-a-par para $k = 1$ obtido com o simulador The ONE e com o Modelo II, para o cenário A1.	60
6.5	Resultados de simulação do atraso de entrega médio com o aumento do valor de k , para o cenário A1.	61

6.6	Exemplo. Coeficiente de variação médio das taxas de encontro obtidas para cada janela do <i>trace</i> de encontros, em função do número de janelas utilizado, para cenários A1, A4 e A10.	67
6.7	Taxas de encontro $\mu_{i,j}^{(w)}$ para os pares do cenário R1.	68
6.8	Taxas de encontro $\mu_{i,j}^{(w)}$ para os pares do cenário R2.	68
6.9	Comparação das taxas de encontro $\mu_{i,j}^{(w)}$ entre os pares diferentes dos cenários R1 e R3.	69
6.10	Taxas de encontro $\mu_{i,j}^{(w)}$ para o par (1,2) do cenário A1, A3 e A10. . .	72
6.11	Histograma das taxas de encontro efetivas do cenário B1.	74
6.12	Resultados de simulação do atraso de entrega médio com o aumento do valor de k para o cenário B1.	75
6.13	Atraso de entrega par-a-par para $k = 1$ obtido com o simulador The ONE e com o Modelo II, para o cenário B1. Resultados de simulação com intervalo de confiança de 98%.	76
6.14	Histograma das taxas de encontro efetivas do <i>trace</i> Unical-1.	78
6.15	Histograma das taxas de encontro efetivas do <i>traces</i> Unical-2, Unical-3 e Unical-4.	79
6.16	Histograma das taxas de encontro efetivas do <i>traces</i> Unical-5, Unical-6 e Unical-7.	80
6.17	Atraso de entrega par-a-par (s). Resultados de simulação, com intervalo de confiança de 98%, e modelagem para o <i>trace</i> Unical-1 para $k = 1$	84
6.18	Atraso de entrega par-a-par (s). Resultados de simulação, com intervalo de confiança de 98%, e modelagem para o <i>trace</i> Unical-1.	85
6.19	Resultados de simulação do atraso de entrega médio com o aumento do valor de k para o cenário Unical-1.	86
6.20	Histograma das taxas de encontro efetivas dos cenários Infocom-1 e Infocom-2.	89
6.21	Histograma das taxas de encontro efetivas dos cenários Infocom-3 e Infocom-4.	90
6.22	Atraso de entrega par-a-par para $k = 1$ obtido com simulação e com o Modelo II, para o cenário Infocom-1. Resultados de simulação com intervalo de confiança de 98%.	91
6.23	Atraso de entrega para $k = 1$ obtido com simulação, referente às mensagens do nó 0 para o nó 9 no cenário Infocom-1 a cada rodada r	91
6.24	Atraso de entrega para $k = 1$ obtido com simulação para cenário Infocom-1 a cada rodada r	92

A.1	Comparação entre CCDF Empírica e CCDF Exponencial da variável $D_{0,9}$, cenário S1. RMSE = 2,42%.	106
A.2	RMSE _{médio} entre CCDF Empírica e CCDF Exponencial de melhor ajuste.	107

Lista de Tabelas

3.1	Variáveis da modelagem com notação conforme a referência [1].	14
3.2	Todos os casos possíveis para o atraso de entrega da origem s ao destino d de acordo com a sequência correspondente S_c , com respectivas probabilidades de ocorrência.	19
3.3	Variáveis complementares.	21
3.4	Valor esperado do atraso de entrega – <i>Single-copy</i> e <i>Multi-copy</i>	22
3.5	Todos os casos possíveis para o atraso de entrega para $k = 2$ da origem s para o destino d de acordo com a sequência correspondente S_c , com respectiva probabilidade de ocorrência.	22
3.6	Todos os casos possíveis para o atraso de entrega para $k = 2$ da origem s para o destino d de acordo com a sequência correspondente S_c , com respectivas probabilidades de ocorrência, para o exemplo descrito pela Figura 3.2.	25
6.1	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para cenários S1, S2 e S3, para $k = 2$. Resultados de simulação com intervalo de confiança de 98%.	54
6.2	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário $S1_{ns3}$. Resultados de simulação com intervalo de confiança de 98%.	56
6.3	Grau de variabilidade (%) para as taxas de encontro definido para os cenários A1 a A10.	58
6.4	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A1.	59
6.5	Redução no atraso de entrega médio em relação a $k = 1$, para o cenário A1.	61
6.6	RMSE médio, absoluto e normalizado, para ajuste entre CCDF empírica e exponencial para as variáveis de tempo entre encontros dos cenários A1 a A10.	62
6.7	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para os cenários A1 a A10, para $k = 1$	63

6.8	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A2. Grau de variabilidade: 50%. . .	63
6.9	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A3. Grau de variabilidade: 80%. . .	64
6.10	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A4. Grau de variabilidade: 95%. . .	64
6.11	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A5. Grau de variabilidade: 98%. . .	64
6.12	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A6. Grau de variabilidade: 99%. . .	64
6.13	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A7. Grau de variabilidade: 99,7%. . .	65
6.14	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A8. Grau de variabilidade: 99,9%. . .	65
6.15	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A9. Grau de variabilidade: 99,95%. . .	65
6.16	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A10. Grau de variabilidade: 99,99%. . .	65
6.17	Coefficiente de variação, par-a-par e valor médio, das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}$, $w = 1, \dots, W$, para os cenários R1, R2 e R3. (*) Este par não se encontra.	70
6.18	Métricas de variabilidade das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}$, $w = 1, \dots, W$, para os cenários A1 a A10. A última coluna indica o valor do erro do Modelo II, relativo à simulação, para $k = 1$	73
6.19	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário B1.	75
6.20	Percentual de redução no atraso de entrega médio em relação a $k = 1$, para cenário B1.	76
6.21	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para os cenários Unical-1 a Unical-7, para $k = 1$	81
6.22	Atraso de entrega médio (s). Resultados obtidos com modelagem e simulação para o cenário Unical-1.	81
6.23	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-2.	82
6.24	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-3.	82
6.25	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-4.	82

6.26	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-5.	82
6.27	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-6.	83
6.28	Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-7.	83
6.29	Percentual de redução no atraso de entrega médio em relação a $k = 1$, para cenário Unical-1.	86
6.30	Métricas de variabilidade das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}$, $w = 1, \dots, W$, para os cenários Unical-1 a Unical-7.	87
6.31	Métricas de variabilidade das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}$, $w = 1, \dots, W$, para os cenários Infocom-1 a Infocom-4.	93
6.32	Métricas de variabilidade das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}$, $w = 1, \dots, W$, para os cenários apresentados nesta seção.	94

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, a pesquisa na área de redes sem fio móveis tem crescido rapidamente. A cada dia surgem novas demandas por protocolos e soluções para os mais diversos problemas, tanto por parte da comunidade científica quanto por parte da própria sociedade. Especial atenção tem sido dada aos trabalhos relacionados às redes desafiadoras (*challenged networks*) [2], como as redes de sensores móveis e as redes de grupamentos militares, cujas características e particularidades impõem diversos desafios à comunicação.

Em ambientes desafiadores, a comunicação entre os nós é bastante restrita devido, principalmente, à conectividade intermitente, longos atrasos, limitação de largura de banda e alta taxa de erros. Além disso, os nós que compõem esse tipo de rede geralmente possuem poucos recursos em termos de processamento e energia, o que pode restringir ainda mais sua comunicação. A questão da mobilidade dos nós é também um fator de extrema relevância nesse cenário, pois a mobilidade é uma das causas principais de desconexão, causando grande imprevisibilidade na topologia da rede.

Devido à dificuldade no estabelecimento de uma conexão entre origem e destino final, protocolos de roteamento que assumem conectividade fim-a-fim não funcionam nesse tipo de rede. Por isso, uma arquitetura de sobrecamada (*overlay*) chamada *Delay-Tolerant Networking* (DTN) [2] foi planejada para tais ambientes desafiadores. Nesta arquitetura, existe uma camada especial entre as camadas de Aplicação e Transporte que é responsável por implementar um protocolo para lidar com longos atrasos e desconexões. Os nós DTN utilizam o paradigma *store-carry-and-forward*, segundo o qual eles armazenam cópias das mensagens para um posterior encaminhamento, assim que uma nova conexão ponto-a-ponto for estabelecida [3].

O estudo na área de DTN é importante devido à necessidade de existir um tipo de arquitetura que apresente um desempenho satisfatório em ambientes onde as premissas da arquitetura de redes tradicional não podem ser garantidas.

Dentre a ampla gama de redes DTN, existe uma classe que utiliza a mobilidade

dos nós como uma vantagem ao invés de um obstáculo, as chamadas **redes oportunistas** [4]. A ideia é utilizar a mobilidade dos nós como uma forma de proporcionar oportunidades ocasionais para novos encontros. Considera-se um **encontro** quando dois nós estão dentro do alcance de transmissão um do outro e são capazes de trocar dados. Um cenário típico de rede oportunista é uma rede DTN cujos nós são dispositivos carregados por pessoas. Nesse cenário, a principal característica desafiadora é a mobilidade humana.

Os protocolos de encaminhamento oportunista são baseados nos eventos de encontros. O principal conceito por trás desses protocolos é que o comportamento da rede tem alto nível de imprevisibilidade e os nós precisam aproveitar as oportunidades de encaminhar as mensagens quando essas surgirem, de modo que cada mensagem tenha uma maior probabilidade de ser entregue ao seu destino final. A definição do que caracteriza uma oportunidade de encaminhamento pode variar bastante, dando origem aos diversos protocolos propostos na literatura. Cada protocolo define uma política de encaminhamento, com regras que devem ser satisfeitas para que um encontro seja considerado uma oportunidade. Um exemplo de regra de encaminhamento é quando um nó apenas encaminha a mensagem para um nó que possuir uma probabilidade de encontrar o destino mais alta do que um certo limiar. Em outros casos, pode não haver nenhum tipo de controle ou regra, e um simples encontro entre dois nós pode ser considerado uma oportunidade.

Ao longo dos anos, diversos protocolos oportunistas foram propostos [5, 6], como: *epidemic routing* [7], *two-hop* [8], *spray and wait* [9] e *probabilistic forwarding* [10]. Apesar da grande variedade de protocolos, um problema crítico em aberto na área de encaminhamento oportunista é a falta de um modelo matemático genérico para avaliação de desempenho e análise de protocolos.

Em geral, o método utilizado para avaliação de desempenho de protocolos de encaminhamento oportunistas é a simulação. Os resultados são obtidos com o uso de *softwares* que se propõem a reproduzir o comportamento da rede em análise. Para tal é necessário o uso de *traces* de mobilidade dos nós, com dados de posicionamento de cada nó ao longo do tempo, ou *traces* de encontros, que contêm registros de encontros entre os nós por um certo período de tempo. Para se obter resultados válidos de simulação é necessário realizar um grande número de experimentos, obtendo-se assim uma grande quantidade de amostras, dada a alta aleatoriedade trazida pela movimentação dos nós. A configuração dos cenários é outra questão delicada, pois o ideal é que seja bem detalhada de forma a caracterizar bem o ambiente. Por outro lado, simuladores mais detalhados são mais complexos de serem utilizados, reque-rendo ao usuário uma longa curva de aprendizado que por vezes dificulta a realização dos experimentos. Além disso, o usuário precisa lidar com o longo tempo requerido para a execução dos experimentos e para a consolidação dos resultados obtidos.

Um modelo matemático descreve um sistema na linguagem matemática, em termos de equações ou relações lógicas, bem definidas, que se propõe a caracterizar o sistema por meio de parâmetros e variáveis. A modelagem matemática é uma excelente ferramenta para analisar a dinâmica do sistema de forma objetiva, prover previsões e realizar avaliações quantitativas. Por esse motivo, seu desenvolvimento é importante e necessário.

No âmbito da modelagem matemática, o maior desafio é desenvolver um modelo genérico, que possa ser aplicado em uma grande variedade de cenários. O nível de generalização de um modelo está relacionado à quantidade de aproximações, simplificações e suposições que ele considera. O ideal é que um modelo seja o mais abrangente possível. Esta é uma tarefa desafiadora para o caso de redes oportunistas, especialmente devido à grande variedade de esquemas de encaminhamento, à questão da mobilidade dos nós e ao fato da dinâmica de encontros entre os pares de nós ser heterogênea.

A importância e desafios da modelagem matemática para encaminhamento oportunista são também mencionados na literatura da área, em especial em *surveys* sobre DTN ou sobre protocolos oportunistas em particular. Em [3], a modelagem analítica e a avaliação de desempenho são citadas como uma das mais importantes áreas de pesquisa para DTN, devido, principalmente, à falta de um modelo analítico genérico. Além disso, os autores mencionam a necessidade de um modelo matemático preciso e colocam tal estudo como prioritário na sua lista de problemas desafiadores essenciais. Mais recentemente, em [6], a falta de modelagem matemática para redes oportunistas é colocada no topo da lista de problemas em aberto. Os autores também chamam atenção para o fato de que, na ausência de um modelo, a avaliação de desempenho de novos protocolos fica restrita à comparação com esquemas baseados em inundação. A questão dos desafios impostos à modelagem matemática nesse cenário também é ressaltada. O *survey* [11] sobre simulação de redes oportunistas, publicado no corrente ano, também não deixa de mencionar a importância da modelagem matemática e o desafio em obter modelos analíticos.

O presente documento apresenta o desenvolvimento de dois modelos matemáticos para estimar o atraso de entrega de mensagens fim-a-fim em redes oportunistas com mobilidade heterogênea, independente da política de encaminhamento.

A motivação desta pesquisa é contribuir com soluções para vencer o desafio de desenvolver um modelo genérico para a análise de desempenho de redes móveis oportunistas com mobilidade heterogênea.

O primeiro modelo foi inspirado na modelagem proposta por Boldrini e outros autores em [1], que apresenta uma abordagem interessante no sentido de desenvolver um modelo mais genérico para o encaminhamento oportunista. A generalidade do modelo de Boldrini está no fato de considerar que a mobilidade dos nós é heterogênea

e de não impor restrição quanto à distribuição dos tempos entre encontros. Além disso, o modelo pode ser aplicado a qualquer política de encaminhamento oportunista. De acordo com a revisão da literatura realizada, esse modelo foi o primeiro a considerar heterogeneidade na taxa de encontro para todos os nós na rede em conjunto com as outras generalizações mencionadas. A desvantagem desse modelo é que o mesmo é restrito a um processo *single-copy*, no qual existe somente uma única cópia da mensagem trafegando na rede, a mensagem original gerada pela origem.

O esquema de encaminhamento *single-copy* é interessante em termos de desempenho pois evita um gasto excessivo de recursos com a geração, por vezes redundante, de cópias de cada mensagem [12]. Entretanto, seu uso deve ser criterioso pois algumas aplicações podem requerer um tempo de entrega menor, mesmo que haja um maior esforço da rede para isso. Em alguns cenários, nos quais a periodicidade de encontros entre os nós é muito baixa, um esquema *single-copy* pode não ser adequado devido ao tempo muito longo para ocorrer a entrega. Por exemplo, em redes DTN para uso militar, mensagens que contenham dados sensíveis, como informações de inteligência, correm o risco de se tornarem obsoletas se o tempo de entrega for longo demais.

A estratégia de encaminhamento *multi-copy* é capaz de reduzir o atraso de entrega na rede [13], por isso a modelagem matemática desse tipo de esquema é importante. Além disso, um modelo para esquemas *multi-copy* permite que sejam avaliados a influência do número de cópias no atraso de mensagens e o compromisso entre atraso e gasto de recursos de rede, como consumo de energia, por exemplo.

O Modelo I proposto no presente documento apresenta uma extensão do modelo *single-copy* de Boldrini, desenvolvida para o caso *multi-copy*, no qual o nó origem pode criar múltiplas cópias da mensagem original e assim reduzir o tempo do atraso na entrega da mensagem. O Modelo I também leva em consideração a heterogeneidade na dinâmica de encontros dos nós, e também pode ser aplicado a qualquer política de encaminhamento. O desenvolvimento e o processo de validação do Modelo I foram publicados em [14].

O fato de considerar múltiplas cópias da mensagem altera bastante o processo de encaminhamento e torna o sistema mais complexo para ser modelado. Consequentemente, o modelo *multi-copy* torna-se mais complexo do que o *single-copy*.

O Modelo I é baseado no cálculo do valor esperado do mínimo dentre um conjunto de variáveis aleatórias. Para lidar com a complexidade das equações, foi necessário utilizar aproximações para a solução da equação principal, o que restringe a aplicabilidade do Modelo I. Além disso, a equação final envolve uma sequência de somatórios fazendo com que o Modelo apresente alta complexidade computacional. Sendo assim, foi desenvolvido um segundo modelo, com abordagem diferente, de forma a eliminar as restrições impostas pelo Modelo I.

O Modelo II segue uma abordagem diferente do primeiro, sendo baseado em cadeias de Markov absorventes, e modela com alta precisão o valor esperado do atraso de entrega de mensagens fim-a-fim, para processos de encaminhamento oportunistas em ambos os casos *single-copy* e *multi-copy*.

A metodologia de validação dos modelos desenvolvidos é baseada na comparação de resultados analíticos com resultados de simulação. Os experimentos foram realizados por meio de três ferramentas, um simulador próprio especialmente desenvolvido para este trabalho e dois simuladores de redes, ns-3 e The ONE. O *software* BonnMotion também foi utilizado na geração de *traces* de mobilidade. Além dos *traces* sintéticos, foram analisados também *traces* reais obtidos na base de dados CRAWDAD. Os resultados obtidos mostram a alta precisão dos modelos, com destaque para o Modelo II, tanto para cenários com *traces* sintéticos quanto para cenários com *traces* reais.

O restante deste documento é organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica realizada, com destaque para os trabalhos envolvendo modelos analíticos para o processo de encaminhamento oportunista. Os Capítulos 3 e 4 apresentam o desenvolvimento detalhado dos Modelos I e II, respectivamente. A metodologia de validação da modelagem é explicada no Capítulo 5, juntamente com a apresentação das ferramentas de simulação utilizadas. A apresentação e análise dos resultados obtidos estão presentes no Capítulo 6. E, finalmente, as conclusões são apresentadas no Capítulo 7.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica da área de modelagem matemática envolvendo ambientes de redes oportunistas, com foco direcionado aos trabalhos que contêm propostas de modelos analíticos para processos de encaminhamento de mensagens, principalmente os que objetivam estimar o atraso de entrega.

De modo geral, os modelos analíticos para análise de desempenho desenvolvidos para cenários de redes oportunistas podem ser divididos em duas classes, modelos baseados em processos epidemiológicos e baseados em processos Markovianos. A primeira classe inclui majoritariamente abordagens determinísticas, geralmente baseadas em sistemas de equações diferenciais ordinárias (*Ordinary Differential Equations* - ODEs), e a segunda classe envolve modelos estocásticos. Os modelos desenvolvidos nesta tese são baseados em processos Markovianos.

Este capítulo é composto por duas seções. A Seção 2.1 apresenta os trabalhos relacionados ao tema desta tese. A Seção 2.2 apresenta um resumo do modelo que serviu de inspiração para o Modelo I, que será apresentado no Capítulo 3.

2.1 Trabalhos relacionados

Os esforços para modelar o encaminhamento oportunista começaram há mais de uma década. A maioria dos protocolos oportunistas são *epidemic-based*, baseados no roteamento epidêmico (*epidemic routing* - ER) [7], como [15–24]. Este foi um dos primeiros protocolos de encaminhamento oportunista propostos. O processo de encaminhamento de mensagens usa a técnica de inundação (*flooding*) e é modelado como o processo de propagação de uma doença infecciosa por meio do contato entre humanos. De um modo geral, quando um nó possui uma mensagem, ele é considerado infectado e pode infectar outros nós com a transmissão da mensagem.

Muitas contribuições importantes na área da modelagem de encaminhamento oportunista estão relacionadas aos modelos desenvolvidos para protocolos *epidemic-based*.

Assim como o conceito de roteamento epidêmico veio da epidemiologia, grande parte das técnicas para modelá-lo analiticamente veio da epidemiologia matemática, área que estuda a modelagem matemática para os processos de doenças infecciosas. A área da epidemiologia matemática é bastante antiga, existem registros da década de 1760 com estudos sobre a varíola [25]. Os modelos mais referenciados da área, utilizados até hoje, foram publicados na década de 1920 [26]. A literatura da área é muito rica e existem modelos consagrados que podem ser adaptados para o cenário de redes DTN.

Um dos trabalhos pioneiros em modelagem epidêmica é descrito em [15]. Esse trabalho propôs um modelo determinístico adaptado da epidemiologia matemática para avaliar um processo de propagação de mensagens incomum: um sistema de aquisição de dados biológicos usando baleias como nós. O principal parâmetro do modelo é a taxa de encontro dos pares de nós, considerada igual para todos. As taxas são estimadas via simulação, método bastante comum nos trabalhos mais antigos, especialmente anteriores ao [16], que propôs uma expressão matemática para estimar tal parâmetro. Os mesmos autores publicaram outros trabalhos posteriores seguindo essa mesma linha de modelagem, também relevantes para a área, como [27] e [28].

Usando uma abordagem com cadeias de Markov, [16] modelou o processo de propagação de mensagens em redes *ad hoc* móveis (MANET – *mobile ad hoc networks*) para os protocolos epidêmico e *two-hop*. Esse trabalho trouxe contribuições relevantes para esta área de pesquisa, incluindo uma expressão para estimar a taxa de encontros entre os pares de nós (quando esta é homogênea) e o valor esperado do atraso de entrega e do número de cópias das mensagens na rede.

Seguindo [15] e [16], [17] também se baseia em modelos epidemiológicos. Esse trabalho apresenta uma análise de métricas de desempenho, como o atraso de entrega, comparando resultados de simulação com previsões do modelo proposto, para o esquema epidêmico básico e outras cinco versões controladas.

O trabalho publicado em [13], dos autores que propuseram os esquemas de encaminhamento do tipo *spray and wait* [9], trata de esquemas *multi-copy* e apresenta algumas expressões analíticas para análise de desempenho dos seus protocolos, porém considera a homogeneidade na rede.

Com o objetivo de desenvolver um modelo mais preciso para o processo de encaminhamento epidêmico em cenários DTN, [19] propõe um modelo estocástico baseado na epidemiologia matemática e compara seus resultados com a abordagem determinística tradicional. O trabalho [29] usa a abordagem determinística para modelar o desvio padrão das previsões do modelo.

Diversos outros trabalhos que também empregam conceitos da epidemiologia têm o objetivo de considerar fatores mais realistas do cenário como tempo de vida limitado para as mensagens, restrições de energia, modelos físicos de propagação

não ideais e tempo de transmissão não desprezível, como [18, 20–24, 30, 31].

Mesmo seguindo abordagens diferentes, o que estes modelos têm em comum é que eles são específicos para um determinado protocolo e para as características particulares do cenário para o qual foram desenvolvidos. São consideradas suposições acerca de densidade de nós, padrão de mobilidade, homogeneidade da rede, e outras características do cenário. Este é um problema recorrente na modelagem matemática para encaminhamento oportunista devido à complexidade do processo e aos desafios impostos pelo cenário. As principais considerações são que a distribuição do tempo entre encontros é exponencial e que a rede é homogênea (todos os pares de nós possuem a mesma taxa de encontro). Apesar das relevantes contribuições de tais modelos, tais suposições restringem a aplicabilidade dos mesmos, especialmente a suposição de homogeneidade.

Quando a suposição de nós com padrão de mobilidade homogênea começou a ser questionada, alguns trabalhos tentaram driblar essa questão na tentativa de considerar a heterogeneidade do cenário, como [32–38]. Por exemplo, a modelagem proposta em [33] é baseada em um modelo epidemiológico que divide a população em grupos homogêneos e considera a heterogeneidade apenas entre os grupos mas não entre os nós.

A pesquisa bibliográfica em busca de um modelo mais abrangente para os protocolos *epidemic-based* chegou ao [1]. Seguindo uma estratégia diferente, os autores propõem um modelo analítico genérico *single-copy* para encaminhamento oportunista, que inspirou o presente trabalho.

A grande vantagem desse modelo é que os autores retiram duas restrições consideradas nos demais modelos. A primeira delas é com relação à homogeneidade da rede. A suposição de homogeneidade é um conceito amplo, que pode ser aplicado em vários aspectos. Neste contexto, supor que a rede é homogênea significa dizer que os nós têm mesmo padrão de mobilidade e, principalmente, que as taxas de encontro de todos os pares são iguais. Essa modelagem leva em conta a heterogeneidade na mobilidade dos nós. Isto significa poder considerar que as taxas de encontro dos pares de nós são diferentes. A segunda é que esse modelo oferece a possibilidade de trabalhar com outras distribuições para o tempo entre encontros, além da exponencial, sendo que a grande maioria dos modelos na literatura considera que o tempo entre encontros tem distribuição exponencial. Além disso, o modelo é genérico quanto à regra de encaminhamento, podendo ser aplicado a qualquer protocolo de encaminhamento oportunista, não apenas a esquemas epidêmicos.

Outros trabalhos posteriores a [1] também tentaram evitar algumas suposições e considerar características mais realistas, como [24, 39–41]. Entretanto, tais modelos recaem sobre pelo menos duas dessas três condições: o modelo não é genérico quanto à regra de encaminhamento, a única distribuição considerada para o tempo

entre encontros é a distribuição exponencial ou a rede não é considerada totalmente heterogênea.

Devido à importância do modelo proposto em [1] para o presente trabalho, o mesmo será descrito em detalhes na próxima seção.

2.2 Modelo *single-copy* de Boldrini

Esta seção apresenta o modelo *single-copy* para encaminhamento oportunista proposto por Chiara Boldrini e outros autores¹ em [1]. Algumas observações próprias foram incluídas para ressaltar detalhes importantes da metodologia da modelagem. A notação das variáveis segue a referência original.

Antes de descrever a modelagem, será descrito o processo de encaminhamento para o qual o modelo foi desenvolvido.

2.2.1 Descrição do processo de encaminhamento *single-copy*

Considere uma rede oportunista com um número de nós fixo que se movem em uma área limitada.

O termo **encontro** é definido como o evento no qual dois nós estão dentro da área de alcance de transmissão um do outro e são capazes de trocar dados, ou seja, é um evento relacionado a um par de nós. A transmissão de mensagens ocorre durante um encontro, cuja duração é considerada desprezível porém suficiente para uma transmissão com sucesso.

Cada par de nós possui sua própria **taxa de encontro**, o que caracteriza a heterogeneidade na mobilidade e no comportamento de encontros entre os nós. Além disso, a dinâmica de encontros de cada par é independente dos demais, isto é, as taxas de encontro podem ser diferentes. O **tempo entre encontros** de cada par é uma variável aleatória definida como o intervalo de tempo entre dois encontros consecutivos.

O processo de encaminhamento de uma mensagem inicia quando esta é gerada pelo nó origem e termina quando esta é entregue ao nó destino. Os processos de cada mensagem são independentes dos demais.

A mensagem original é a única cópia existente na rede [12]. Os nós intermediários atuam somente como *relays* e não criam nenhuma cópia extra. O nó destino não encaminha a mensagem adiante.

A Figura 2.1 mostra um exemplo do processo de encaminhamento de uma mensagem da origem s para o destino d , identificada como C_1 , em uma rede oportunista

¹Os outros dois autores são Marco Conti e Andrea Passarella, que também participaram da autoria de [4], referência na definição do conceito de redes oportunistas.

com um total de 6 nós. O processo tem início com a criação da mensagem pela origem na letra (a). Na letra (b), a origem encontra o nó 3 e encaminha C_1 . Na letra (c), o nó 3 encontra o nó 2 e encaminha C_1 . A entrega é mostrada na letra (d) com o encontro entre os nós 2 e d . O processo termina quando o nó 2, então, encaminha a mensagem para d .

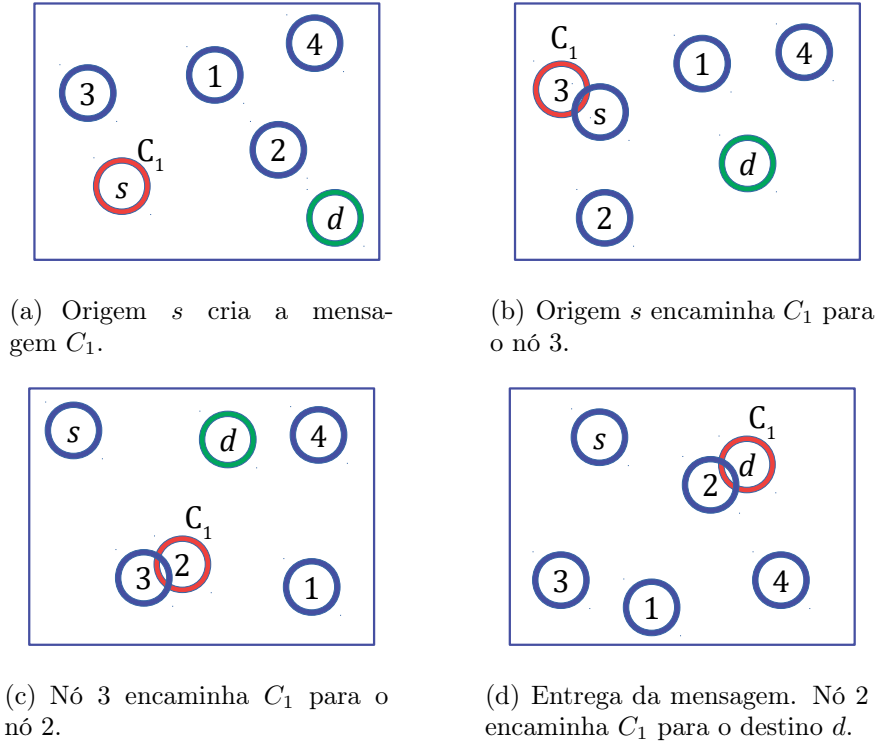


Figura 2.1: Exemplo. Processo de encaminhamento *single-copy* de uma mensagem da origem s para o destino d , identificada como C_1 .

O **atraso de entrega fim-a-fim** é o tempo entre o momento em que a origem gera a mensagem até o momento em que o destino a recebe.

O processo não é restrito a nenhuma política de encaminhamento específica, podendo ser utilizada qualquer regra para a tomada de decisão de encaminhar para determinado contato ou não. Por exemplo, se a política for a do roteamento epidêmico, a regra diz que a mensagem deve ser encaminhada para qualquer nó encontrado. Caso a política seja a do protocolo *two-hop*, a regra é diferente para o origem e para os *relays*. O nó origem pode encaminhar para um *relay*, mas o *relay* apenas para o destino, de forma que exista apenas dois saltos entre origem e destino. Independente da escolha da política de encaminhamento, existe apenas uma única cópia da mensagem.

Durante o processo, as decisões de encaminhamento são determinísticas e cada nó conhece suas taxas de encontro com os demais nós que ele encontra na rede. A referência [1] chama essa consideração de *exact knowledge assumption* ou conheci-

mento exato, em uma tradução livre.

2.2.2 Modelagem matemática

Considere uma rede oportunista com N nós e o processo de encaminhamento *single-copy* descrito anteriormente. O processo é modelado como um processo semi-Markoviano com N estados. No estado i , o nó i possui uma mensagem armazenada que deve ser entregue ao nó destino d . O que acontece em seguida depende da política de encaminhamento e dos contatos feitos pelo nó i .

Cada par de nós (i, j) se encontra de acordo com uma **taxa de encontro** $\mu_{i,j}$, e o primeiro encontro entre eles ocorre no tempo zero. O **tempo entre encontros** do par (i, j) é uma variável aleatória representada por $M_{i,j}$. Por definição, temos que $\mu_{i,j} = 1/E[M_{i,j}]$, onde $E[M_{i,j}]$ representa o valor esperado de $M_{i,j}$. As variáveis $M_{i,j}$ são consideradas independentes e identicamente distribuídas.

As taxas de encontro são consideradas fixas no tempo. Não há restrição de espaço de armazenamento (*buffer*) e cada mensagem é considerada um *bundle* [42], uma unidade de dados definida para a arquitetura DTN.

A política de encaminhamento é representada pela variável φ , e $p_{i,j}^\varphi$ é a probabilidade de que o nó i encaminhe a mensagem para o nó j durante um encontro entre eles, de acordo com φ . Como as decisões de encaminhamento são determinísticas, a probabilidade $p_{i,j}^\varphi$ será igual a 0 ou 1. Por exemplo, suponhamos que a política de encaminhamento seja a do roteamento epidêmico básico (ER), mencionada anteriormente. Nesse caso, $p_{i,j}^{ER} = 1, \forall i \neq j$ e $p_{i,i}^{ER} = 0$.

Se $p_{i,j}^\varphi > 0$, o nó j é considerado um contato (ou próximo salto) **adequado** para o nó i . Seja $R_i = \{j : p_{i,j}^\varphi > 0\}$ definido como o conjunto de todos os próximos saltos adequados para o nó i . Note que esse conjunto é fixo durante o processo de encaminhamento da mensagem.

A probabilidade de transição do processo de Markov é representada por $p_{i,j}$, que é a probabilidade do nó i encaminhar a mensagem para o nó j . Note que $\sum_{j \neq i} p_{i,j} = 1$. Para que esse evento ocorra, é preciso que j seja o próximo salto para o nó i (o nó i encontra j antes de qualquer outro nó) e que tal encaminhamento seja permitido pela política φ ($p_{i,j}^\varphi > 0$). Nesse caso, j é considerado um próximo salto adequado para o nó i . Assim, $p_{i,j}$ é melhor definida como a probabilidade de j ser o primeiro próximo salto adequado para o nó i .

A partir do instante em que o nó i recebe a mensagem, o tempo decorrido para que esta seja encaminhada ao nó j é representado pela variável aleatória $T_{i,j}$, i.e., o tempo de transição do estado i (o nó i possui a mensagem) para o estado j (o nó j possui a mensagem). O tempo no qual o processo semi-Markoviano permanece no estado i antes de fazer uma transição é representado pela variável aleatória T_i , que

é igual a $T_{i,j}$ com probabilidade $p_{i,j}, \forall j \in R_i$. As expressões gerais para $T_i, T_{i,j}$ e $p_{i,j}$ estão disponíveis em [1].

A Figura 2.2 mostra um exemplo de eventos de encontro e de encaminhamento entre os nós i e $j \in R_i$, com destaque para a diferença entre as variáveis $M_{i,j}$ e $T_{i,j}$. No exemplo, quando ocorre o 2º encontro do par (i, j) , o nó j é o primeiro nó encontrado por i após este receber a mensagem e, sendo j pertencente ao conjunto R_i , a mensagem é encaminhada. Na figura estão representados dois valores de tempo entre encontros para o par (i, j) , $m_{i,j}^1$ e $m_{i,j}^2$, que são referentes à variável $M_{i,j}$. De forma semelhante, $t_{i,j}^1$ é referente à variável $T_{i,j}$.

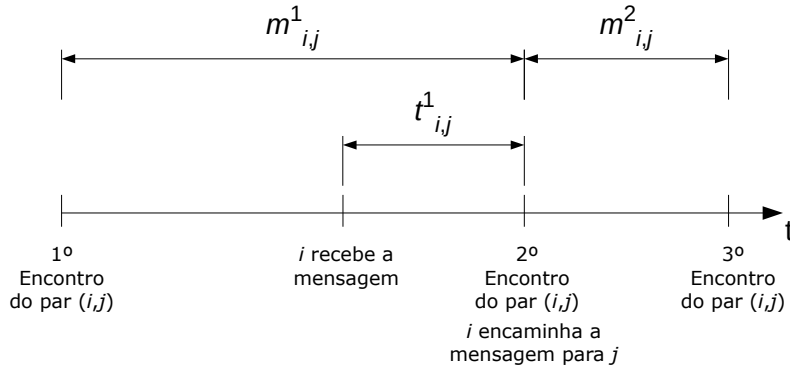


Figura 2.2: Exemplo. Eventos de encontro e de encaminhamento entre os nós i e $j \in R_i$, com destaque para a diferença entre as variáveis $M_{i,j}$ e $T_{i,j}$. $m_{i,j}^1$ e $m_{i,j}^2$ são referentes à variável $M_{i,j}$, e $t_{i,j}^1$ é referente à variável $T_{i,j}$.

Cabe observar que, para haver o encaminhamento da mensagem, é preciso haver um encontro envolvendo o nó que possui a mensagem. Logo, considerando o encaminhamento de i para j , a variável $T_{i,j}$ também pode ser interpretada como o tempo entre encontros residual do par (i, j) , tendo em vista que é o tempo para ocorrer o próximo encontro do par (i, j) , a contar do instante em que o nó i possui a mensagem.

A variável aleatória² $D_{i,d}$ é definida como o tempo que a mensagem demora para ser entregue ao nó destino d a partir do nó i , ou seja, a contar do instante em que o nó i recebe a mensagem. Após algumas manipulações, o valor esperado do atraso do nó i para o nó d , segundo o modelo *single-copy* de Boldrini, é dado por:

$$E[D_{i,d}] = E[T_i] + \sum_{j \in R_i - \{d\}} p_{i,j} E[D_{j,d}] \quad ; \forall i \neq d \quad (2.1)$$

O nó i não se trata necessariamente do nó origem, sendo apenas uma identificação para qualquer nó exceto o nó destino. Se o nó i é a origem, temos o atraso de **entrega fim-a-fim**, medido desde o instante em que a origem gera a mensagem até sua entrega final ao destino.

A Eq. (2.1) pode ser interpretada da seguinte forma. O valor esperado do atraso de entrega do nó i ao destino d tem duas parcelas. Uma parcela é referente ao tempo para a mensagem sair do nó i ($E[T_i]$) e a outra é referente ao atraso causado pelo nó $j \neq d$ para o qual i encaminha a mensagem ($E[D_{j,d}]$). A segunda parcela contém um somatório, que representa todas as possibilidades consideradas para o encaminhamento de i para j , uma vez que todos os nós j em $R_i - \{d\}$ são possíveis próximos saltos de i .

Para obter $E[D_{s,d}]$ é preciso calcular os valores de $E[D_{j,d}]$ para todo $j \in R_s - \{d\}$. Para cada nó destino d , a Eq. (2.1) trata-se de um sistema de equações lineares. Uma das maneiras de resolvê-lo é transformá-lo em um sistema de matrizes e usar o método da matriz inversa.

²Neste documento, será usada a notação $D_{i,d}$ ao invés de D_i .

Capítulo 3

Modelo I

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do Modelo I, abordagem *multi-copy* inspirada no modelo *single-copy* de Boldrini proposto em [1], apresentado no Capítulo 2, Seção 2.2.

O Modelo I foi desenvolvido para estimar o valor esperado do atraso na entrega de mensagens em redes oportunistas com taxas de encontro heterogêneas quando a origem pode criar múltiplas cópias da mensagem. A notação das variáveis segue a Tabela 3.1, adaptada de [1].

Tabela 3.1: Variáveis da modelagem com notação conforme a referência [1].

Notação	Descrição
N	número de nós na rede
$M_{i,j}$	tempo entre encontros para o par de nós (i,j)
$\mu_{i,j}$	taxa de encontro para o par de nós (i,j)
$p_{i,j}^{\varphi}$	probabilidade de o nó i encaminhar a mensagem para o nó j durante um encontro, de acordo com a política de encaminhamento φ
$p_{i,j}$	probabilidade de o nó i encaminhar a mensagem para o nó j
$T_{i,j}$	tempo para o nó i encaminhar a mensagem para o nó j
T_i	tempo para o nó i encaminhar a mensagem
R_i	conjunto de todos os próximos saltos adequados para o nó i
$D_{i,d}$	atraso de entrega do nó i para o destino d

3.1 Descrição do processo de encaminhamento *multi-copy*

Considere uma rede oportunista com um número de nós fixo que se movem em uma área limitada. Assim como no caso *single-copy*, o processo de encaminhamento de uma mensagem inicia quando esta é gerada pelo nó origem. Os nós intermediários atuam somente como *relays* e não criam nenhuma cópia extra, e o nó destino não encaminha nenhuma cópia. Os processos de cada mensagem são independentes dos demais.

No caso *single-copy*, a mensagem original é a única cópia existente na rede.

No caso *multi-copy*, o nó origem pode criar novas cópias da mensagem original e o número de cópias criadas por ele é limitado por um valor pré-definido. A mensagem original é considerada a primeira cópia. A origem cria a próxima cópia assim que encaminha a última cópia criada para um nó intermediário, *i.e.*, que não é o destino da mensagem. Após o primeiro encaminhamento de certa cópia, a origem passa a atuar como um *relay* no processo de encaminhamento dessa cópia, uma vez que a própria origem pode recebê-la em algum momento no futuro. O único evento que faz a origem parar de criar cópias antes de atingir o limite é a **entrega direta**, que ocorre quando a própria origem entrega a mensagem diretamente ao destino sem a participação de nós intermediários. Cada cópia possui um processo de encaminhamento individual e os processos são independentes uns dos outros.

A Figura 3.1 mostra um exemplo do processo de encaminhamento de uma mensagem da origem s para o destino d , no qual a origem pode criar até 2 cópias da mensagem, identificadas como C_1 e C_2 , em uma rede oportunista com um total de 6 nós. O processo tem início com a criação da mensagem pela origem na letra (a). Na letra (b), a origem encontra o nó 3 e encaminha C_1 . Como não ocorre a entrega direta, a origem cria a segunda cópia C_2 . Na letra (c), a origem encontra o nó 4 e encaminha C_2 . Na letra (d), o nó 3 encaminha C_1 para o nó 2. A entrega é mostrada na letra (e) com o encontro entre os nós 4 e d . O processo termina quando o nó 4, então, encaminha a cópia C_2 para d .

O **atraso de entrega fim-a-fim** é o tempo entre o momento em que a origem gera a mensagem original até o momento em que o destino final recebe a primeira dentre qualquer uma das cópias da mensagem.

Cabe ressaltar que, segundo este processo *multi-copy*, é possível que um nó esteja com mais de uma cópia ao mesmo tempo, uma vez que o processo de cada cópia é independente dos demais.

Como já mencionado, o termo encontro é definido como o evento no qual dois nós estão dentro da área de alcance de transmissão um do outro e são capazes de trocar dados. A transmissão de mensagens ocorre durante um encontro, cuja duração é

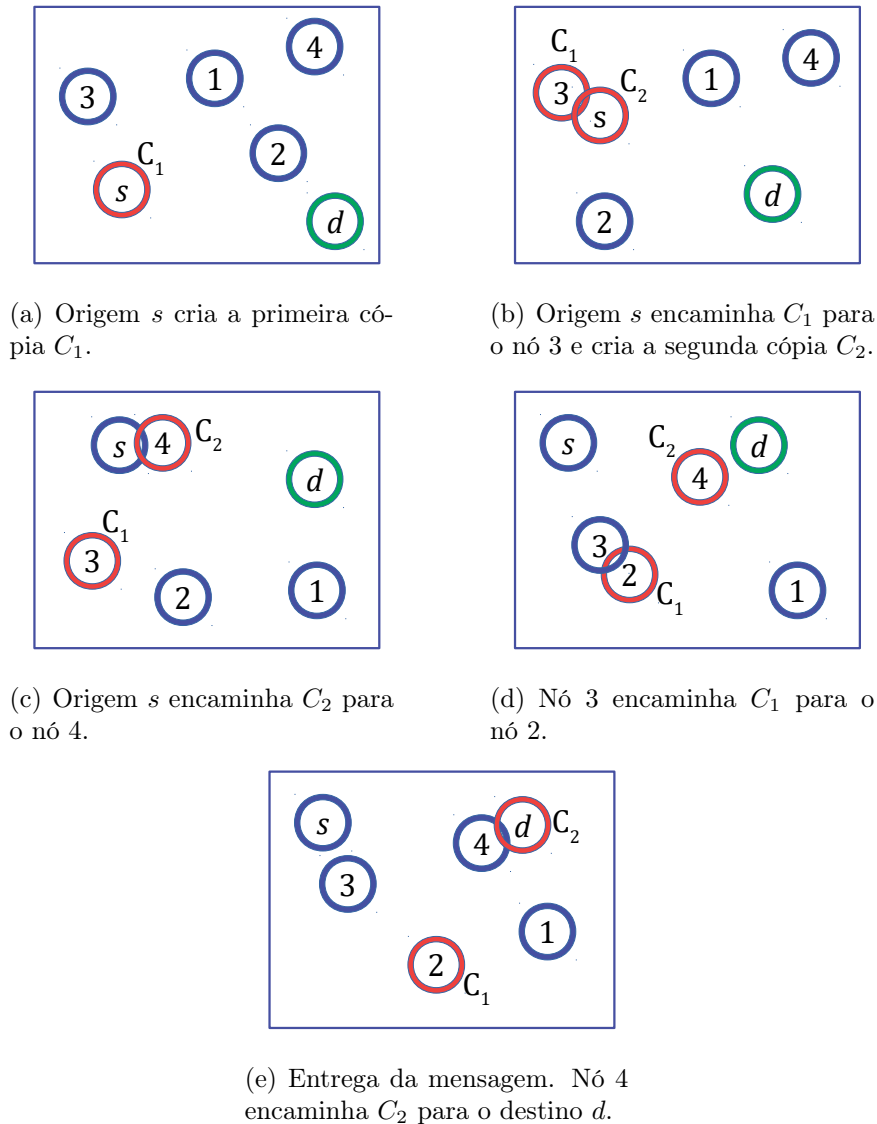


Figura 3.1: Exemplo. Processo de encaminhamento *multi-copy* de uma mensagem da origem s para o destino d , com um limite de 2 cópias, identificadas como C_1 e C_2 .

considerada desprezível porém suficiente para uma transmissão com sucesso. Cada par de nós possui sua própria taxa de encontro e a dinâmica de encontros de cada par é independente dos demais.

A consideração de conhecimento exato dos nós mencionada na descrição do processo *single-copy*, Seção 2.2.1, é mantida também neste caso. Assim como o fato de não haver restrição para a regra de decisão de encaminhamento.

Em [13], é proposto um esquema *multi-copy* semelhante a este chamado *Source Spraying*, no qual a origem cria e encaminha um certo número de cópias para o mesmo número de *relays* diferentes. Entretanto, as taxas de encontro são consideradas iguais para todos os nós, o que torna o processo de modelagem consideravelmente mais simples do que o desenvolvido neste trabalho.

3.2 Modelagem matemática

Seja uma rede oportunista com N nós e o processo de encaminhamento *multi-copy* descrito anteriormente. O objetivo deste modelo é prever o valor esperado do atraso de entrega fim-a-fim, do nó origem s ao nó destino d , considerando que a origem pode criar múltiplas cópias da mensagem até o limite máximo dado por k , onde $k > 1$, incluindo a mensagem original. O atraso de entrega fim-a-fim é representado pela variável aleatória $D_{s,d}^{(k)}$.

Seja t_0 o tempo no qual a origem gera a mensagem, que é considerada a primeira cópia. A origem cria a próxima cópia assim que encaminha a última cópia criada para um *relay*. Seja c o número de cópias criadas pela origem, incluindo a mensagem original, onde $1 \leq c \leq k$. O único evento que faz a origem parar de criar cópias antes de atingir o limite de k é a **entrega direta**, que ocorre quando a própria origem entrega a mensagem diretamente ao destino sem a participação de nós intermediários. Se a origem encontra o destino antes de criar todas as cópias, haverá menos do que k cópias na rede.

Seja C_w a identificação da w -ésima cópia ordenada pelo tempo de criação, onde $w = \{1, \dots, c\}$. A mensagem original é identificada como C_1 .

A origem faz diversos contatos ao longo do tempo. Seja $n_w \in R_s$ a identificação do nó contactado pela origem no seu w -ésimo contato adequado. Seguindo a nomenclatura da modelagem de Boldrini, um contato é adequado quando $p^\varphi > 0$. Lembrando que $R_s = \{j : p_{s,j}^\varphi > 0\}$ é o conjunto de todos os contatos adequados para o nó s . O nó n_w é o nó para o qual a origem encaminha a cópia C_w pela **primeira vez**, sendo este o primeiro encaminhamento dessa cópia.

A identificação r_w é especialmente definida para os nós *relay*, onde $r_w \in R_s - \{d\}$ para todo $w < c$.

Seja $S_c = \{r_1, \dots, r_{c-1}, n_c\}$ o conjunto que representa a sequência ordenada de nós para os quais a origem encaminha cada cópia pela primeira vez. Como c é o número de cópias criadas, os primeiros $c - 1$ nós na sequência não são o destino e por isso a identificação especial r_w é utilizada. O último nó na sequência pode ser ou não o destino, então a notação n_c é utilizada. Se $n_c \neq d$, então $S_c = \{r_1, \dots, r_c\}$. Caso contrário, $S_c = \{r_1, \dots, r_{c-1}, d\}$. Cabe ressaltar que a origem encaminha todas as c cópias independentemente do evento de entrega de cópias previamente enviadas.

O atraso de entrega fim-a-fim é o intervalo de tempo entre t_0 e o instante no qual o destino recebe alguma cópia da mensagem. Para obter o valor esperado de $D_{s,d}^{(k)}$, é preciso considerar todas as possíveis sequências S_c , para todo $c \in \{1, 2, \dots, k\}$. Cada sequência possui uma probabilidade de ocorrência e um atraso de entrega correspondente. A probabilidade de ocorrência de S_c é dada pela probabilidade de que os nós que recebem o primeiro encaminhamento de cada cópia sejam os nós na

sequência, a qual é dada por $\prod_{i \in S_c} p_{s,i}$.

Seja Ψ_{w,S_c} definida como a variável aleatória que mede o tempo que a cópia C_w leva para chegar ao destino a partir do tempo em que a origem gera a mensagem original condicionado à sequência S_c . A variável Ψ_{w,S_c} é dada por:

$$\Psi_{w,S_c} = \begin{cases} T_{s,d} , & c = 1 \\ \sum_{u=1}^w T_{s,r_u} + D_{r_w,d} , & c > 1 \text{ e } w < c \\ \sum_{u=1}^{w-1} T_{s,r_u} + T_{s,n_w} + D_{n_w,d} , & c > 1 \text{ e } w = c \end{cases} \quad (3.1)$$

Prova: t_0 é o tempo no qual a origem gera a mensagem original, que representa a primeira cópia C_1 . O tempo que a cópia C_w leva para chegar ao destino a partir de t_0 é dado pela soma do tempo decorrido até ela ser criada e o tempo para a mesma ser entregue. De modo geral, a partir do tempo em que C_w é criada, o tempo para que seja entregue é medido por $T_{s,n_w} + D_{n_w,d}$, que é o tempo até que o nó s encaminhe C_w ao nó n_w mais o atraso de n_w para d . O valor esperado de $D_{n_w,d}$ é dado pela Eq. (2.1). É preciso calcular o tempo decorrido até C_w ser criada, a partir de t_0 . Os três casos possíveis são analisados a seguir.

(i) $c = 1$: Neste caso, apenas uma cópia é criada, o que significa que $n_1 = d$. Então, o tempo que a cópia C_1 leva para chegar ao destino a partir de t_0 é simplesmente dado por $T_{s,d} + D_{d,d} = T_{s,d}$.

(ii) $c > 1$ e $w < c$: Se $c > 1$, pelo menos duas cópias foram criadas e sabe-se que todas as cópias, exceto a última, foi encaminhada para um *relay* (e não para o destino). A criação de C_w ocorre imediatamente após a origem fazer $w - 1$ contatos adequados com nós que não são o destino, no tempo medido pela soma $T_{s,r_1} + T_{s,r_2} + \dots + T_{s,r_{w-1}} = \sum_{u=1}^{w-1} T_{s,r_u}$. Então, para todo $w < c$, temos que $\Psi_{w,S_c} = \sum_{u=1}^{w-1} T_{s,r_u} + T_{s,r_w} + D_{r_w,d} = \sum_{u=1}^w T_{s,r_u} + D_{r_w,d}$.

(iii) $c > 1$ e $w = c$: A última cópia C_c pode ser ou não encaminhada diretamente para o destino, por isso a notação n_w é utilizada. Finalmente, temos que $\Psi_w = \sum_{u=1}^{w-1} T_{s,r_u} + T_{s,n_w} + D_{n_w,d}$.

Considerando a sequência S_c e o total de c cópias, o atraso de entrega fim-a-fim é dado pelo mínimo atraso das cópias C_1, \dots, C_c , que é dado por $\min\{\Psi_{1,S_c}, \dots, \Psi_{c,S_c}\}$, onde \min retorna o elemento mínimo do conjunto. Cada termo Ψ_{w,S_c} depende dos nós para os quais a origem encaminha cada cópia pela primeira vez. Esses nós têm uma grande influência no atraso de entrega final $D_{s,d}^{(k)}$.

A Tabela 3.2 mostra todos os casos possíveis para o atraso de entrega da origem s ao destino d , de acordo com a sequência correspondente S_c , com respectivas

probabilidades de ocorrência. O caso onde $c = k$ possui duas sequências possíveis pois n_k pode ou não ser o destino.

Tabela 3.2: Todos os casos possíveis para o atraso de entrega da origem s ao destino d de acordo com a sequência correspondente S_c , com respectivas probabilidades de ocorrência.

c	S_c	Probabilidade	Atraso de entrega
1	d	$p_{s,d}$	$T_{s,d}$
2	r_1, d	$p_{s,r_1}p_{s,d}$	$\min\{\Psi_{1,S_2}, \Psi_{2,S_2}\}$
3	r_1, r_2, d	$p_{s,r_1}p_{s,r_2}p_{s,d}$	$\min\{\Psi_{1,S_3}, \Psi_{2,S_3}, \Psi_{3,S_3}\}$
...
$k-1$	r_1, \dots, r_{k-2}, d	$\prod_{j=1}^{k-2} p_{s,r_j}p_{s,d}$	$\min\{\Psi_{1,S_{k-1}}, \dots, \Psi_{k-1,S_{k-1}}\}$
k	r_1, \dots, r_{k-1}, d	$\prod_{j=1}^{k-1} p_{s,r_j}p_{s,d}$	$\min\{\Psi_{1,S_k}, \dots, \Psi_{k,S_k}\} \Big _{n_k=d}$
	r_1, \dots, r_k	$\prod_{j=1}^k p_{s,r_j}$	$\min\{\Psi_{1,S_k}, \dots, \Psi_{k,S_k}\} \Big _{n_k \neq d}$

O valor esperado do atraso de entrega $E[D_{s,d}^{(k)}]$ é obtido computando-se todos os casos mostrados na Tabela 3.2, considerando todas as possibilidades para r_1, r_2, \dots, r_k . Assim, $E[D_{s,d}^{(k)}]$ é dado por:

$$\begin{aligned}
E[D_{s,d}^{(k)}] &= E[T_{s,d}] p_{s,d} + \sum_{r_1} E[\min\{\Psi_{1,S_2}, \Psi_{2,S_2}\}] p_{s,r_1} p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \sum_{r_2} E[\min\{\Psi_{1,S_3}, \Psi_{2,S_3}, \Psi_{3,S_3}\}] p_{s,r_1} p_{s,r_2} p_{s,d} + \dots + \\
&\quad \sum_{r_1} \dots \sum_{r_{k-2}} E[\min\{\Psi_{1,S_{k-1}}, \dots, \Psi_{k-1,S_{k-1}}\}] \prod_{j=1}^{k-2} p_{s,r_j} p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \dots \sum_{r_{k-1}} E[\min\{\Psi_{1,S_k}, \dots, \Psi_{k,S_k}\} \Big|_{n_k=d}] \prod_{j=1}^{k-1} p_{s,r_j} p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \dots \sum_{r_k} E[\min\{\Psi_{1,S_k}, \dots, \Psi_{k,S_k}\} \Big|_{n_k \neq d}] \prod_{j=1}^k p_{s,r_j}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

De modo a simplificar a escrita das equações daqui em diante, sejam os conjuntos A_q e B_c definidos como $A_q = \{\sum_{u=1}^j T_{s,r_u} + D_{r_j,d} : j = 1, \dots, q\}$ e $B_c = \{\sum_{u=1}^{c-1} T_{s,r_u} + T_{s,d}\}$, respectivamente. O conjunto A_q contém q elementos e engloba os termos Ψ_{j,S_c} quando todo $n_j \neq d$. O conjunto B_c contém um único elemento, o termo Ψ_{c,S_c} quando $n_c = d$.

A equação anterior pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
E[D_{s,d}^{(k)}] &= E[T_{s,d}] p_{s,d} + \sum_{r_1} E[\min\{A_1 \cup B_2\}] p_{s,r_1} p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \sum_{r_2} E[\min\{A_2 \cup B_3\}] p_{s,r_1} p_{s,r_2} p_{s,d} + \dots + \\
&\quad \sum_{r_1} \dots \sum_{r_{k-2}} E[\min\{A_{k-2} \cup B_{k-1}\}] \prod_{j=1}^{k-2} p_{s,r_j} p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \dots \sum_{r_{k-1}} E[\min\{A_{k-1} \cup B_k\}] \prod_{j=1}^{k-1} p_{s,r_j} p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \dots \sum_{r_k} E[\min\{A_k\}] \prod_{j=1}^k p_{s,r_j}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Finalmente, o valor esperado do atraso de entrega de s para d , para $k > 1$, é dado por:

$$E[D_{s,d}^{(k)}] = E[T_{s,d}] p_{s,d} + \sum_{q=1}^{k-1} F(q) + G(k), \tag{3.4}$$

onde $F(q)$ e $G(k)$ são dados pelas equações (3.5) e (3.6), respectivamente.

A função $F(q)$ é uma sequência de q somatórios, definida como:

$$F(q) = \sum_{r_1} \dots \sum_{r_q} E[\min\{A_q \cup B_{q+1}\}] \prod_{j=1}^q p_{s,r_j} p_{s,d} \tag{3.5}$$

A função $G(k)$ é uma sequência de k somatórios, definida como:

$$G(k) = \sum_{r_1} \dots \sum_{r_k} E[\min\{A_k\}] \prod_{j=1}^k p_{s,r_j} \tag{3.6}$$

Observando com atenção as equações, é possível inferir alguns aspectos envolvidos nesse processo. Os nós intermediários para os quais a origem encaminha as cópias pela primeira vez têm total influência no atraso de entrega final, uma vez que o caminho salto a salto de cada cópia depende deste primeiro contato. Além disso, o próprio atraso desses nós ao destino impacta o resultado. O processo de encaminhamento de cada cópia individual segue o esquema *single-copy*, já que estes são independentes uns dos outros e apenas a origem tem a permissão de copiar a mensagem original.

Se a origem encaminha uma cópia a um *relay* que possui valores baixos de taxas de encontro com os demais nós na rede, o atraso ponto-a-ponto a partir deste *relay* será alto, impactando o atraso fim-a-fim. Este é um dos motivos da importância da modelagem *multi-copy*, porque com o aumento do número de cópias independentes,

é possível ampliar as possibilidades de caminhos da origem ao destino, e permitir que a mensagem siga um caminho mais rápido até a entrega.

O desenvolvimento e o processo de validação do Modelo I foram publicados em [14].

A Tabela 3.3 apresenta um resumo das novas variáveis introduzidas nesta modelagem.

Tabela 3.3: Variáveis complementares.

Notação	Descrição
k	máximo número de cópias que a origem pode criar, incluindo a mensagem original; $k > 1$
c	número de cópias criadas pela origem, incluindo a mensagem original; $1 \leq c \leq k$
C_w	identificação da cópia w , onde $w = \{1, 2, \dots, c\}$
n_w	nó para o qual a origem s encaminha C_w pela primeira vez; $n_w \in R_s$, onde $w = \{1, 2, \dots, c\}$
r_w	identificação especial para <i>relay</i> para todo $w < c$; $r_w \in R_s - \{d\}$
Ψ_{w,S_c}	tempo de entrega de C_w , a partir da criação da mensagem original, condicionado à sequência S_c onde $w = \{1, 2, \dots, c\}$
$D_{s,d}^{(k)}$	atraso de entrega da origem s para o destino d para $k > 1$

A Tabela 3.4 apresenta o *framework* completo desta linha de modelagem, para ambos os casos *single-copy*, segundo o modelo de Boldrini apresentado na Seção 2.2, e *multi-copy*, desenvolvido neste trabalho.

3.3 Caso *two-copy*

De forma a prover um entendimento completo do Modelo I, será descrito a seguir o processo de modelagem detalhado para o caso *two-copy*, ou seja, quando $k = 2$.

Em $t = t_0$, a origem s gera uma mensagem para o destino d . Se d é o primeiro próximo salto adequado para s , a origem encaminha a primeira cópia C_1 ao destino. A probabilidade deste evento é $p_{s,d}$. Neste caso, $c = 1$ e temos uma entrega direta. Então, o atraso de entrega é simplesmente dado por $T_{s,d}$. Logo, o atraso $D_{s,d}^{(2)}$ tem uma probabilidade de $p_{s,d}$ de ser igual a $T_{s,d}$.

Caso contrário, a origem encaminha C_1 para o *relay* r_1 e cria a segunda cópia C_2 . Neste caso, $c = 2$. Como $k = 2$, nenhuma outra cópia será criada. A origem aguarda pelo próximo contato adequado. O tempo para isso acontecer é medido por T_{s,n_2} . Então, a origem encaminha C_2 para n_2 , que pode ou não ser o destino. Assim, temos a sequência $S_2 = \{r_1, n_2\}$.

Tabela 3.4: Valor esperado do atraso de entrega – *Single-copy* e *Multi-copy*.

<i>Single-copy</i>	
$\left\{ \right.$	$E[D_{s,d}] = E[T_s] + \sum_{j \in R_s - \{d\}} p_{s,j} E[D_{j,d}]$
	$E[D_{d,d}] = 0$
<i>Multi-copy</i>	
$\left\{ \right.$	$E[D_{s,d}^{(k)}] = E[T_{s,d}] p_{s,d} + \sum_{q=1}^{k-1} F(q) + G(k)$
	$E[D_{d,d}^{(k)}] = 0$
	$F(q) = \sum_{r_1} \dots \sum_{r_q} E[\min\{A_q \cup B_{q+1}\}] \prod_{j=1}^q p_{s,r_j} p_{s,d}$
	$G(k) = \sum_{r_1} \dots \sum_{r_k} E[\min\{A_k\}] \prod_{j=1}^k p_{s,r_j}$
	$A_q = \left\{ \sum_{u=1}^j T_{s,r_u} + D_{r_j,d} : j = 1, \dots, q \right\}$
	$B_{q+1} = \left\{ \sum_{u=1}^q T_{s,r_u} + T_{s,d} \right\}$

Se C_1 chega ao destino antes de C_2 , então o atraso de entrega é igual ao tempo para entregar C_1 a partir de t_0 , que é dado por $\Psi_{1,S_2} = T_{s,r_1} + D_{r_1,d}$, como mostra a Eq. (3.1). Caso contrário, se C_2 é a primeira cópia entregue, então o atraso de entrega é igual ao tempo para entregar C_2 a partir de t_0 , que é dado por $\Psi_{2,S_2} = T_{s,r_1} + T_{s,n_2} + D_{n_2,d}$, também mostrado na Eq. (3.1).

Desta forma, o atraso de entrega $D_{s,d}^{(2)}$ é dado por $T_{s,d}$ com probabilidade $p_{s,d}$, ou, pelo mínimo entre os atrasos das cópias C_1 e C_2 , que é dado por $\min\{\Psi_{1,S_2}, \Psi_{2,S_2}\} = T_{s,r_1} + \min\{D_{r_1,d}, T_{s,n_2} + D_{n_2,d}\}$, com probabilidade $p_{s,r_1} p_{s,n_2}$. Os casos possíveis para $k = 2$ estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Todos os casos possíveis para o atraso de entrega para $k = 2$ da origem s para o destino d de acordo com a sequência correspondente S_c , com respectiva probabilidade de ocorrência.

c	S_c	Probabilidade	Atraso de entrega
1	d	$p_{s,d}$	$T_{s,d}$
2	r_1, d	$p_{s,r_1} p_{s,d}$	$T_{s,r_1} + \min\{D_{r_1,d}, T_{s,d}\}$
	r_1, r_2	$p_{s,r_1} p_{s,r_2}$	$T_{s,r_1} + \min\{D_{r_1,d}, T_{s,r_2} + D_{r_2,d}\}$

A partir da Tabela 3.5, temos que:

$$\begin{aligned}
E[D_{s,d}^{(2)}] &= E[T_{s,d}]p_{s,d} + \sum_{r_1} E[T_{s,r_1} + \min\{D_{r_1,d}, T_{s,d}\}]p_{s,r_1}p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \sum_{r_2} E[T_{s,r_1} + \min\{D_{r_1,d}, T_{s,r_2} + D_{r_2,d}\}]p_{s,r_1}p_{s,r_2} \\
&= E[T_{s,d}]p_{s,d} + \sum_{r_1} E[T_{s,r_1}]p_{s,r_1}p_{s,d} + \sum_{r_1} \sum_{r_2} E[T_{s,r_1}]p_{s,r_1}p_{s,r_2} + \\
&\quad \sum_{r_1} E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,d}\}]p_{s,r_1}p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \sum_{r_2} E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,r_2} + D_{r_2,d}\}]p_{s,r_1}p_{s,r_2}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

A equação anterior pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}
E[D_{s,d}^{(2)}] &= E[T_{s,d}]p_{s,d} + \left(p_{s,d} + \sum_{r_2} p_{s,r_2} \right) \sum_{r_1} E[T_{s,r_1}]p_{s,r_1} + \\
&\quad \sum_{r_1} E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,d}\}]p_{s,r_1}p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \sum_{r_2} E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,r_2} + D_{r_2,d}\}]p_{s,r_1}p_{s,r_2}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Como R_s é o conjunto de todos os possíveis próximos saltos adequados para o nó s e $r_2 \in R_s - \{d\}$, temos que $p_{s,d} + \sum_{r_2} p_{s,r_2} = \sum_{n_2} p_{s,n_2} = 1$. Logo:

$$\begin{aligned}
E[D_{s,d}^{(2)}] &= E[T_{s,d}]p_{s,d} + \sum_{r_1} E[T_{s,r_1}]p_{s,r_1} + \sum_{r_1} E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,d}\}]p_{s,r_1}p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \sum_{r_2} E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,r_2} + D_{r_2,d}\}]p_{s,r_1}p_{s,r_2}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

A soma $E[T_{s,d}]p_{s,d} + \sum_{r_1} E[T_{s,r_1}]p_{s,r_1}$ pode ser reescrita como $\sum_{n_1} E[T_{s,n_1}]p_{s,n_1}$, que é igual a $E[T_s]$ por definição.

Sendo assim, temos que o valor esperado do atraso de entrega de s para d , para $k = 2$, é dado por:

$$\begin{aligned}
E[D_{s,d}^{(2)}] &= E[T_s] + \sum_{r_1} E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,d}\}]p_{s,r_1}p_{s,d} + \\
&\quad \sum_{r_1} \sum_{r_2} E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,r_2} + D_{r_2,d}\}]p_{s,r_1}p_{s,r_2}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

3.4 Exemplo

Para ilustrar a dinâmica do processo, considere um exemplo de uma rede com 5 nós, identificados como s (nó origem), d (nó destino), 1, 2 e 3. Considere que $R_s = \{1, 2, 3, d\}$ e que $k = 2$. A Figura 3.2 mostra todos os casos possíveis para os contatos feitos pelo nó origem no primeiro encaminhamento das cópias C_1 e C_2 de uma mensagem destinada a d .

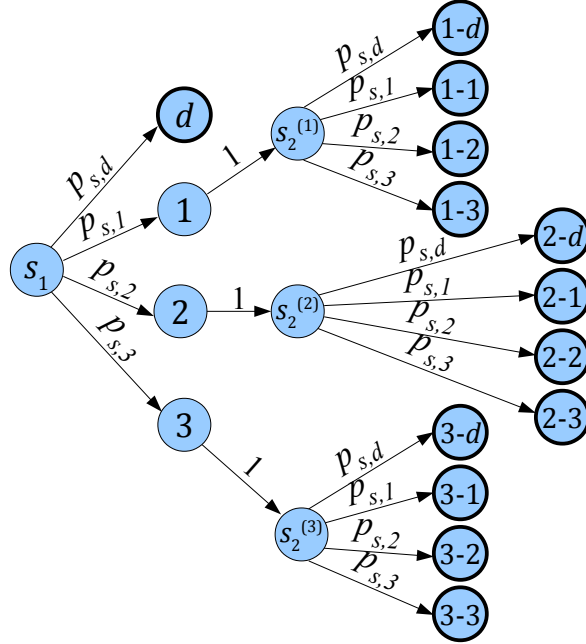


Figura 3.2: Exemplo de um esquema *two-copy*. Ilustração de todos os casos possíveis de contatos do nó origem s no primeiro encaminhamento das cópias C_1 e C_2 de uma mensagem destinada a d . Rede com 5 nós: s , d , 1, 2 e 3. $R_s = \{1, 2, 3, d\}$. Os estados com a borda em negrito representam todas as possíveis sequências S_c onde $c = \{1, 2\}$.

O processo começa no estado s_1 , quando a origem gera a mensagem original. A origem pode encaminhar C_1 para qualquer nó em R_s , logo existem quatro possibilidades para o próximo estado: d , 1, 2 ou 3. Com probabilidade $p_{s,d}$, ocorre uma entrega direta representada pelo estado d . Caso contrário, C_1 é encaminhada a um *relay*, e o processo chega no estado 1, 2 ou 3. Uma vez em um desses estados, a segunda cópia é criada por s com probabilidade 1. O estado $s_2^{(r_1)}$ representa a criação da cópia C_2 após a origem encaminhar C_1 ao *relay* r_1 , com $r_1 = 1, 2$ ou 3. Mais uma vez, s pode encaminhar C_2 para qualquer nó em R_s . Após a origem encaminhar C_2 para n_2 (n_2 pode ser d , 1, 2 ou 3), o processo chega no estado r_1-n_2 , por exemplo, $1-d$.

Os estados com a borda em negrito (d , $1-d$, $1-1$, etc) são *estados finais*, uma vez que todas as cópias criadas foram encaminhadas pela origem. Cada estado final

representa uma possível sequência S_c , com um atraso de entrega correspondente, onde $c = \{1, 2\}$. Por exemplo, o estado final 1- d representa a sequência $S_2 = \{1, d\}$, que significa que o primeiro encaminhamento das cópias C_1 e C_2 foi para o nó 1 e nó d , respectivamente. Outro exemplo é o estado final 1-1 que representa a sequência $S_2 = \{1, 1\}$, que significa que a origem encaminhou ambas as cópias para o nó 1. Como os processos de cada cópia são independentes, isto pode acontecer se o nó 1 for o primeiro e o segundo contato adequado para o nó s , isto é, se o nó s encontra o nó 1 novamente antes de encontrar qualquer outro nó.

Todos os casos possíveis para o atraso de entrega para esse exemplo são mostrados na Tabela 3.6, com as respectivas probabilidades.

Tabela 3.6: Todos os casos possíveis para o atraso de entrega para $k = 2$ da origem s para o destino d de acordo com a sequência correspondente S_c , com respectivas probabilidades de ocorrência, para o exemplo descrito pela Figura 3.2.

c	S_c	Probabilidade	Atraso de entrega
1	d	$p_{s,d}$	$T_{s,d}$
2	1- d	$p_{s,1}p_{s,d}$	$T_{s,1} + \min\{D_{1,d}, T_{s,d}\}$
	1-1	$p_{s,1}^2$	$T_{s,1} + \min\{D_{1,d}, T_{s,1} + D_{1,d}\}$
	1-2	$p_{s,1}p_{s,2}$	$T_{s,1} + \min\{D_{1,d}, T_{s,2} + D_{2,d}\}$
	1-3	$p_{s,1}p_{s,3}$	$T_{s,1} + \min\{D_{1,d}, T_{s,3} + D_{3,d}\}$
	2- d	$p_{s,2}p_{s,d}$	$T_{s,2} + \min\{D_{2,d}, T_{s,d}\}$
	2-1	$p_{s,2}p_{s,1}$	$T_{s,2} + \min\{D_{2,d}, T_{s,1} + D_{1,d}\}$
	2-2	$p_{s,2}^2$	$T_{s,2} + \min\{D_{2,d}, T_{s,2} + D_{2,d}\}$
	2-3	$p_{s,2}p_{s,3}$	$T_{s,2} + \min\{D_{2,d}, T_{s,3} + D_{3,d}\}$
	3- d	$p_{s,3}p_{s,d}$	$T_{s,3} + \min\{D_{3,d}, T_{s,d}\}$
	3-1	$p_{s,3}p_{s,1}$	$T_{s,3} + \min\{D_{3,d}, T_{s,1} + D_{1,d}\}$
	3-2	$p_{s,3}p_{s,2}$	$T_{s,3} + \min\{D_{3,d}, T_{s,2} + D_{2,d}\}$
	3-3	$p_{s,3}^2$	$T_{s,3} + \min\{D_{3,d}, T_{s,3} + D_{3,d}\}$

3.5 Tempo entre encontros com distribuição exponencial

Para resolver a equação principal do modelo, Eq. (3.4), é necessário resolver as equações Eq. (3.5) e Eq. (3.6). O primeiro passo é obter o valor esperado das variáveis aleatórias $\min\{A_q \cup B_{q+1}\}$ e $\min\{A_k\}$. Esta é uma tarefa não trivial, tendo em vista que, para $i \neq d$, a distribuição da variável $D_{i,d}$ é desconhecida, *a priori*.

Para o caso em que a distribuição do tempo entre encontros é exponencial, é possível aproximar a distribuição da variável $D_{i,d}$, $\forall i \in R_s$, para uma distribuição exponencial. Os resultados empíricos que levaram a esta conclusão são apresentados

no Apêndice A. Esta consideração facilita a manipulação das equações para obter a solução do modelo.

A seguir, é apresentada a solução do caso *two-copy* utilizando esta consideração.

3.5.1 Solução do caso *two-copy*

Em primeiro lugar, vamos reescrever a Eq. (3.10) unindo os dois somatórios em um, como mostrado na Eq. (3.11).

$$E[D_{s,d}^{(2)}] = E[T_s] + \sum_{r_1} \sum_{n_2} E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,n_2} + D_{n_2,d}\}] p_{s,r_1} p_{s,n_2} \quad (3.11)$$

Nesse caso, é preciso obter o termo $E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,n_2} + D_{n_2,d}\}]$.

Quando a distribuição do tempo entre encontros é exponencial, temos que T_{s,n_2} também possui uma distribuição exponencial [1]. Considerando que $D_{r_1,d}$ e $D_{n_2,d}$ também têm distribuição exponencial, o valor de $E[\min\{D_{r_1,d}, T_{s,n_2} + D_{n_2,d}\}]$ é dado por:

$$\frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1 (\lambda_3 - \lambda_2)} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_1} + \frac{1}{\lambda_3 + \lambda_1} \right), \quad (3.12)$$

onde $\lambda_1 = 1/E[D_{r_1,d}]$, $\lambda_2 = 1/E[T_{s,n_2}]$ e $\lambda_3 = 1/E[D_{n_2,d}]$. A prova completa desta equação está apresentada no Apêndice B.

Substituindo a Eq. (3.12) na Eq. (3.11), obtemos uma expressão para o valor esperado do atraso de entrega no caso *two-copy* em função dos parâmetros das distribuições das variáveis $D_{r_1,d}$, T_{s,n_2} e $D_{n_2,d}$, dada por:

$$E[D_{s,d}^{(2)}] = E[T_s] + \sum_{r_1} \sum_{n_2} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1 (\lambda_3 - \lambda_2)} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_1} + \frac{1}{\lambda_3 + \lambda_1} \right) p_{s,r_1} p_{s,n_2} \quad (3.13)$$

Capítulo 4

Modelo II

Este capítulo apresenta o Modelo II, segundo modelo matemático proposto neste trabalho. O objetivo deste modelo é o mesmo do Modelo I, modelar o processo de encaminhamento oportunista em redes com mobilidade heterogênea entre os nós. O Modelo II pode ser aplicado em ambos os casos *single-copy* e *multi-copy*.

O desenvolvimento deste modelo foi motivado por dois fatores. O primeiro foi a aproximação utilizada no Modelo I, descrita na Seção 3.5, que considera que, para o caso em que os tempos entre encontros têm distribuição exponencial, a distribuição do atraso de entrega de uma cópia individual pode ser aproximada para uma distribuição também exponencial. Apesar de esta consideração ser válida e a predição do modelo apresentar um bom resultado, uma parcela do erro do modelo é devido à ela. A título de exemplo, para o cenário S1, que será descrito na Seção 5.2 do Capítulo 5, o Modelo I apresentou um erro relativo de 1,14%, enquanto que o Modelo II apresenta um ajuste bem mais exato, com erro de apenas 0,11%, para $k = 2$. A mesma comparação foi feita para outros cenários analisados neste trabalho, e foram obtidas diferenças ainda maiores de ajuste entre os dois modelos, com larga vantagem para o Modelo II.

A segunda motivação foi obter um modelo com menor tempo de execução computacional. A complexidade computacional do Modelo I é da ordem de $O(n^k)$, onde n é o número de nós na rede e k é o limite definido para o número de cópias. Essa alta complexidade inviabiliza a solução das equações dependendo do valor de n e k devido ao longo tempo de execução da série de *loops* que implementam a sequência de somatórios presente nas Eq. (3.5) e (3.6).

O Modelo II utiliza uma abordagem diferente do Modelo I. O processo de encaminhamento de mensagens é modelado como uma cadeia de Markov absorvente [43]. O evento de **entrega** de uma mensagem na rede é modelado como um evento de **absorção** na cadeia.

De acordo com a teoria de cadeias de Markov absorventes, será apresentado a seguir o embasamento matemático do modelo.

4.1 Cadeia de Markov absorvente

Os estados de uma cadeia de Markov absorvente são divididos em **absorventes** e **transientes**. Um estado é absorvente se a probabilidade de permanecer nesse estado é 1. A cadeia é considerada absorvente se possuir pelo menos um estado absorvente, e se for possível alcançar um estado absorvente a partir de todos os estados transientes. Um evento de **absorção** ocorre quando o processo atinge algum estado absorvente.

Seja uma cadeia com a estados absorventes e b estados transientes. A forma canônica da matriz de transição \mathbf{P} é dada por:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{R} \\ 0 & \mathbf{I}_a \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

onde \mathbf{Q} é uma matriz $b \times b$, \mathbf{R} é uma matriz $b \times a$, 0 é a matriz zero $b \times a$, e \mathbf{I}_a é a matriz identidade $a \times a$.

Cada linha/coluna na matriz \mathbf{P} corresponde a um estado da cadeia. Na posição (u, v) de \mathbf{P} encontra-se a probabilidade de transição do estado E_u para o estado E_v . Note que os estados transientes vêm primeiro.

A matriz \mathbf{Q} é formada pelas linhas e colunas correspondentes apenas aos estados transientes, ou seja, contém as probabilidades de transição entre os estados transientes.

A matriz \mathbf{R} contém as probabilidades de transição dos estados transientes para os absorventes.

A matriz zero e a matriz identidade que completam a matriz \mathbf{P} mostram as probabilidades dos estados absorventes para os estados transientes e entre estados absorventes, respectivamente. A probabilidade de transição de um estado absorvente para qualquer outro é zero e a probabilidade de permanecer nele mesmo é 1, conforme já mencionado.

Toda cadeia de Markov absorvente está associada a uma **matriz fundamental** \mathbf{N} , que é uma matriz $b \times b$. Na posição (u, v) de \mathbf{N} encontra-se o valor esperado do número de vezes que o processo passa pelo estado transiente E_v dado que começou no estado transiente E_u , até que ocorra um evento de absorção, isto é, até que o processo alcance um estado absorvente. A matriz \mathbf{N} é obtida a partir da seguinte expressão:

$$\mathbf{N} = (\mathbf{I}_b - \mathbf{Q})^{-1}, \quad (4.2)$$

onde \mathbf{I}_b é a matriz identidade $b \times b$.

4.2 Modelagem do processo de encaminhamento

Considere uma rede oportunista com n nós e os processos de encaminhamento *single-copy* e *multi-copy* descritos nas Seções 2.2.1 e 3.1, respectivamente. Todos os nós que compõem a rede podem enviar e receber mensagens, não sendo considerados nós que não encontram nenhum outro nó durante o processo.

Seja $C_{s,d}^k$ a cadeia que modela o processo de encaminhamento das cópias de uma mensagem da origem s para o destino d quando o limite máximo para o número de cópias é k . Para cada par de nós origem-destino, existe uma cadeia de Markov absorvente que modela o processo referente a tal par. O caso *single-copy* é um caso particular do caso geral *multi-copy* para $k = 1$.

Modelando a ocorrência de um evento de entrega como a ocorrência de um evento de absorção, o objetivo é obter o tempo esperado para atingir um estado absorvente, a partir de um dado estado inicial.

O atraso de entrega esperado é dado pelo somatório do tempo esperado que o processo leva para sair de cada estado transiente, a partir do estado inicial até a absorção. Para obter o atraso de entrega esperado é preciso definir a cadeia, seus estados e probabilidades de transição, e o tempo esperado para sair de cada estado.

4.2.1 Espaço de estados da cadeia

Seja $N = \{1, \dots, n\}$ o conjunto de índices dos nós da rede. O **estado** da cadeia é uma tupla de k elementos. Cada estado contém os índices dos nós que possuem uma cópia. Um estado é absorvente se pelo menos um elemento é igual a d , já que basta que uma cópia seja entregue para que ocorra a entrega da mensagem.

O objetivo da cadeia é representar todos os caminhos possíveis que cada cópia pode percorrer desde sua criação até sua entrega ao destino. Cada **transição** na cadeia representa um **encontro efetivo** entre um par de nós. Um encontro efetivo é definido como um encontro no qual é possível haver encaminhamento de mensagens, se houverem, de acordo com a política de encaminhamento escolhida. Essa diferenciação é importante porque algumas políticas definem regras de encaminhamento segundo as quais nem todo encontro representa uma oportunidade de encaminhamento, como discutido no Capítulo 1.

Como as cópias são criadas ao longo do processo, existem estados em que o número de cópias existentes na rede é menor do que k . Nesse caso, a tupla é preenchida com zeros e a criação de mais uma cópia faz com que um dos elementos zero no estado anterior seja trocado por s (origem) no estado subsequente. Por exemplo, considere $n = 10$ e $k = 3$, o estado $\{0, 1, 2\}$ significa que duas das três cópias já foram criadas, e elas estão armazenadas nos nós 1 e 2. Uma vez que a origem crie a terceira cópia, o elemento zero no estado anterior será substituído por s

no estado subsequente. Note que o estado $\{0, 1, 2\}$ representa os dois casos, quando o nó 1 está com a primeira cópia e o nó 2 com a segunda, e vice-versa, isto é, a ordem dos índices não importa. Por preferência, o estado é escrito com os índices ordenados, começando pelos zeros, quando houverem.

O processo de encaminhamento começa quando a origem gera a primeira cópia da mensagem. Logo, a cadeia possui apenas um único estado inicial, no qual um elemento é s e os outros $k - 1$ elementos são zero.

Caso *single-copy*

O caso *single-copy* é um caso particular, onde cada estado possui apenas um elemento e existe um estado para cada nó, indicando todas as possibilidades para a localização da única cópia da mensagem. O espaço de estados referente à cadeia $C_{s,d}^1$ depende apenas do número de nós na rede e é definido como $\{i : \forall i \in N\}$ e o estado inicial é $\{s\}$. Existe apenas um estado absorvente, representado por $\{d\}$.

Este caso possui uma característica que simplifica o cálculo. Todos os pares origem-destino com o mesmo destino estão associados à mesma cadeia. Isso significa que as cadeias $C_{i,d}^1$ são iguais para todo $i \in N - \{d\}$. A Seção 4.4.1 apresenta um exemplo numérico para o caso *single-copy*.

A seguir, vamos definir o espaço de estados no caso geral *multi-copy*.

Caso *multi-copy*

Seja E um estado transiente. Uma transição de E para um estado subsequente representa um encontro efetivo envolvendo um dos nós do estado E . O conjunto G_E é definido como $G_E = \{(i, j) : j \in R_i, \forall i \in E\}$, onde R_i é o conjunto de todos os próximos saltos adequados para o nó i , conforme definido na Seção 2.2.2.

Por exemplo, para o caso de a política de encaminhamento ser a do roteamento epidêmico básico, todos os encontros são efetivos, e o conjunto G_E é composto pelos pares que se encontram considerando todos os nós do estado E . Considere $n = 4$, $k = 2$, $s = 1$, $d = 4$, e o estado transiente $\{2, 3\}$. Supondo que todos os encontros são efetivos, ou seja, $R_2 = \{1, 3, 4\}$ e $R_3 = \{1, 2, 4\}$, o conjunto $G_{\{2,3\}}$ é dado por $\{(1, 2), (1, 3), (2, 3), (2, 4), (3, 4)\}$.

A construção do espaço de estados segue a seguinte regra geral: para cada par p em G_E , existe um estado subsequente ao estado E cuja transição representa o encontro do par p . Note que se E possui os dois nós do par p , o estado subsequente referente ao encontro desse par é o próprio estado E .

Por exemplo, considere novamente $n = 4$, $k = 2$, $s = 1$, $d = 4$, o estado transiente $\{2, 3\}$ e o conjunto $G_{\{2,3\}}$ mostrado acima. Os estados subsequentes ao estado $\{2, 3\}$ são: $\{1, 3\}$, $\{1, 2\}$, $\{2, 3\}$ (note que se o par $(2,3)$ se encontra, a cadeia

permanece nesse estado), $\{1, 4\}$ e $\{2, 4\}$, respectivamente aos pares em $G_{\{2,3\}}$.

A cadeia possui o seguinte estado inicial $\{0^{k-1}, s\}$, *i.e.*, $k - 1$ zeros e s . Os possíveis estados subsequentes ao estado inicial são:

- (i) $\{0^{k-1}, d\}$, se $d \in R_s$;
- (ii) $\{0^{k-2}, s, i\}$, $\forall i \in R_s - \{d\}$.

O estado (i) existe se $d \in R_s$. Nesse caso, este é um estado absorvente, não possui estado subsequente, e representa o caso no qual s encontra d . Os estados (ii) representam o caso no qual s encontra i , onde $i \in R_s - \{d\}$, e cria a segunda cópia. No caso *multi-copy*, o valor mínimo para k é 2.

Os estados subsequentes aos estados (ii) dependem dos encontros possíveis envolvendo os nós em cada um deles. Diferente do caso *single-copy*, no qual o espaço de estados depende somente de n e será o mesmo para qualquer par de nós (s, d) , no caso geral, o espaço de estados depende de k , s , d , e dos conjuntos R_i de todos os nós $i \in N$.

Sendo assim, para construir o espaço de estados do caso *multi-copy* é necessário utilizar um algoritmo. O Algoritmo 1 foi desenvolvido com este objetivo. O procedimento principal CONSTRUIESPACOESTADOS é apresentado nas linhas 14 a 28 e é chamado na última linha 32. O objetivo do algoritmo é preencher a variável *lista* (linha 29), que corresponde a uma lista de estados. Cada estado é uma lista ordenada de k elementos. Cada novo estado criado deve ser incluído na lista por meio do procedimento INCLUIREESTADO (definido nas linhas 3 a 6). Um estado é considerado novo se não estiver na lista.

O Algoritmo 1 é explicado em detalhes a seguir, a partir do procedimento principal CONSTRUIESPACOESTADOS.

As entradas do algoritmo são o valor de k , os índices dos nós origem s e destino d , além do conjunto de nós N e dos conjuntos R_i para todos os nós da rede. Os conjuntos N e R_i são necessários na obtenção do conjunto G_E referente ao estado E . Como saída, o algoritmo retorna o espaço de estados da cadeia $C_{s,d}^k$ na variável *lista*, inicializada na linha 29. São usados dois contadores *cont* e *aux*, inicializados nas linhas 30 e 31, respectivamente.

O primeiro comando do procedimento CONSTRUIESPACOESTADOS é incluir na lista o estado inicial $\{0^{k-1}, s\}$, na linha 15.

Os próximos estados são gerados passo a passo por meio do *loop enquanto* controlado pela variável *aux* nas linhas 19 a 28. O primeiro passo gera os estados subsequentes ao estado inicial. Como apenas os estados transientes possuem estados subsequentes (diferentes deles próprios), o *loop* termina se nenhum novo estado transiente for gerado naquele passo (note que *aux* é incrementado na linha 6, em

INCLUIREESTADO). O *loop para* (linhas 21 a 28) percorre o intervalo de estados gerados no passo anterior, limitado por aux_1 e aux_2 .

Considerando apenas os estados transientes (note a condição na linha 22), o *loop para* (linhas 24 a 26) implementa a regra geral mencionada anteriormente, para cada par p em G_E , existe um estado subsequente a partir do estado atual E .

O procedimento OBTERSUBSEQUENTE (linhas 7 a 13) define o estado subsequente. Se este for um novo estado, a função INCLUIREESTADO é chamada na linha 13. A condição na linha 11 implementa a criação da próxima cópia pela origem.

A complexidade computacional do Algoritmo 1 depende da sua implementação. O mesmo inclui o uso de rotinas de busca em listas, por exemplo, cujo tempo de execução pode variar muito conforme a lógica implementada.

Algoritmo 1 Construir o espaço de estados da cadeia $C_{s,d}^k$

1: **Entrada:** k, s, d, N e $R_i, \forall i \in N$
2: **Saída:** $lista$
3: **procedimento** INCLUIREESTADO($estado$)
4: $lista[cont] \leftarrow estado$
5: $cont \leftarrow cont + 1$
6: **se** $estado$ não contém d **então** $aux \leftarrow aux + 1$
7: **procedimento** OBTERSUBSEQUENTE($i, p, estado$)
8: **se** $lista[i]$ contém $p[0]$ **então** $tx \leftarrow p[0]$ e $rx \leftarrow p[1]$
9: **senão** $tx \leftarrow p[1]$ e $rx \leftarrow p[0]$
10: Substituir todos os elementos tx por rx em $estado$.
11: **se** (p contém s) e ($lista[i]$ contém 0) **então** $estado[0] \leftarrow s$
12: Ordenar $estado$.
13: **se** $lista$ não contém $estado$ **então** INCLUIREESTADO($estado$)
14: **procedimento** CONSTRUIRESPACOESTADOS(s, d, k)
15: $estado \leftarrow$ lista ordenada com $k-1$ zeros e s ▷ Estado inicial.
16: INCLUIREESTADO($estado$)
17: $aux_1 \leftarrow 1$
18: $aux_2 \leftarrow 1$
19: **enquanto** $aux > 0$ **faça**
20: $aux \leftarrow 0$
21: **para** i no intervalo $[aux_1, aux_2]$ **faça**
22: **se** $lista[i]$ não contém d **então**
23: $G_i \leftarrow$ lista dos pares do conjunto G_E , onde E é o estado $lista[i]$
24: **para** p em G_i **faça**
25: $estado \leftarrow lista[i]$
26: OBTERSUBSEQUENTE($i, p, estado$)
27: $aux_1 \leftarrow aux_2 + 1$
28: $aux_2 \leftarrow aux_2 + aux$
29: $lista \leftarrow$ lista vazia ▷ Espaço de estados da cadeia $C_{s,d}^k$.
30: $cont \leftarrow 0$ ▷ Contador de estados.
31: $aux \leftarrow 0$ ▷ Contador auxiliar.
32: CONSTRUIRESPACOESTADOS(s, d, k)

4.2.2 Probabilidade de transição e tempo para sair do estado

Vamos agora definir as probabilidades de transição e o tempo esperado para sair de cada estado transiente.

Seja $E_{(i,j)}$ o estado subsequente ao estado transiente E devido ao encontro do par $(i, j) \in G_E$. O universo de eventos associados a todas as transições possíveis a partir de E consiste nos eventos de encontro de todos os pares em G_E . Como já mencionado anteriormente, é possível que tenhamos $E_{(i,j)} = E$, se o estado E contém os nós i e j . Nesse caso, vamos usar uma abstração do termo "sair" do estado, já que o processo de fato continua no mesmo estado mas o tempo para ocorrer esse evento deve ser contabilizado no tempo total.

Sejam $M_{i,j}$ e $R_{i,j}$ as variáveis aleatórias para o tempo entre encontros e o tempo entre encontros residual do par (i, j) . O tempo entre encontros residual trata-se do tempo até o próximo encontro do par (i, j) a contar de um instante qualquer, não necessariamente o instante do último encontro entre eles. Essa variável será útil nas definições a seguir.

Seja T_E a variável aleatória que representa o tempo para sair do estado E . Uma vez no estado E , o processo vai para o estado subsequente $E_{(i,j)}$ quando o encontro do par (i, j) é o primeiro a ocorrer dentre todos os pares em G_E . Assim, a contar do instante em que o processo atinge o estado E , o tempo necessário para sair desse estado é dado pelo mínimo tempo entre encontros residual considerando todos os pares em G_E . A expressão geral para T_E é dada por:

$$T_E = \min\{R_{i,j} : (i, j) \in G_E\} \quad (4.3)$$

Seja $p_{i,j}^E$ a probabilidade de transição de E para $E_{(i,j)}$, que é a probabilidade de o encontro de (i, j) ser o primeiro a ocorrer dentre os encontros de todos os pares em G_E . Logo, $p_{i,j}^E$ é dada pela probabilidade de $R_{i,j}$ ser o menor dentre os tempos entre encontros residuais de todos os pares em G_E . A expressão geral para $p_{i,j}^E$ é dada por:

$$p_{i,j}^E = P(R_{i,j} = \min\{R_{x,y} : (x, y) \in G_E\}) \quad (4.4)$$

Ambos $p_{i,j}^E$ e T_E dependem da distribuição do tempo entre encontros residual dos pares de nós. Na Seção 4.3 adiante são apresentadas as expressões para tais variáveis para o caso no qual a distribuição do tempo entre encontros é exponencial, uma vez que esta é a distribuição mais comum usada na literatura e também considerada nos experimentos realizados neste trabalho, conforme descrito no Capítulo 5.

Para o caso *single-copy*, supondo que o estado E é composto pelo nó i , o conjunto G_E é simplesmente dado por $G_E = \{(i, j) : j \in R_i\}$. Nesse caso, o Modelo II apresenta o mesmo resultado que o modelo de Boldrini, descrito na Seção 2.2.2,

porém com abordagens diferentes de interpretação do processo e métodos diferentes de cálculo. A expressão dada pela Eq. (2.1) quando $i = s$ retorna o mesmo valor obtido pelo Modelo II para o atraso de entrega fim-a-fim esperado. As expressões gerais para as probabilidades de transição e o valor esperado do tempo para sair de um estado nesse caso também podem ser encontradas de forma semelhante na referência [1].

O valor esperado para o atraso de entrega fim-a-fim segundo o Modelo II é dado pelo valor esperado do tempo decorrido desde o estado inicial até a absorção. Na próxima seção, será apresentado o método proposto para o cálculo deste valor.

4.2.3 Cálculo do atraso de entrega

Após a cadeia estar completamente definida, é possível obter a matriz fundamental \mathbf{N} e calcular o atraso de entrega esperado conforme o método apresentado a seguir.

A matriz fundamental \mathbf{N} deve ser obtida por meio da Eq. (4.2). Note que apenas a matriz \mathbf{Q} é necessária para tal, não sendo necessário montar toda a matriz \mathbf{P} .

Seja \mathbf{L}_{E_0} o vetor linha cujos elementos são os elementos da linha que corresponde ao estado inicial E_0 na matriz \mathbf{N} . Considerando o estado inicial E_0 , o vetor \mathbf{L}_{E_0} contém o número esperado de vezes que o processo está em cada estado transiente até a absorção, ou seja, desde a criação da mensagem pela origem até a entrega da mesma ao destino. A posição u de \mathbf{L}_{E_0} contém a contagem de vezes referente ao estado transiente E_u . Note que essa contagem inclui os eventos referentes ao caso em que o estado subsequente de E_u é ele próprio.

Seja \mathbf{T} o vetor coluna cuja posição u contém $E[T_{E_u}]$, o valor esperado do tempo para sair do estado transiente E_u .

O **atraso de entrega** esperado é o somatório total do tempo esperado que o processo leva para sair de cada estado transiente, a partir do estado inicial até a absorção. Assim, o valor esperado do atraso de entrega da origem s para o destino d , considerando um limite máximo de k cópias, é dado por:

$$E[D_{s,d}^k] = \mathbf{L}_{E_0} \cdot \mathbf{T} , \quad (4.5)$$

onde \mathbf{L}_{E_0} e \mathbf{T} estão associados à cadeia $C_{s,d}^k$.

Prova: Considere o processo modelado pela cadeia $C_{s,d}^k$ e os vetores \mathbf{L}_{E_0} e \mathbf{T} como definidos previamente. O produto entre o número de vezes que o processo está no estado transiente E e o tempo esperado para sair do estado E retorna a porção do tempo total esperado para o processo atingir a absorção referente ao estado E . Por exemplo, supondo que o processo passa em média 10 vezes pelo estado E antes da absorção. Uma vez no estado E , o processo leva 20 s em média para sair do mesmo. Logo, desde o estado inicial até a absorção, o processo ficou um total de 200 s no

estado E , em média. A soma de todos os produtos considerando todos os estados transientes retorna o valor esperado do tempo total desde o estado inicial até a absorção, ou seja, do atraso de entrega. Seja b o número de estados transientes, e, conseqüentemente, o número total de elementos em \mathbf{L}_{E_0} e \mathbf{T} . Assim, $E[D_{s,d}^k]$ é dado por $\sum_{j=1}^b (l_j t_j)$, onde l_j é o j -ésimo elemento de \mathbf{L}_{E_0} e t_j é o j -ésimo elemento de \mathbf{T} . Este somatório também pode ser escrito como dado pela Eq. (4.5).

A Seção 4.4 apresenta dois exemplos numéricos do cálculo do atraso de entrega fim-a-fim utilizando o método proposto anteriormente, para o caso *single-copy* e *multi-copy*, respectivamente nas subseções 4.4.1 e 4.4.2.

O objetivo principal desta modelagem é calcular o atraso de entrega fim-a-fim esperado, porém outras métricas também podem ser obtidas com este modelo. O produto da matriz fundamental \mathbf{N} com o vetor \mathbf{T} gera uma matriz que possui o tempo em que o processo fica em cada estado, a partir de qualquer estado da cadeia. No cálculo do atraso fim-a-fim, apenas a linha do estado inicial importa, porém as outras linhas podem ser usadas para o cálculo de valores intermediários de atraso ou para outras medições. Por exemplo, se um determinado grupo de nós for mais importante do que os demais ou se a rede for dividida em comunidades, é possível saber quanto tempo a partir do estado que representa tal grupo ou comunidade a mensagem leva para ser entregue. Outro exemplo é a possibilidade de calcular quanto tempo cada nó fica com a mensagem (no caso, com alguma cópia) por meio dos estados que contém tal nó. Assim, o Modelo II pode ter outras aplicações além da estimativa do atraso de entrega.

A próxima seção apresenta as expressões para o tempo esperado para sair de um estado transiente e para as probabilidades de transição para o caso em que a distribuição do tempo entre encontros é exponencial.

4.3 Tempo entre encontros com distribuição exponencial

Os experimentos realizados para o processo de validação do Modelo II envolvem cenários onde os tempos entre encontros têm distribuição exponencial. Será apresentado a seguir as expressões para o valor esperado do tempo para sair de um estado e para a probabilidade de transição para este caso particular.

Seja $M_{i,j} \sim \text{Exp}(\mu_{i,j})$ a variável aleatória do tempo entre encontros do par (i, j) , onde $\mu_{i,j}$ é a taxa de encontro do par (i, j) . Nesse caso, o valor esperado de T_E e a probabilidade de transição $p_{i,j}^E$ são dados, respectivamente, por:

$$E[T_E] = \frac{1}{\sum_{(x,y) \in G_E} \mu_{x,y}} \quad (4.6)$$

$$p_{i,j}^E = \frac{\mu_{i,j}}{\sum_{(x,y) \in G_E} \mu_{x,y}} \quad (4.7)$$

Prova: A prova dessas expressões é feita com base em conceitos da teoria de variáveis aleatórias exponenciais. Os conceitos utilizados são:

- (i) Quando o tempo entre encontros possui distribuição exponencial, devido à propriedade de falta de memória desta distribuição, a variável do tempo entre encontros residual também possui distribuição exponencial com o mesmo parâmetro.
- (ii) Sejam X_1, \dots, X_n variáveis aleatórias exponenciais independentes, onde $X_i \sim \text{Exp}(\lambda_i)$. A variável dada por $\min\{X_1, \dots, X_n\}$ tem distribuição exponencial cujo parâmetro é dado por $(\lambda_1 + \dots + \lambda_n)$.
- (iii) A probabilidade de $\min\{X_1, \dots, X_n\}$ ser dado por X_i é dada por $\lambda_i / (\lambda_1 + \dots + \lambda_n)$. Do conceito (i), temos que $R_{x,y} \sim \text{Exp}(\mu_{x,y})$, onde $R_{x,y}$ é a variável aleatória do tempo entre encontros residual do par (x, y) .

De acordo com a Eq. (4.3), a variável aleatória T_E é dada pelo mínimo de $\{R_{x,y} : (x, y) \in G_E\}$. Do conceito (ii), temos que T_E tem distribuição exponencial cujo parâmetro é dado por $\sum_{(x,y) \in G_E} \mu_{x,y}$. Logo, temos que o valor esperado de T_E é conforme dado pela Eq. (4.6).

De acordo com a Eq. (4.4), $p_{i,j}^E$ é a probabilidade de $R_{i,j}$ ser o mínimo dentre $\{R_{x,y} : (x, y) \in G_E\}$. Do conceito (iii) temos que $p_{i,j}^E$ é conforme dado pela Eq. (4.7).

Na próxima seção, serão apresentados dois exemplos numéricos com o cálculo do atraso de entrega para um caso *single-copy* e um *multi-copy*, considerando que os tempos entre encontros têm distribuição exponencial.

4.4 Exemplos

As próximas seções apresentam dois exemplos numéricos da utilização do Modelo II para a obtenção do atraso de entrega esperado. O objetivo é calcular o valor de $E[D_{s,d}^k]$, atraso de entrega do par origem-destino (s, d) , para todos os pares de nós da rede.

A Seção 4.4.1 apresenta um caso *single-copy* e a Seção 4.4.2 apresenta um caso *multi-copy*. Em ambos os exemplos, o modelo é aplicado a um cenário fictício chamado S , que corresponde a uma rede com 4 nós cujas taxas de encontro são dadas por (em s^{-1}): $\mu_{1,2} = 0$; $\mu_{1,3} = 0, 2$; $\mu_{1,4} = 0, 3$; $\mu_{2,3} = 0, 4$, $\mu_{2,4} = 0, 5$ e $\mu_{3,4} = 0$. Note que os pares $(1,2)$ e $(3,4)$ nunca se encontram. A distribuição do tempo entre encontros dos pares é exponencial e a política de encaminhamento é a do roteamento epidêmico básico, ou seja, $R_i = N - \{i\}$, onde $N = \{1, 2, 3, 4\}$ é o conjunto de todos os nós da rede.

4.4.1 Exemplo 1: caso *single-copy*

No caso *single-copy*, as cadeias $C_{i,d}^1$ são iguais para todo $i \in N - \{d\}$. Logo, com uma única cadeia é possível calcular os atrasos $E[D_{i,d}^1]$ para todo $i \in N - \{d\}$.

A Figura 4.1 apresenta os diagramas de estados para o cenário S no caso *single-copy*. Cada diagrama refere-se a um nó destino diferente. Por exemplo, a letra (a) mostra o diagrama no caso em que $d = 1$ e refere-se às cadeias $C_{2,1}^1$, $C_{3,1}^1$ e $C_{4,1}^1$, que são iguais. Os estados preenchidos são os estados transientes e os estados em branco são os estados absorventes. O espaço de estados é $\{1, 2, 3, 4\}$. Existe um estado para cada nó, como explicado anteriormente. As probabilidades de transição são dadas pela Eq. (4.7). Para simplificar, os estados são identificados com o próprio índice dos nós.

A seguir, será apresentado um método de cálculo para os casos em que $d = 4$, representados pela cadeia da Figura 4.1-(d). Os demais casos são análogos.

Para resolver a Eq.(4.5) é preciso obter as matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{N} , e o vetor \mathbf{T} . O primeiro passo é obter a matriz \mathbf{Q} , cujos elementos são as probabilidades de transição entre os estados transientes dadas pela Eq. (4.7).

No caso *single-copy*, o conjunto G_E referente ao estado $E = \{i\}$ é dado por $G_{\{i\}} = \{(i, j) : j \in R_i\}$, como já mencionado. Assim, no caso em que a distribuição do tempo entre encontros é exponencial, a expressão para a probabilidade $p_{i,j}^{\{i\}}$ é dada por $p_{i,j}^{\{i\}} = \mu_{i,j} / \sum_{j \in R_i} \mu_{i,j}$.

A matriz \mathbf{Q} referente à cadeia da Figura 4.1-(d) é apresentada na Eq. (4.8), onde

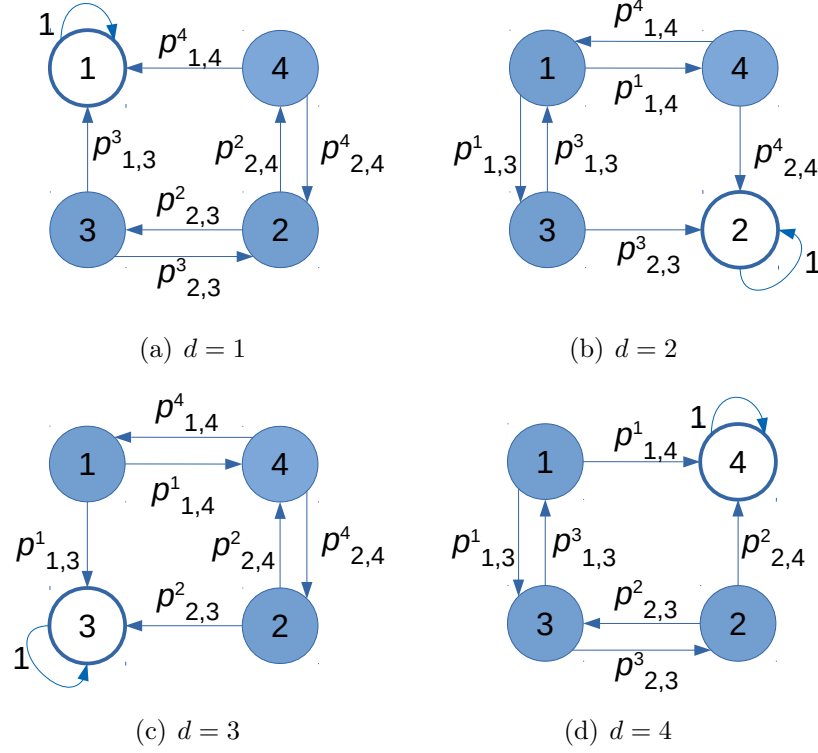


Figura 4.1: Diagramas de estados para o cenário S no caso *single-copy*.

a linha/coluna i corresponde ao estado $\{i\}$, sendo $i = 1, 2, 3$.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,2/0,5 \\ 0 & 0 & 0,4/0,9 \\ 0,2/0,6 & 0,4/0,6 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

A matriz fundamental \mathbf{N} é obtida a partir de $\mathbf{N} = (\mathbf{I}_3 - \mathbf{Q})^{-1}$ e o resultado é mostrado na Eq. (4.9).

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 1,23 & 0,47 & 0,70 \\ 0,26 & 1,52 & 0,78 \\ 0,58 & 1,17 & 1,75 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

O vetor \mathbf{T} , cujos elementos são obtidos pela Eq. (4.6), é mostrado na Eq. (4.10). No caso *single-copy*, a expressão para $E[T_E]$, referente ao estado $E = \{i\}$ é dada por $E[T_{\{i\}}] = 1/\sum_{j \in R_i} \mu_{i,j}$. A entrada i no vetor \mathbf{T} corresponde ao estado $\{i\}$, sendo $i = 1, 2, 3$.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1/0,5 \\ 1/0,9 \\ 1/0,6 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

A partir da matriz \mathbf{N} dada pela Eq. (4.9) é possível obter $E[D_{1,4}^1]$, $E[D_{2,4}^1]$ e $E[D_{3,4}^1]$, uma vez que a linha i da matriz refere-se ao caso em que o estado $\{i\}$ é o

estado inicial. Logo, basta fazer o produto entre \mathbf{N} e \mathbf{T} .

O produto de \mathbf{N} e \mathbf{T} é um vetor coluna cuja entrada i contém $E[D_{i,4}^1]$ e seu resultado é mostrado na Eq. (4.11). O valor médio de $\mathbf{N} \cdot \mathbf{T}$ corresponde ao atraso esperado para $d = 4$, cujo resultado é 4,35 s.

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 4,15 \\ 3,51 \\ 5,38 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Para obter o valor médio do atraso de entrega considerando todos os pares origem-destino, o procedimento apresentado deve ser repetido para os demais possíveis valores de d , no caso, para $d = 1, 2$ e 3 . Os resultados do atraso de entrega esperado para $d = \{1, 2, 3, 4\}$ são 6,43 s, 4,00 s, 5,56 s e 4,35 s, respectivamente. Sendo assim, o valor médio do atraso de entrega esperado para o cenário S com $k = 1$ é a média desses valores dada por 5,085 s.

4.4.2 Exemplo 2: caso *multi-copy*

No caso *multi-copy*, a simplificação no cálculo usada no exemplo anterior não pode ser aplicada, pois cada par origem-destino possui uma cadeia própria associada. A seguir, será apresentado o cálculo do atraso referente ao par $(s, d) = (1, 4)$. O cálculo para os demais pares é análogo.

Neste exemplo, vamos considerar o caso *two-copy*, onde $k = 2$.

A Figura 4.2 mostra o diagrama de estados para o cenário S com $s = 1$ e $d = 4$, para o caso *two-copy*, que refere-se à cadeia $C_{1,4}^2$. O espaço de estados foi obtido por meio do Algoritmo 1. Os estados preenchidos são os estados transientes e os estados em branco são os estados absorventes. Os estados transientes são identificados com índices de 0 a 3. O estado inicial (0,1) recebe o índice 0, seguido pelos estados (1,3), (1,2) e (2,3), nesta ordem¹.

Os conjuntos G_E de cada estado transiente são dados por: $G_{\{0,1\}} = \{(1, 3), (1, 4)\}$; $G_{\{1,3\}} = \{(1, 3), (1, 4), (2, 3)\}$; $G_{\{1,2\}} = \{(1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4)\}$ e $G_{\{2,3\}} = \{(1, 3), (2, 3), (2, 4)\}$.

Seguindo a mesma sequência de operações usada no exemplo anterior, vamos escrever as matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{N} , e o vetor \mathbf{T} .

A matriz \mathbf{Q} referente à cadeia da Figura 4.2 é mostrada na Eq. (4.12), onde a linha/coluna i corresponde ao estado de índice $i - 1$, para $i = \{1, 2, 3, 4\}$. Os

¹No caso *multi-copy*, não há uma relação direta entre índice do nó e índice do estado, como no caso *single-copy*.

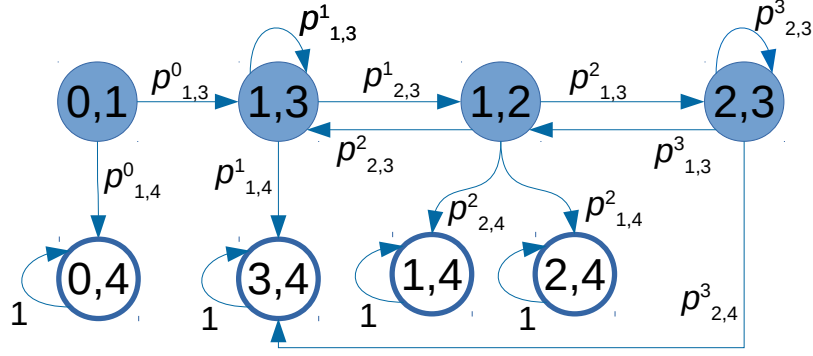


Figura 4.2: Diagrama de estados para o cenário S com $s = 1$ e $d = 4$, para o caso *two-copy*.

elementos de \mathbf{Q} foram obtidos com a Eq. (4.7).

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0,2/0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2/0,9 & 0,4/0,9 & 0 \\ 0 & 0,4/1,4 & 0 & 0,2/1,4 \\ 0 & 0 & 0,2/1,1 & 0,4/1,1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

O vetor \mathbf{T} , cuja entrada i corresponde ao estado de índice $i - 1$, para $i = \{1, 2, 3, 4\}$, é mostrado na Eq. (4.13) e seus elementos foram obtidos por meio da Eq. (4.6).

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1/0,5 \\ 1/0,9 \\ 1/1,4 \\ 1/1,1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Resolvendo $\mathbf{N} = (\mathbf{I}_4 - \mathbf{Q})^{-1}$, podemos obter a matriz fundamental para esta cadeia. Diferente do caso *single-copy*, neste caso apenas a linha correspondente ao estado inicial (0,1) será usada nos cálculos seguintes. Seu resultado é dado por: $\mathbf{L}_{(0,1)} = [1 \ 0,619780 \ 0,287179 \ 0,064468]$.

Seguindo a Eq.(4.5), temos que o atraso de entrega esperado para $s=1$ e $d=4$ é $E[D_{1,4}^2] = \mathbf{L}_{(0,1)} \cdot \mathbf{T} = 2,952380$ s.

Repetindo este procedimento para os demais pares origem-destino, podemos obter todos os valores de $E[D_{s,d}^2]$, para todos os pares (s, d) , $s \neq d$. Ao fazer isso, encontramos o valor médio do atraso de entrega esperado para o cenário S com $k = 2$, cujo resultado é 3,67 s.

Cabe ressaltar que o fato de a origem poder duplicar a mensagem reduziu o atraso de entrega médio na rede em 27,82%.

A implementação do Modelo II, incluindo o algoritmo de geração do espaço de estados e as manipulações com as matrizes para o cálculo do atraso, requer atenção de modo a controlar a complexidade do código. Além disso, outro fator crítico é o uso da memória, principalmente por causa das matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{N} . É importante escolher estruturas de dados adequadas, o mais eficientes possível no uso e no acesso à memória, de acordo com a linguagem de programação escolhida. Uma observação relevante com relação à matriz \mathbf{Q} é que a mesma é esparsa (a maior parte dos elementos é zero). Se esta qualidade for levada em consideração na implementação do modelo, é possível reduzir consideravelmente o tempo de execução do código. O código implementado para este trabalho foi escrito em Python e foi usado o pacote `scipy.sparse`² para matrizes esparsas.

²Referência: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/sparse.html>

Capítulo 5

Validação

Este capítulo apresenta a metodologia de validação dos Modelos I e II. Essa validação foi feita por meio da comparação dos resultados da modelagem analítica com resultados de simulação.

A resultado de interesse é o **atraso de entrega médio**, que trata-se do valor médio dos atrasos esperados para cada par considerando todos os pares (i, j) como um par origem-destino, sendo $i < j$. Esse resultado trata-se de uma média parcial envolvendo apenas a combinação dos nós em pares (do nó 1 para nó 2, mas não de 2 para 1). Os valores do atraso médio considerando a média parcial ou completa são muito semelhantes, porém trabalhando com a média parcial é possível obter os resultados, tanto de modelagem quanto de simulação, em menor tempo sem afetar a análise comparativa.

A métrica de comparação é o **erro relativo**, módulo da diferença entre os resultados de simulação e modelagem, relativo ao valor da simulação.

Para a obtenção dos resultados de modelagem, para ambos os Modelos I e II, é preciso definir os valores das taxas de encontro $\mu_{i,j}$ que serão aplicados, para todos os pares (i, j) . Essa etapa é extremamente crítica e importante, pois as taxas de encontro são parâmetros cruciais para a modelagem. Uma análise preliminar dos resultados obtidos mostrou que os modelos são bastante sensíveis a variações nesses parâmetros.

O valor de $\mu_{i,j}$ inserido na modelagem é chamado de **taxa de encontro efetiva**. A metodologia usada para obter esses valores é a seguinte. Cada cenário possui um *trace* de encontros correspondente que representa uma amostra de valores das variáveis $M_{i,j}$, tempo entre encontros de cada par (i, j) . A partir desse *trace*, é possível então estimar o valor esperado do tempo entre encontros de cada par. As taxas de encontro efetivas são obtidas a partir de $\mu_{i,j} = 1/E[M_{i,j}]$. No caso de haver apenas um encontro entre (i, j) registrado no *trace*, existe apenas um valor de tempo entre encontros e a taxa efetiva é dada pelo inverso desse tempo.

No caso de *traces* mais longos, quando o tamanho da amostra de tempos entre

encontros é grande, os pares que apresentam poucos encontros ao longo de todo o *trace* podem ter sua taxa efetiva considerada como 0. Essa consideração não afeta os resultados de forma considerável e ajuda no cálculo da modelagem. No caso do Modelo II, quando há pares com taxa nula há menos possibilidades de encontros a serem consideradas, o que reduz o espaço de estados da cadeia e o número de entradas positivas na matriz \mathbf{Q} . Para a obtenção dos resultados apresentados no próximo capítulo, o valor mínimo de encontros considerado para o cálculo da taxa efetiva nesses casos foi de 5.

Para realizar os experimentos de simulação foram utilizadas três ferramentas: o simulador ns-3¹, um simulador próprio chamado *Multi-copy Simulator* (MCS), e o simulador The ONE² (*The Opportunistic Network Environment*) [44], todos baseados em eventos discretos.

Essas três ferramentas são muito diferentes em diversos aspectos, desde a configuração dos cenários até o formato dos resultados gerados. O uso de cada uma delas foi necessário para atender necessidades específicas que surgiram com o andamento dos experimentos realizados, conforme os resultados foram sendo obtidos e analisados ao longo do trabalho.

O simulador ns-3 é uma ferramenta bastante conhecida e amplamente utilizada nos trabalhos de pesquisa na área de Redes. Os resultados preliminares obtidos no processo de validação do primeiro modelo desenvolvido, Modelo I, foram gerados com o ns-3. Nessa ocasião, alguns cenários apresentaram um desvio maior do que o esperado na comparação entre simulação e modelagem. Isso levantou hipóteses acerca dos motivos para tal desvio. Algumas possibilidades levantadas foram: possíveis inconformidades do cenário com os requisitos da modelagem, influências intrínsecas ao ambiente de simulação do ns-3, e as aproximações do modelo discutidas na Seção 3.5.

Ambos os modelos I e II apresentam uma premissa que diz que as taxas de encontro dos pares são consideradas fixas ao longo do tempo. Esta premissa pode ser difícil de atender em alguns casos.

De acordo com a teoria de convergência de variáveis aleatórias, se a amostra de valores de tempo entre encontros for suficientemente grande, é possível estimar seu valor esperado e conseqüentemente a taxa de encontro. Entretanto, existem cenários onde a convergência leva um longo tempo para ser obtida, tornando os experimentos de simulação inviáveis. Por exemplo, dois nós que ora estão próximos e ora estão afastados possuem uma taxa de encontro que varia muito ao longo do tempo. O valor esperado do tempo entre encontros desse par pode levar muito tempo para convergir, necessitando de uma simulação com longa duração. Além disso, *traces* de

¹Disponível em <http://www.nsnam.org>. Versão utilizada: 3.25.

²Disponível em <https://akeranen.github.io/the-one/>. Versão utilizada: 1.6.0.

encontros ou de mobilidade reais muitas vezes representam cenários onde as taxas de encontro variam ao longo do tempo e não são longos o suficiente para se obter uma quantidade ideal de amostras. Logo, para os cenários que apresentam essa característica, os valores obtidos para as taxas de encontro efetivas podem não ser bem representativos do comportamento de encontros dos pares.

Após análise detalhada da dinâmica de encontros, observou-se que alguns cenários simulados apresentavam uma variação significativa das taxas de encontro ao longo do tempo. Assim, surgiu a necessidade de realizar experimentos de simulação em ambientes mais controlados, onde fosse possível, por exemplo, configurar os valores de cada taxa de encontro e gerar *traces* de encontro com base nesses valores.

A principal questão era descobrir se os desvios encontrados eram devido simplesmente às aproximações do modelo ou se características ainda não mapeadas dos experimentos tinham uma influência relevante no resultado.

O desenvolvimento de uma ferramenta de simulação própria veio atender a duas necessidades, descartar possíveis influências intrínsecas ao ambiente de simulação do ns-3 e possibilitar a realização de experimentos fornecendo como entrada os valores das taxas de encontro.

O simulador próprio, desenvolvido especificamente para este trabalho, foi chamado de *Multi-copy Simulator* (MCS). Os detalhes de implementação e operabilidade do mesmo estão apresentados adiante na Seção 5.2.

No ns-3, todas as camadas de protocolo estão implementadas e todos os principais parâmetros da rede e do cenário são configuráveis e devem ser definidos pelo usuário, como número de nós, alcance, área de cobertura da rede, modelo de mobilidade, etc. No simulador MCS, o experimento é direcionado para o processo de encaminhamento das mensagens, com o foco nos eventos de encontro, e as camadas de protocolos são abstraídas. Neste, existe a opção de definir diretamente as taxas de encontro de cada par de nós, sem a necessidade de analisar um *trace* de encontros.

Com o desenvolvimento do Modelo II, a questão das aproximações foram resolvidas e esse fator não mais exercia influência nos resultados. Porém, outra necessidade surgiu, a de realizar experimentos com uma ferramenta previamente conhecida e amplamente utilizada pela comunidade científica, o que não seria possível com o simulador próprio. Assim, o simulador The ONE foi então escolhido como uma terceira ferramenta, sendo este o utilizado na obtenção de grande parte dos resultados relacionados ao Modelo II.

O simulador The ONE também é baseado em eventos discretos, como o ns-3, e foi desenvolvido para avaliar protocolos de roteamento e de aplicação em redes DTN, sendo bastante utilizado para a realização de experimentos com esse tipo de rede. O The ONE oferece a possibilidade de ler *traces* de encontros, no lugar de *traces* de mobilidade. Por esse motivo o simulador The ONE foi escolhido neste caso, ao

invés do ns-3.

A política de encaminhamento escolhida para os experimentos realizados neste trabalho é a do esquema **epidêmico** básico, que tem uma regra simples de encaminhar as mensagens para todos os contatos. Assim, todos os nós, com exceção do nó destino, encaminham as mensagens armazenadas para todos os nós encontrados com probabilidade igual a 1. A criação das cópias pela origem é controlada pela variável k e os nós que atuam como *relays* não criam cópias extras, como explicado previamente. Neste trabalho, este processo será chamado de ***k-copy* epidêmico**.

Os cenários analisados apresentam tempos entre encontros com distribuição **exponencial**, que é a distribuição mais utilizada pela literatura e considerada válida para a mobilidade humana em áreas fechadas quando a dinâmica de encontros é considerada heterogênea [41, 45].

A seguir, serão apresentados os simuladores utilizados neste trabalho e a metodologia de realização de experimentos utilizada em cada um deles. As Seções 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam os simuladores ns-3, MCS e The ONE, respectivamente. Ao final do capítulo, a Seção 5.4 apresenta a ferramenta BonnMotion, utilizada para a geração de *traces* sintéticos.

5.1 Simulador ns-3

Os experimentos realizados nesse simulador consideram uma rede *ad hoc*, com interface 802.11 configurada em modo *ad hoc* definida na classe *AdhocWifiMac*.

Para implementar o processo *k-copy* epidêmico, foi utilizado como base o módulo³ *Epidemic Routing* [46], que implementa o esquema epidêmico básico como definido por [7]. Nesse esquema, não há nenhum controle na quantidade de cópias geradas pelos nós, nem para a origem nem para os nós intermediários, ambos geram diversas cópias da mensagem conforme os contatos ocorridos entre os nós. Assim, para adequar o referido módulo aos experimentos deste trabalho, foram necessárias diversas modificações, especialmente para implementar o controle do número de cópias geradas na origem e nos nós intermediários.

Após um tempo de *warm up*, o nó origem s gera uma mensagem para o destino d , para todos os pares (s, d) , $s \neq d$. O tempo total de simulação é longo o suficiente para que todas as mensagens sejam entregues. O longo tempo de simulação também é importante para obter uma amostra suficiente de tempos entre encontros, de modo a melhor estimar a taxa de encontro efetiva.

Devido ao fato de não haver correspondência entre as identificações dos nós entre diferentes *traces* de mobilidade (o nó 0 no *trace* 1 não é necessariamente o mesmo

³O código original usado neste trabalho pode ser encontrado em <https://codereview.appspot.com/13831049/>.

nó 0 no *trace* 2), apenas um único *trace* de mobilidade é usado para cada cenário. Cada geração de novas mensagens corresponde a uma amostra de valores de atraso de entrega, de modo a obter assim várias amostras diferentes ao longo do *trace*. Por exemplo, iniciando após um *warm up* de $t = 1000$ s, com a taxa de geração de mensagens de $0,25 \cdot 10^{-3}$ por segundo (1 mensagem a cada 4000 s) é possível obter ao menos 100 amostras no tempo total de simulação de 7 dias. A primeira amostra corresponde aos atrasos de entrega das mensagens geradas em $t = 1000$ s, a segunda amostra corresponde aos atrasos de entrega das mensagens geradas em $t = 5000$ s, e assim por diante, até o tempo total de simulação.

Os valores das taxas de encontro efetivas de cada par são obtidos a partir do arquivo de saída da simulação, conforme explicado a seguir. O ns-3 oferece a possibilidade de criar arquivos de *log* como saída, e as informações contidas no *log* são configuráveis pelo usuário. Dessa forma, foi definido que seria escrito no *log* o tempo de encontro de todos os pares de nós. O arquivo *log* é analisado de forma a extrair um *trace* de encontros no seguinte formato. Cada registro do *trace* de encontros é composto por um tempo de encontro e uma identificação do par de nós em contato. Um registro envolvendo o par (i, j) significa que tanto i como j podem transmitir alguma mensagem, ou seja, o encontro é recíproco. As taxas de encontro efetivas são obtidas a partir de $\mu_{i,j} = 1/E[M_{i,j}]$, como já explicado na introdução deste capítulo.

5.2 Simulador MCS

O simulador MCS é uma ferramenta de simulação com base em eventos discretos, escrito na linguagem C, desenvolvido especificamente para este trabalho. A simulação do processo de encaminhamento e entrega das mensagens é baseada nos encontros dos pares de nós, que são tratados como eventos discretos. O código faz a leitura de um *trace* de encontros, um arquivo que contém todos os tempos de encontros de todos os pares de nós. A cada encontro, os nós trocam mensagens, caso estas existam, conforme a política de encaminhamento pré-definida. A taxa de geração de mensagens deve ser definida pelo usuário.

O simulador oferece a opção de simular cenários onde as taxas são fixas ou variáveis ao longo do tempo, de forma heterogênea, sendo possível definir quais pares de nós terão taxas variáveis e qual o grau de variabilidade. Essa opção é importante para analisar a influência dessa variação nos resultados, como será discutido adiante no Capítulo 6.

O código é flexível e configurável em diversos aspectos. O *trace* de encontros pode ser gerado pelo próprio simulador ou importado. Para gerar o *trace* localmente, é preciso definir: o número total de nós, se o cenário é homogêneo ou heterogêneo, e a taxa de encontro de cada par, que pode ser fixa ou variável ao longo do tempo.

No caso de a taxa ser variável, é preciso definir o **grau de variabilidade**.

A geração do *trace* de encontros pelo simulador é feita por meio da geração de amostras de valores para os tempos entre encontros, de acordo com uma rotina que implementa a distribuição dessas variáveis. No caso dos experimentos realizados para este trabalho, as variáveis seguem a distribuição exponencial cujo parâmetro é a taxa de encontro do par correspondente. Assim, o *trace* de encontros de cada par é gerado de forma independente dos demais, a partir de um tempo inicial, por exemplo, $t = 0$. O *trace* de encontro completo é formado pela concatenação dos tempos de encontros de todos os pares ordenados de forma crescente.

A variabilidade das taxas de encontro neste simulador foi implementada da seguinte forma. Para cada par, é definido um valor inicial para a taxa, a partir do qual será obtido o primeiro tempo entre encontros (os valores das taxas iniciais podem ser gerados pelo simulador ou importados). A taxa pode variar dentro de um intervalo limitado pelo grau de variabilidade, definido como um percentual do valor inicial. Por exemplo, se o grau for de 50%, as taxas variam dentro do intervalo $(0.5\mu_{i,j}^0, 1.5\mu_{i,j}^0)$, onde $\mu_{i,j}^0$ é o valor inicial para $\mu_{i,j}$. A cada nova geração de um valor para o tempo entre encontros, um novo valor de taxa de encontro é sorteado (seguindo uma distribuição uniforme) dentro do intervalo. No caso de as taxas serem fixas ao longo do tempo, o valor de cada taxa é simplesmente dado pelo seu valor inicial.

Vale lembrar que um cenário **homogêneo** é aquele em que as taxas de encontro de todos os pares de nós são iguais, caso contrário, temos um cenário **heterogêneo**, no qual os pares podem ter taxas diferentes.

Como prova de conceito, o simulador foi usado para reproduzir um dos resultados apresentados em [1], para o modelo *single-copy*. Trata-se de um cenário heterogêneo no qual 15 nós estão divididos em 3 comunidades, C1, C2 e C3, com 5 nós cada uma. Na comunidade C1, dois nós são "viajantes", podendo se deslocar entre comunidades. Os demais nós se movimentam somente dentro da sua comunidade. A taxa de encontro dentro da comunidade é de $2,5 s^{-1}$. Os nós viajantes têm taxa de encontro igual a $1,25 s^{-1}$ com os nós das comunidades visitadas. Os demais pares de nós não se encontram, logo a taxa é zero.

A métrica a ser analisada é o atraso de entrega médio, valor médio do atraso esperado para todos os pares. O objetivo é comparar o resultado de simulação com o resultado analítico apresentado em [1], que pode ser calculado usando a Eq. (2.1). Considerando que a política de encaminhamento é a do protocolo epidêmico e que os tempos entre encontros têm distribuição exponencial, o valor analítico para o atraso de entrega médio é de 3,351948 s (com desvio padrão de 1,731 s). O valor obtido com o simulador próprio foi de 3,356577 s (com intervalo de confiança de 98% igual a 0,095 s), para 200 rodadas. O erro entre esses valores, relativo ao resultado

analítico, é muito baixo, de cerca de 0,14%.

5.3 Simulador The ONE

O The ONE é uma ferramenta escrita em Java, cujas principais funções envolvem a movimentação dos nós, conexões entre os nós, roteamento e a manipulação de mensagens [44].

A configuração do cenário é feita por meio de um arquivo texto simples, onde devem constar os parâmetros que se deseja definir conforme cada experimento, de acordo com a sintaxe do *software*. O resultado de cada experimento de simulação é fornecido na forma de relatórios. O usuário deve definir no arquivo de configuração quais relatórios deverão ser gerados ao final do experimento. A seguir é apresentado um exemplo do texto para o arquivo de configuração referente a um dos experimentos realizados neste trabalho.

```
Scenario.name = Scenario1
Scenario.simulateConnections = false
Scenario.updateInterval = 0.1
Scenario.endTime = 1000
Scenario.nrofHostGroups = 1
highspeedInterface.type = SimpleBroadcastInterface
highspeedInterface.transmitSpeed = 1M
highspeedInterface.transmitRange = 25
Group.movementModel = StationaryMovement
Group.router = FirstContactRouter
FirstContactRouter.nrofCopies = 1
Group.bufferSize = 2000M
Group.nodeLocation = 0,0
Group.nrofInterfaces = 1
Group.interface1 = highspeedInterface
Group.msgTtl = 1000
Group.resetTtl = true
Group.noRepeatedReceive = true
Group.nrofHosts = 10
Group1.groupID = p
Events.nrof = 2
Events1.class = ExternalEventsQueue
Events1.filePath = traces/scenario1-trace.txt
Events2.class = ExternalEventsQueue
```


O processo *k-copy* epidêmico foi implementado com base na classe *FirstContactRouter*. Essa classe implementa uma regra simples de única cópia, na qual cada mensagem possui apenas uma cópia e o encaminhamento é feito para o primeiro nó disponível, seguindo a ideia do caso *single-copy*. Tal classe foi então modificada de modo a permitir que a origem crie cópias da mensagem até o limite k .

O The ONE oferece a opção de receber como entrada um *trace* de encontros. Nesse caso não é necessário configurar parâmetros referentes à mobilidade, como modelo e velocidade, pois as conexões entre os nós serão conforme os registros lidos do *trace* de encontros. Cada registro possui cinco campos: tempo de contato, a palavra CONN que identifica o evento de conexão, as identificações dos nós em contato, e, por fim, a palavra *up* ou *down* que significa início e término de conexão, respectivamente. Por exemplo, "0 CONN 1 4 up", significa que no tempo $t = 0$ os nós 1 e 4 iniciaram uma conexão.

5.4 BonnMotion

O *software* BonnMotion⁴ é uma ferramenta de geração de cenários de mobilidade comumente usada para redes *ad hoc* móveis.

A própria ferramenta oferece a opção de converter o arquivo de saída de cada cenário para *traces* de mobilidade nos formatos compatíveis com os simuladores ns-3 e The ONE.

O modelo de mobilidade escolhido para os experimentos deste trabalho é o *Steady State Random Waypoint* [47, 48]. De acordo com o modelo *Random Waypoint*, a partir de uma posição inicial, o nó escolhe aleatoriamente uma velocidade e um ponto na área de simulação para onde irá se deslocar e parar por um tempo também escolhido aleatoriamente. Esse processo se repete até o tempo total definido. A escolha aleatória dos parâmetros segue a distribuição uniforme. Na versão *Steady State*, os parâmetros são escolhidos com base na distribuição de estado estacionário do modelo *Random Waypoint*. Assim, a dinâmica de movimentos já inicia em estado estacionário e não há necessidade de ignorar o início da simulação.

Esse modelo de mobilidade é comumente usado para simular redes *ad hoc* móveis e a distribuição do tempo entre encontros de cada par apresenta uma boa aproximação com uma distribuição exponencial [16, 33].

A Figura 5.1 mostra um exemplo do gráfico da CCDF (*Complementary Cumulative Distribution Function*) empírica do tempo entre encontros de um par de nós cujo *trace* de mobilidade foi gerado com o BonnMotion. A curva empírica foi ajustada a uma CCDF exponencial. O RMSE relativo entre as curvas é de apenas 2,12%,

⁴Disponível em <http://sys.cs.uos.de/BonnMotion/>

confirmando a boa aproximação da distribuição do tempo entre encontros com a exponencial quando o modelo de mobilidade é o *Steady State Random Waypoint*.

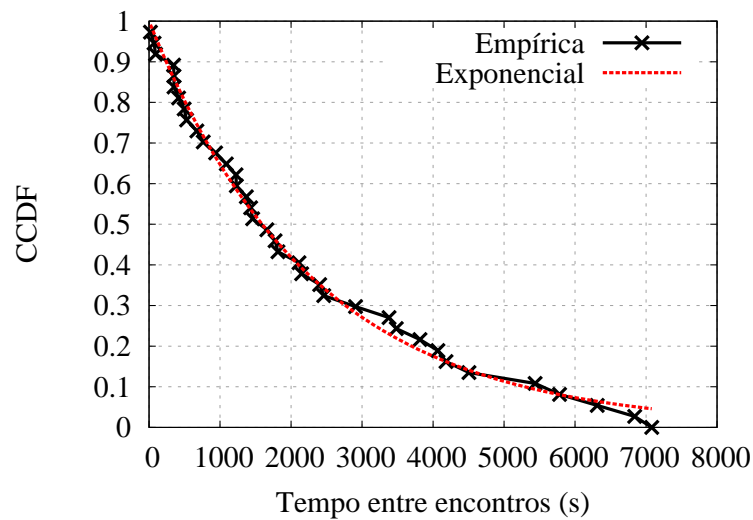


Figura 5.1: Exemplo de CCDF Empírica e Exponencial do tempo entre encontros de um par de nós seguindo o modelo de mobilidade *Steady State Random Waypoint* implementado no BonnMotion.

A geração dos *traces* é baseada em um arquivo de configuração onde são definidos os parâmetros básicos e os relacionados especificamente ao modelo de mobilidade específico. Os parâmetros básicos são o número de nós, as dimensões da área e a duração total do trace. No caso do modelo *Steady State Random Waypoint*, os parâmetros específicos são velocidade média, tempo de pausa médio e um valor que indica o intervalo de variação dos mesmos (*delta*) [49].

Capítulo 6

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados de simulação e modelagem para os dois modelos desenvolvidos neste trabalho.

O processo de validação de ambos os modelos foi realizado de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 5.

Para cada cenário são apresentados os resultados obtidos com simulação e modelagem para o atraso de entrega médio para diversos valores de k . Em alguns casos, o atraso de entrega par-a-par para um dado valor de k também é apresentado para ilustrar e detalhar a análise dos resultados.

Com a finalidade de mostrar a heterogeneidade entre as taxas de encontro dos pares e a ordem de grandeza dos valores, são apresentados os histogramas das taxas de encontro referente aos principais cenários analisados.

Os resultados referentes a cada modelo desenvolvido encontram-se separados em suas respectivas seções, Modelo I na Seção 6.1 e Modelo II na 6.2.

6.1 Modelo I

Esta seção apresenta os resultados de simulação e modelagem referentes ao Modelo I desenvolvido no Capítulo 3.

Para aplicar o Modelo I, é preciso definir os seguintes parâmetros, definidos como mostra a Tabela 3.1:

- $p_{i,j}^{\varphi}$: probabilidade de o nó i encaminhar a mensagem para o nó j durante um encontro, de acordo com a política de encaminhamento φ
- $\mu_{i,j}$: taxa de encontro para o par de nós (i,j)
- $E[T_i]$: valor esperado do tempo para o nó i encaminhar a mensagem
- $E[T_{i,j}]$: valor esperado do tempo para o nó i encaminhar a mensagem para o nó j

- $p_{i,j}$: probabilidade de o nó i encaminhar a mensagem para o nó j

O primeiro parâmetro é obtido diretamente a partir da política de encaminhamento. Então, para o esquema *k-copy* epidêmico descrito no Capítulo 5, cuja regra de encaminhamento é a do roteamento epidêmico, temos que $p_{i,j}^{\varphi} = 1, \forall i \neq j$ e $p_{i,i}^{\varphi} = 0$. O próximo passo é definir os valores das taxas de encontro efetivas $\mu_{i,j}$ que serão aplicados no modelo, para todos os pares (i, j) , $i \neq j$. Esses valores foram obtidos seguindo o método descrito no Capítulo 5.

Com relação aos demais parâmetros, quando o tempo entre encontros tem distribuição exponencial, o que significa que $M_{i,j} \sim \text{Exponencial}(\lambda_{i,j})$, temos que $E[T_{i,j}]$ e $p_{i,j}$ dependem de $\lambda_{i,j}$, que é igual a $\mu_{i,j}[1]$.

A resultado de interesse é o atraso de entrega médio, que trata-se do valor médio dos atrasos esperados para cada par considerando todos os pares (i, j) como um par origem-destino, sendo $i < j$.

Os resultados de simulação foram obtidos por meio de experimentos realizados com os simuladores ns-3 e MCS, conforme explicado no Capítulo 5, em especial nas Seções 5.1 e 5.2, respectivamente.

Os resultados obtidos com cada simulador estão separados nas duas subseções a seguir.

6.1.1 Resultados com o simulador MCS

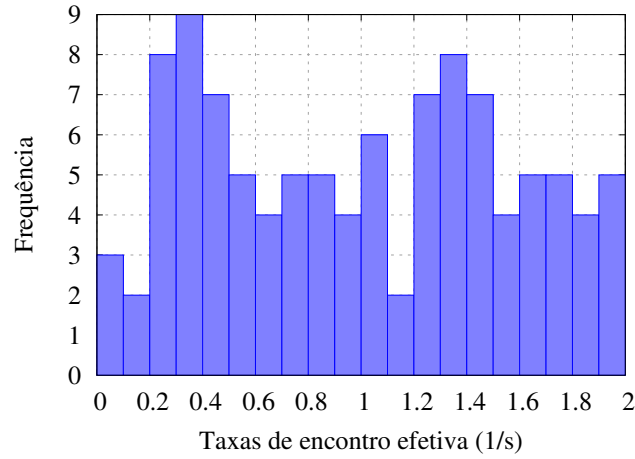
A seguir, é apresentada a comparação entre os resultados do simulador MCS e do Modelo I para três cenários heterogêneos com 15 nós: S1, S2 e S3. Os resultados são apresentados para o caso *two-copy*, ou seja, $k = 2$.

Os *traces* de encontros de cada um dos três cenários foram gerados pelo simulador MCS, por meio da definição das taxas de encontros de cada par, conforme explicado na Seção 5.2 do capítulo anterior. O cenário S1 é o cenário de comunidades descrito na referida seção. Os cenários S2 e S3 são descritos a seguir.

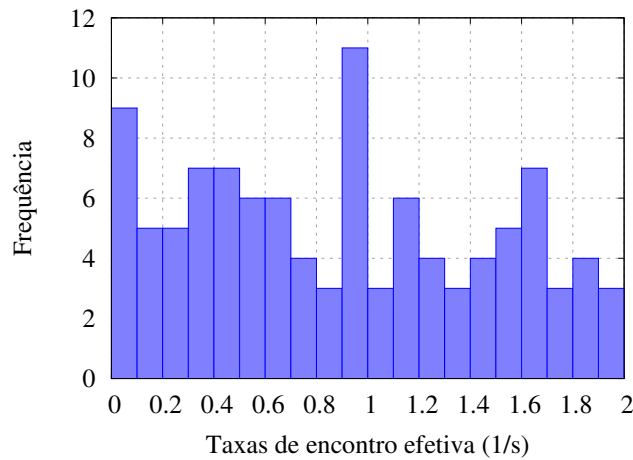
No cenário S2, as taxas de encontro são fixas no tempo, enquanto que, no cenário S3, as taxas variam ao longo do tempo. Para o cenário S3, o grau de variabilidade das taxas é de 50%. Nesses dois cenários, todos os pares se encontram (não há taxas de encontro nulas).

As Figuras 6.1-(a) e 6.1-(b) mostram os respectivos histogramas dos valores de taxas de encontro efetivas para S2 e S3. Em ambos os cenários tais valores são distribuídos entre 0 e 2 s^{-1} .

A Tabela 6.1 mostra a comparação entre modelagem e simulação para os cenários S1, S2 e S3. O resultado analítico é o valor médio com o desvio padrão correspondente. O resultado da simulação é o valor médio obtido com 200 rodadas, com intervalo de confiança de 98%. A métrica de comparação é o erro entre os valores



(a) Cenário S2.



(b) Cenário S3.

Figura 6.1: Histograma das taxas de encontro efetivas (1/s).

médios do atraso de entrega, relativo ao valor da simulação. Além do valor médio, é importante observar o intervalo de confiança e o desvio padrão dos resultados, que podem ser significativos em alguns casos. O erro obtido para os três cenários é bastante baixo, mostrando a boa acurácia do modelo, em especial para o cenário S2.

Tabela 6.1: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para cenários S1, S2 e S3, para $k = 2$. Resultados de simulação com intervalo de confiança de 98%.

Cenário	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Int Conf	
S1	1,7007	0,9219	1,6815	0,0615	1,14%
S2	0,5659	0,1056	0,5683	0,0107	0,42%
S3	0,6337	0,1095	0,6734	0,0135	5,89%

Nesta análise comparativa, é importante notar a influência da variabilidade das taxas no resultado do modelo. O modelo é bastante preciso para os cenários S1 e S2, de taxas fixas no tempo. Essa análise indica que, conforme esperado, no caso de as taxas apresentarem uma variação ao longo do tempo, a precisão do modelo é afetada.

Com relação ao grau de variabilidade do cenário S3, o grau de 50% não prejudicou a predição do modelo. Isso mostra que o modelo também pode ser aplicado mesmo para cenários onde as taxas variam.

6.1.2 Resultados com o simulador ns-3

Esta seção apresenta os resultados para o cenário S1_{ns3}, descrito a seguir. O cenário é composto por 10 nós, com alcance de transmissão de 25 m, que se movem com velocidade média de 10 km/h em uma área de 1500×300 m de acordo com o modelo de mobilidade *Steady State Random Waypoint* e demais características gerais descritas no capítulo anterior, Seção 5.1. A mobilidade dos nós é definida por meio de *traces* externos ao simulador, gerados com o *software* BonnMotion, conforme explicado na Seção 5.4 do capítulo anterior.

O tempo total de simulação é de 7 dias, longo o suficiente para que todas as mensagens sejam entregues, em todas as rodadas. As mensagens são geradas com uma taxa de $0,25 \cdot 10^{-3}$ mensagens por segundo, e as primeiras mensagens são geradas no tempo $t = 1000$ s. Dentre o total de 45 pares, 10 pares não se encontram nunca, ou seja, a taxa de encontro é nula.

A Figura 6.2 mostra os valores das taxas de encontro efetivas obtidas para o cenário S1_{ns3} com a metodologia explicada anteriormente. Os valores variam entre 0 e $1,8 \cdot 10^{-3}$, conforme mostra o histograma, sendo que 10 pares possuem taxa nula. Esses são os valores usados para configurar os parâmetros do modelo que dependem das taxas. Como mencionado anteriormente, quando o tempo entre encontros tem distribuição exponencial, o que significa que $M_{i,j} \sim \text{Exponencial}(\lambda_{i,j})$, a referência [1] mostra que os parâmetros $E[T_{i,j}]$ e $p_{i,j}$ dependem de $\lambda_{i,j}$, que é igual a $\mu_{i,j}$. Assim, definindo-se as taxas, temos os valores dos demais parâmetros do modelo.

Os resultados obtidos para o cenário S1_{ns3} são apresentados na Tabela 6.2 nos moldes da seção anterior. Nota-se que, para este cenário, o desvio entre modelo e simulação é maior do que para os experimentos feitos no simulador próprio. Esse aumento era esperado já que o simulador ns-3 considera os protocolos e aspectos operacionais de todas as camadas sem a abstração do simulador MCS. Além disso, o desvio é também devido à variabilidade das taxas de encontro, como mencionado anteriormente.

Uma técnica que pode ser utilizada para quantificar a variabilidade das taxas de

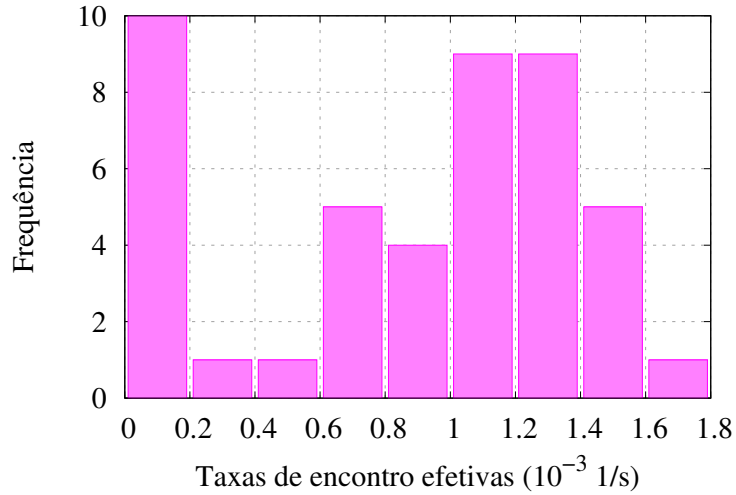


Figura 6.2: Histograma das taxas de encontro efetivas para o cenário $S1_{ns3}$.

Tabela 6.2: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário $S1_{ns3}$. Resultados de simulação com intervalo de confiança de 98%.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Int Conf	
1	1314,22	341,78	1190,29	39,00	10,41%
2	726,74	186,82	952,43	29,93	23,69%

encontro é dividir o *trace* de encontros em janelas e calcular as taxas de encontro de cada par para cada janela. Assim, é obtida uma sequência de valores para cada taxa de encontro. Uma métrica estatística para quantificar a variabilidade de uma amostra é o coeficiente de variação, que é dado pela razão entre o desvio padrão e o valor médio da amostra. Um coeficiente muito alto indica uma alta variação dentre os valores da amostra em relação ao valor médio. O coeficiente de variação da sequência de valores da taxa a cada janela serve como uma métrica de variabilidade das taxas ao longo do tempo.

Considerando o método anterior, o coeficiente de variação médio (valor médio para os coeficientes de todos os pares de nós) obtidos para o cenário $S1_{ns3}$ é de 1,24, dividindo o *trace* em 30 janelas. O cenário S3 (da seção anterior) apresenta um coeficiente médio de 0,30 para o mesmo número de janelas. Esses dois cenários apresentam variação das taxas ao longo do tempo. Em S3, esta variação é controlada pelo grau de variabilidade, no caso de 50%, como explicado na seção anterior. Em $S1_{ns3}$, a variação é intrínseca ao *trace* de mobilidade utilizado.

A variação das taxas de encontro no cenário $S1_{ns3}$ é muito maior do que no cenário S3, sendo este o principal fator responsável pelo maior desvio no resultado

analítico.

A título de comparação, considere um segundo cenário simulado no ns-3 cujo *trace* também foi gerado com o BonnMotion, chamado $S2_{ns3}$. Este cenário é composto por 15 nós, com alcance de transmissão de 25 m, que se movem com velocidade média de 20 km/h em uma área de 1000×1000 m de acordo com o modelo de mobilidade *Steady State Random Waypoint* e demais características gerais comuns ao cenário $S1_{ns3}$. O coeficiente de variação médio para esse cenário, dividindo o *trace* também em 30 janelas, é de 0,35, bem menor do que o do cenário $S1_{ns3}$. Para esse segundo cenário, o erro relativo do modelo também é bem menor, sendo de 1,07%.

6.2 Modelo II

Esta seção apresenta os resultados de comparação entre simulação e modelagem referente ao Modelo II. Para a realização dos experimentos de simulação, foram utilizados o simulador próprio MCS e o simulador The ONE, ambos descritos no capítulo anterior, Seção 5.2 e Seção 5.3, respectivamente.

Foram utilizados três tipos diferentes de *traces* de encontros. As Seções 6.2.1 e 6.2.2 apresentam os resultados obtidos com *traces* sintéticos gerados por meio do simulador MCS e por meio da ferramenta BonnMotion, respectivamente. As Seções 6.2.3 e 6.2.4 apresentam os resultados para *traces* reais.

O objetivo é comparar os resultados do atraso de entrega médio obtidos com a modelagem e com os experimentos de simulação. A métrica de comparação é o erro relativo, módulo da diferença entre os resultados de simulação e modelagem, relativo ao valor da simulação.

Além dos resultados referentes à predição do modelo, este capítulo apresenta uma análise da variabilidade das taxas de encontro ao longo do tempo, com a definição de três métricas propostas para mensurar numericamente tal variabilidade para cada cenário. A última seção deste capítulo, Seção 6.2.5, apresenta a consolidação da referida análise, incluindo a definição de limiares para as três métricas de variabilidade.

6.2.1 Traces gerados pelo simulador MCS

Nesta seção, serão apresentados os resultados referentes à uma família de dez cenários cujos *traces* de encontros foram gerados pelo simulador MCS de acordo com o método explicado no Capítulo 5, Seção 5.2.

Os *traces* de encontros gerados foram convertidos para o formato compatível com simulador The ONE. Como descrito na Seção 5.3, o simulador exige um tempo de início e fim de conexão. Para tal, foi considerado como tempo de início o tempo

de encontro registrado no *trace* gerado, e a duração total de conexão foi definida em 1 s, suficiente para que haja troca de mensagens nos experimentos realizados.

Os cenários são identificados como A1 até A10. Todos são compostos por 10 nós e todos os pares de nós se encontram (não há taxas de encontros nulas). Cada *trace* é gerado com base nos valores iniciais das taxas de encontro e no grau de variabilidade. A duração total de cada *trace* gerado é de 30 dias.

As taxas de encontro iniciais de cada par foram sorteadas aleatoriamente a partir do intervalo $(0,002-0,02) \text{ s}^{-1}$ e são as mesmas para os dez cenários. O cenário A1 é o único no qual as taxas são constantes ao longo do tempo. Os demais cenários possuem diferentes graus de variabilidade, conforme mostra a Tabela 6.3. Em cada cenário, todos os pares possuem o mesmo grau de variabilidade. Nota de observação:

Tabela 6.3: Grau de variabilidade (%) para as taxas de encontro definido para os cenários A1 a A10.

Cenário	Grau de variabilidade (%)
A1	0
A2	50
A3	80
A4	95
A5	98
A6	99
A7	99,7
A8	99,9
A9	99,95
A10	99,99

Esta família de cenários foi escolhida de forma a mostrar uma boa diversidade entre os valores de desvio obtidos pelo modelo. Foi observado que para se obter maiores valores de erro era preciso definir valores acima de 50% para o grau de variabilidade. Foi observado também que para valores desse grau acima de 98%, o erro subia rapidamente com o aumento do mesmo, por isso os cenários A6 e A10 possuem graus de variabilidade parecidos.

Cada cenário possui valores distintos para as taxas efetivas de cada par, uma vez que cada cenário possui um grau de variabilidade distinto. Os valores das taxas efetivas nos cenários A2 a A10 serão bastante diferentes dos valores das taxas iniciais.

A Figura 6.3 mostra os valores das taxas de encontro efetivas do cenário A1. Os pares de nós possuem taxas de encontro bastante heterogêneas entre si, com pares que se encontram muito mais do que outros.

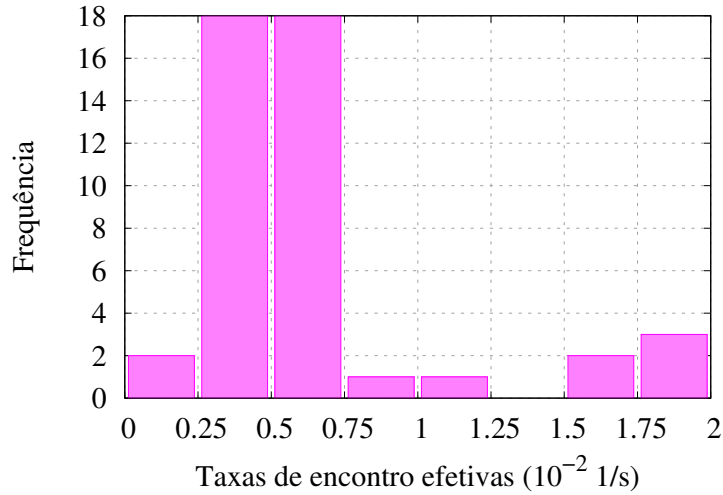


Figura 6.3: Histograma das taxas de encontro efetivas do cenário A1.

Resultados de modelagem e simulação

A Tabela 6.4 apresenta o comparativo entre os resultados de modelagem e de simulação do atraso de entrega médio para o cenário A1, para valores de k de 1 a 6. O resultado da simulação foi obtido com 2000 amostras. Cabe ressaltar o ajuste fino do modelo para todos os valores de k .

Tabela 6.4: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A1.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	174,164	38,357	175,152	30,517	0,56%
2	95,681	20,684	96,448	20,789	0,79%
3	77,748	16,034	78,291	17,931	0,69%
4	70,770	13,969	71,362	16,518	0,82%
5	67,680	12,967	67,898	15,219	0,32%
6	66,214	12,459	66,456	14,747	0,36%

Para uma análise mais detalhada dos resultados, uma outra abordagem é comparar o atraso **par-a-par**. A Figura 6.4 mostra a comparação entre o atraso de entrega par-a-par para $k = 1$ obtido com o simulador The ONE e com o Modelo II, para o cenário A1. Como o cenário possui 10 nós, temos 45 pares $(i, j), i < j$, indexados de 0 a 44 na Figura. O resultado da simulação apresenta o valor médio, com respectivo intervalo de confiança de 98%. Note que todos os valores do modelo encontram-se dentro do intervalo de confiança.

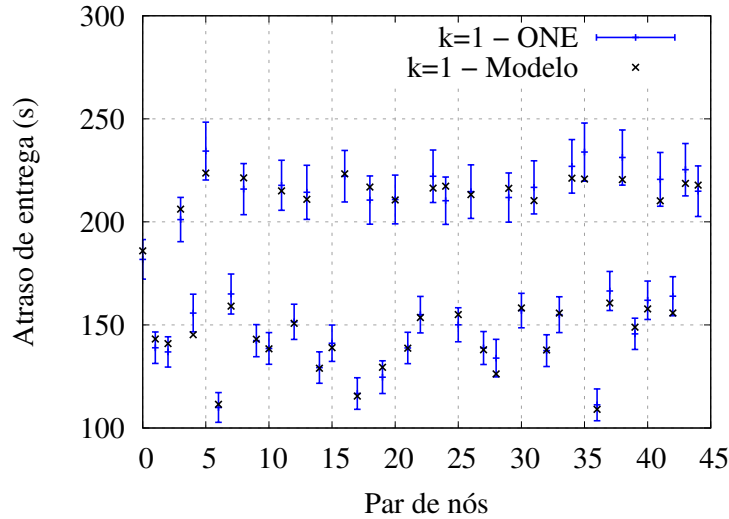


Figura 6.4: Atraso de entrega par-a-par para $k = 1$ obtido com o simulador The ONE e com o Modelo II, para o cenário A1.

Influência do valor de k

A grande vantagem de um processo de encaminhamento *multi-copy* é permitir uma entrega mais rápida. Conforme aumenta-se o limite para o número total de cópias na rede, espera-se que haja uma melhora no desempenho, ou seja, que o valor de atraso de entrega diminua. A questão é saber qual o valor de k é suficiente para se obter uma redução significativa no atraso, em relação ao caso *single-copy*.

A Figura 6.5 apresenta a variação do atraso de entrega médio com o aumento do valor de k nos resultados de simulação, para o cenário A1. O gráfico mostra uma queda acentuada no início, com tendência a estabilizar para valores mais altos de k . No caso do cenário A1, aumentar o número de cópias de 1 para 2, por exemplo, reduziu o atraso em 44,93%, demonstrando um ganho significativo em desempenho. Pode-se observar que não vale a pena utilizar um valor alto para k pois a relação custo/benefício não se mostra vantajosa. Comparando, por exemplo, os valores 5 e 10, o ganho na redução do atraso é de apenas 1,69%, sendo que o gasto de recursos da rede para 10 cópias é muito maior do que para 5 cópias, em geral.

O cálculo do aumento do gasto de recursos em função do aumento do número de cópias está fora do escopo deste trabalho. Entretanto, este modelo pode ser utilizado para se obter a redução do atraso de entrega esperado na rede a cada acréscimo no valor de k , e essa informação pode ser usada na escolha desse valor para cada cenário.

A Tabela 6.5 apresenta os valores da redução no atraso de entrega médio em relação a $k = 1$ para os valores de k apresentados na Figura 6.5.

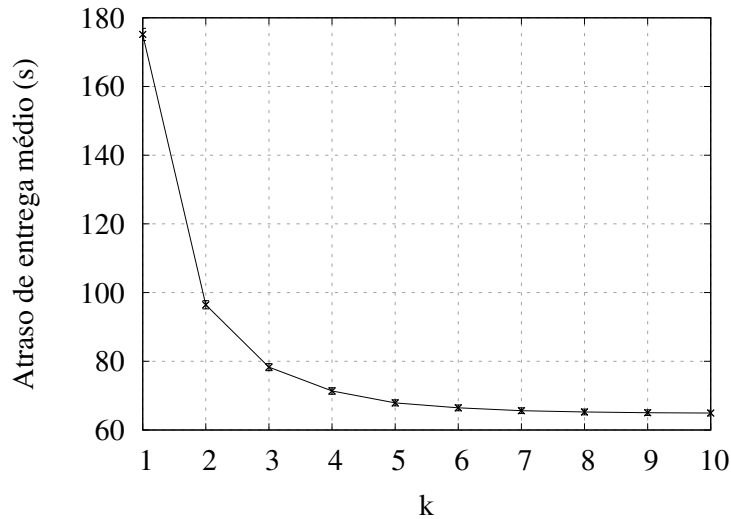


Figura 6.5: Resultados de simulação do atraso de entrega médio com o aumento do valor de k , para o cenário A1.

Tabela 6.5: Redução no atraso de entrega médio em relação a $k = 1$, para o cenário A1.

k	Redução no atraso em relação a $k = 1$
2	44,93%
3	55,30%
4	59,25%
5	61,23%
6	62,05%
7	62,53%
8	62,75%
9	62,86%
10	62,92%

Influência do grau de variabilidade

Após a validação do modelo com um cenário bem comportado, isto é, que atende plenamente os requisitos do modelo, a seguir serão apresentados os resultados para outros nove cenários para os quais foi definido um grau de variabilidade não nulo, variando entre 50% e 100%. O método de geração do *trace* de encontros de cada cenário foi o mesmo utilizado para o cenário A1, usando como ferramenta o simulador MCS, conforme explicado no capítulo anterior, Seção 5.2. Cabe ressaltar que a geração das amostras para os tempos entre encontros permanece seguindo uma distribuição exponencial.

A primeira análise a ser feita é com relação ao ajuste da distribuição dos tempos entre encontros de cada par com uma distribuição exponencial, que é um dos requisitos do modelo. O objetivo é descartar a possibilidade de que o requisito da

distribuição exponencial não seja atendido. A métrica de comparação nesta análise é o RMSE obtido com o método de melhor ajuste entre a CCDF empírica e a CCDF exponencial correspondente. Para tal foi utilizada a função *fit* do programa *gnuplot*¹. Para cada par de nós que se encontra é obtido um valor de RMSE.

A Tabela 6.6 apresenta os valores médios para o RMSE e o RMSE normalizado para os cenários A1 a A10. A normalização do RMSE foi feita em relação ao valor médio dos valores da amostra. Pode-se observar na tabela que quanto maior o grau de variabilidade, maior o valor do RMSE. Quanto maior o RMSE, menor o ajuste da distribuição do tempo entre encontros com uma distribuição exponencial. Entretanto, cabe ressaltar que tais valores são baixos, o que indica que as referidas distribuições podem ser consideradas como muito próximas de uma exponencial, e esse requisito pode então ser atendido.

Tabela 6.6: RMSE médio, absoluto e normalizado, para ajuste entre CCDF empírica e exponencial para as variáveis de tempo entre encontros dos cenários A1 a A10.

Cenário	RMSE médio	RMSE Normalizado médio (%)
A1	0,002288	0,45
A2	0,007624	1,52
A3	0,021668	4,33
A4	0,034048	6,81
A5	0,037121	7,42
A6	0,038490	7,69
A7	0,039929	7,98
A8	0,039925	7,98
A9	0,040207	8,04
A10	0,040820	8,16

A seguir, vamos analisar o impacto da variabilidade das taxas ao longo do tempo na predição do modelo.

A Tabela 6.7 apresenta os resultados para o atraso de entrega médio referente aos cenários A1 a A10 para $k = 1$. Nota-se que quanto maior o grau de variabilidade, maior o erro. Considerando um limiar de 20% um valor razoável de desvio, os cenários A1 a A4 apresentam um bom resultado, com erro de até 15%. Esta análise mostra que a variabilidade das taxas de encontro não pode ser muito alta, de modo a ser possível que a mesma seja considerada constante ao longo do tempo para fins de modelagem. Para esta família de cenários, o limiar para o grau de variabilidade é de 95%, referente ao cenário A4.

Cabe ressaltar que o modelo apresenta certa flexibilidade quanto ao atendimento dos requisitos de aplicabilidade, pois apresenta bons resultados mesmo para cenários

¹Referência: <http://www.gnuplot.info/>

Tabela 6.7: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para os cenários A1 a A10, para $k = 1$.

Cenário	Grau de variabilidade (%)	Modelagem		Simulação		Erro relativo
		Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
A1	0	174,164	38,357	175,152	30,517	0,56%
A2	50	190,941	41,415	194,543	42,857	1,92%
A3	80	239,217	51,998	259,170	48,878	7,69%
A4	95	335,330	72,248	393,071	84,249	14,69%
A5	98	405,770	87,772	541,762	132,708	25,01%
A6	99	468,637	103,751	663,816	180,095	29,40%
A7	99,7	571,458	122,558	898,739	302,352	36,41%
A8	99,9	688,131	138,175	1363,170	597,008	49,52%
A9	99,95	741,954	170,828	1515,270	592,034	51,02%
A10	99,99	843,175	209,324	1730,210	763,615	53,48%

com taxas de encontro que variam, como os cenários A2 e A3 cujos erros são baixos, de 1,92% e 7,69%, respectivamente.

A seguir, são apresentados os resultados para os cenários A2 a A10 nas Tabelas 6.8 a 6.16, para os valores de k de 1 a 5. Pode-se observar que os valores do erro são próximos uns dos outros para valores diferentes de k mostrando que a acurácia do modelo não depende do valor de k .

Tabela 6.8: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A2. Grau de variabilidade: 50%.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	190,941	41,415	194,543	42,857	1,92%
2	104.910	22.370	106,873	22,980	1,84%
3	85.252	17.364	87,073	17,795	2,09%
4	77.608	15.140	79,246	15,510	2,07%
5	74.226	14.062	75,723	14,330	1,98%

Tabela 6.9: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A3. Grau de variabilidade: 80%.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	239,217	51,998	259,170	48,878	7,69%
2	131,398	28,095	142,883	32,9593	8,04%
3	106,761	21,805	117,026	29,267	8,77%
4	97,175	19,010	106,716	26,940	8,94%
5	92,929	17,652	101,771	25,514	8,69%

Tabela 6.10: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A4. Grau de variabilidade: 95%.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	335,330	72,248	393,071	84,249	14,69%
2	184,383	39,099	219,234	56,383	15,89%
3	149,948	30,419	182,724	50,964	17,94%
4	136,577	26,578	166,929	47,50751	18,18%
5	130,670	24,720	159,161	45,309	17,90%

Tabela 6.11: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A5. Grau de variabilidade: 98%.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	405,770	87,772	541,762	132,708	25,01%
2	223,011	47,5573	301,284	86,730	25,98%
3	181,313	36,977	252,026	77,854	28,06%
4	165,098	32,276	230,483	72,577	28,37%
5	157,920	29,997	219,497	69,27363	28,05%

Tabela 6.12: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A6. Grau de variabilidade: 99%.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	468,637	103,751	663,816	180,095	29,40%
2	257,649	55,842	369,798	119,896	30,33%
3	209,453	43,243	311,86	108,536	32,83%
4	190,729	37,670	285,619	101,591	33,22%
5	182,450	34,977	271,678	96,643	32,84%

Tabela 6.13: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A7. Grau de variabilidade: 99,7%.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	571,458	122,558	898,739	302,352	36,41%
2	313,779	66,2913	505,840	195,724	37,97%
3	254,853	51,550	429,622	175,609	40,68%
4	231,920	45,020	394,200	164,630	41,17%
5	221,768	41,858	375,157	158,035	40,88%

Tabela 6.14: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A8. Grau de variabilidade: 99,9%.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	688,131	138,175	1363,170	597,008	49,52%
2	377,469	75,644	760,275	378,184	50,35%
3	306,398	59,165	659,288	349,584	53,52%
4	278,767	51,737	609,231	332,129	54,24%
5	266,559	48,070	580,192	320,578	54,05%

Tabela 6.15: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A9. Grau de variabilidade: 99,95%.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	741,954	170,828	1515,270	592,034	51,02%
2	407,075	91,691	861,042	394,344	52,72%
3	330,326	71,110	747,922	369,695	55,83%
4	300,355	62,122	690,046	352,272	56,47%
5	287,020	57,804	657,017	339,480	56,31%

Tabela 6.16: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário A10. Grau de variabilidade: 99,99%.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	843,175	209,324	1730,210	763,615	53,48%
2	461,811	113,397	993,321	513,991	53,50%
3	375,554	88,949	869,164	485,176	56,79%
4	341,507	78,375	806,224	465,815	57,64%
5	326,122	73,398	769,507	450,967	57,62%

Análise da variabilidade das taxas de encontro

Uma das aplicações desta modelagem é obter o atraso de entrega esperado para um determinado cenário a partir de um *trace* de encontros. Para tal, o modelo requer as taxas de encontros, que podem ser obtidas diretamente do *trace* conforme explicado anteriormente.

A grande questão é: É possível considerar que as taxas são constantes no tempo? O valor de taxa efetiva obtido é representativo do comportamento de encontros do par? Mesmo em cenários sintéticos e bem comportados como o cenário A1, a variabilidade não é nula, ela é baixa mas existe. Logo, a questão não é definir se a taxa varia, mas sim analisar o quanto essa variação afeta a aplicabilidade do modelo.

O grau de variabilidade é uma métrica relacionada apenas aos *traces* gerados pelo simulador MCS. É preciso definir um método de análise da variabilidade das taxas que possa ser aplicado em qualquer *trace* de encontros, vindos de outras fontes. A finalidade é poder definir se determinado cenário se encaixa nas características do tipo de cenário para o qual o modelo foi desenvolvido. Em alguns casos, uma análise qualitativa das características do cenário não é suficiente para tomar uma decisão, então é interessante que haja um método objetivo para tal.

O coeficiente de variação (CV) é um bom parâmetro estatístico para representar de forma normalizada a variabilidade de uma amostra em torno da média. Na Seção 6.1.2 foi usado um método de análise dividindo o *trace* de encontros em janelas e obtendo o valor do CV das taxas ao longo das janelas de tempo. Esse método deve ser usado com cautela pois o CV médio (média dos coeficientes de todos os pares de nós) aumenta com o número de janelas utilizado, como mostra o exemplo da Figura 6.6. A Figura mostra o exemplo de três cenários descritos anteriormente, A1, A4 e A10, que apresentam valores de erros (erro do modelo relativo à simulação) bem diferentes. Pode-se observar que, para cenários onde as taxas são praticamente constantes, caso do cenário A1, essa questão não apresenta impacto, pois as taxas realmente não variam ao longo do *trace*. Mas quando isso ocorre, para um mesmo cenário, o CV médio pode variar muito dependendo do número de janelas, como é o caso do cenário A10.

Sendo assim, surge a questão de definir um valor ótimo para o número de janelas. Entretanto, esse valor vai depender do tempo total de cada *trace*, pois é preciso uma quantidade adequada de observações para o cálculo do CV. Isso não é um problema para os cenários mostrados na Figura 6.6, mas pode ser para cenários cujos *traces* disponíveis são de curta duração como é o caso de alguns *traces* reais. Logo, este método não deve ser usado de forma generalizada. A seguir, é proposto um outro método para a análise da variabilidade das taxas de encontro.

Considere um *trace* de encontros a partir do qual são obtidos W valores de tempo

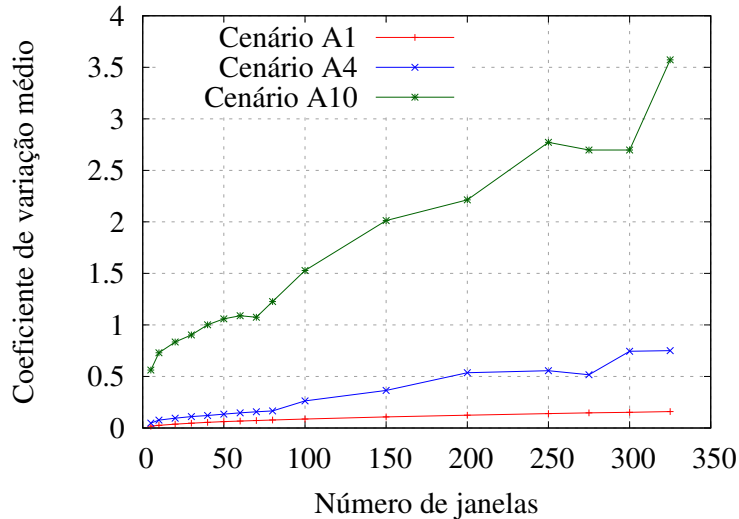


Figura 6.6: Exemplo. Coeficiente de variação médio das taxas de encontro obtidas para cada janela do *trace* de encontros, em função do número de janelas utilizado, para cenários A1, A4 e A10.

entre encontros para o par (i, j) . Seja $\mu_{i,j}^{(w)}$ a taxa de encontro obtida com w valores de tempo entre encontros do par (i, j) , ou seja, $\mu_{i,j}^{(w)} = w / \sum_{u=1}^w m_{i,j}^{(u)}$, onde $m_{i,j}^{(u)}$ é o valor do u -ésimo tempo entre encontros. A sequência de valores de $\mu_{i,j}^{(w)}$ para $w = 1, \dots, W$ representa uma variação discreta da taxa de encontro do par (i, j) ao longo do tempo. Note que o valor da taxa efetiva é dado por $\mu_{i,j}^{(W)}$, o último valor da sequência.

A Figura 6.7 mostra a sequência de valores das taxas $\mu_{i,j}^{(w)}$ para um cenário real de exemplo identificado como R1. Esse cenário é composto por 5 nós, identificados de 0 a 4, cujo *trace* de encontros foi extraído do *trace* real Infocom 2006, que será descrito na Seção 6.2.4. O cenário R1 foi criado com o objetivo de ilustrar esta análise. Como o mesmo contém apenas 5 nós, é possível obter uma visualização mais clara da dinâmica de encontros par-a-par. Dentre os 10 pares de nós do cenário, apenas 5 pares se encontram. A Figura 6.7 mostra a variação da taxa para esses pares.

A primeira observação a ser feita é quanto à heterogeneidade entre os pares, tanto em termos de valores absolutos das taxas quanto no comportamento da variabilidade das mesmas. O par $(3,4)$ é o mais "bem comportado". A variação é grande no início, porém logo se estabiliza em valores muito próximos ao último, que corresponde à taxa efetiva. O par $(1,2)$ tem comportamento parecido, porém sofre uma queda no final da sequência. Os pares $(0,3)$ e $(0,4)$ são os que apresentam maior variação, sendo que este último nem mesmo apresenta uma estabilização no final. Outra observação é quanto ao tamanho da amostra, que é diferente para cada par. O cenário R1 foi simulado no simulador MCS e o erro relativo entre modelagem e simulação (com 10

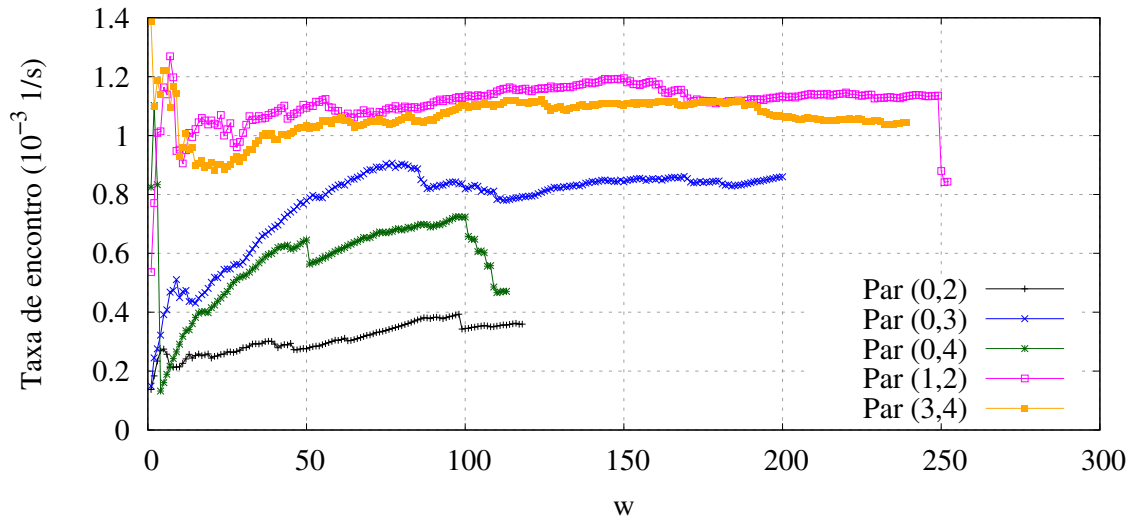


Figura 6.7: Taxas de encontro $\mu_{i,j}^{(w)}$ para os pares do cenário R1.

mil rodadas) para $k = 1$ foi de 13%.

Considere agora o cenário R2, um segundo extrato do *trace* real Infocom 2006 também com 5 nós, sendo que os nós 0, 3 e 4 são os mesmos do cenário R1, logo os pares (0,3), (0,4) e (3,4) são os mesmos de R1. Neste cenário, 7 dos 10 pares se encontram. O comportamento das taxas $\mu_{i,j}^{(w)}$ para esse cenário é mostrado na Figura 6.8. O par (1,3) chama a atenção, pois, além de possuir uma amostra menor, não apresenta qualquer tendência a estabilizar. O erro relativo entre os resultados de simulação e modelagem para este cenário é de 21%.

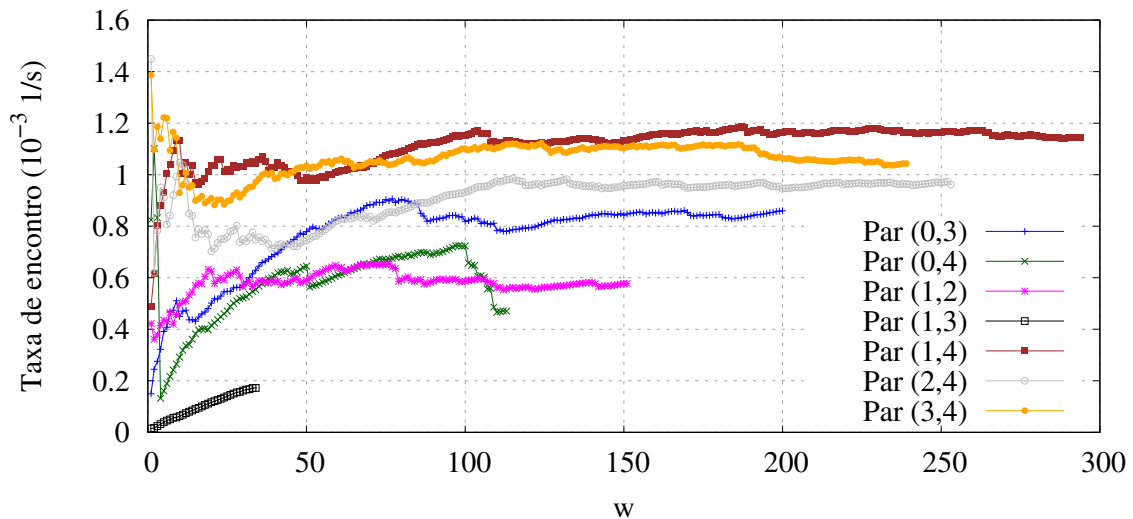


Figura 6.8: Taxas de encontro $\mu_{i,j}^{(w)}$ para os pares do cenário R2.

Considere, finalmente, o cenário R3 também com 5 nós, sendo que apenas o nó 0 é diferente do cenário R1. A Figura 6.9 mostra a comparação entre os pares diferentes de R1 e R3. Os três pares de R3 têm um comportamento bastante variável para a taxa, com destaque para o par (0,1) que apresenta a maior amplitude entre os valores iniciais e finais. Seguindo o mesmo procedimento e mesma quantidade de rodadas, o cenário R3 apresenta um desvio enorme entre modelagem e simulação, com erro relativo de 106%.

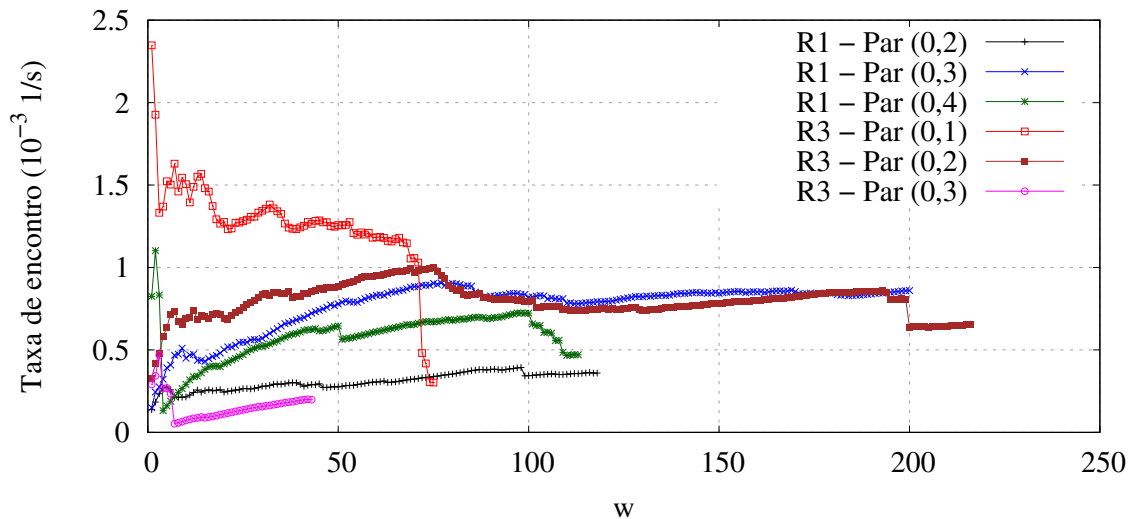


Figura 6.9: Comparação das taxas de encontro $\mu_{i,j}^{(w)}$ entre os pares diferentes dos cenários R1 e R3.

A análise empírica destes três cenários reais ilustra mais uma vez a ideia de que a variabilidade das taxas têm influência no desvio obtido com o modelo, que considera que as mesmas são constantes ao longo do tempo. A comparação entre os cenários mostra que, como esperado, quando existem pares com uma alta variabilidade, o modelo não pode ser aplicado, como é o caso do cenário R3.

A questão agora é como mensurar esta variabilidade de modo a ser capaz de obter um limiar de aplicabilidade do modelo. Existem métricas estatísticas que auxiliam na análise quantitativa da variabilidade de uma amostra. Uma delas é o coeficiente de variação, já mencionado. A Tabela 6.17 mostra os valores do coeficiente de variação das taxas $\mu_{i,j}^{(w)}$, par-a-par e o valor médio, para os cenários R1, R2 e R3. Observa-se que o aumento do coeficiente corresponde a um aumento também no erro obtido pelo modelo, porém os valores são muito parecidos. O cenário R3 é totalmente fora do escopo do modelo, como veremos adiante, mas isto não fica caracterizado apenas por essa métrica.

Após a realização de inúmeros experimentos, usando *traces* sintéticos e reais, e uma extensiva análise de resultados, concluiu-se que existem pelo menos três métri-

Tabela 6.17: Coeficiente de variação, par-a-par e valor médio, das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}$, $w = 1, \dots, W$, para os cenários R1, R2 e R3. (*) Este par não se encontra.

Par	R1	R2	R3
(0,1)	*	*	0,221
(0,2)	0,165	*	0,124
(0,3)	0,189	0,189	0,502
(0,4)	0,255	0,255	*
(1,2)	0,064	0,087	0,064
(1,3)	*	0,482	*
(1,4)	*	0,071	*
(2,3)	*	*	*
(2,4)	*	0,101	*
(3,4)	0,059	0,059	0,059
Média	0,1464	0,1778	0,1943

cas que podem ser utilizadas na análise da variabilidade, e devem ser avaliadas em conjunto. A primeira é o próprio coeficiente de variação discutido previamente, e outras duas estão relacionadas ao desvio da amostra em relação à taxa efetiva. As três métricas são:

- CV_μ : Valor médio do coeficiente de variação da sequência $\{\mu_{i,j}^{(1)}, \dots, \mu_{i,j}^{(W)}\}$, considerando todos os pares de nós que se encontram. Para utilizar um valor único para o cenário é calculado o valor médio dos coeficientes.
- D_μ : Valor médio do desvio (módulo da diferença) entre as taxas $\mu_{i,j}^{(w)}$ e a taxa efetiva, relativo à taxa efetiva, para $w = 1, \dots, W$, considerando todos os pares de nós que se encontram. Para utilizar um valor único para o cenário é calculado o valor médio dos desvios ao longo da amostra e considerando todos os pares de nós. A comparação com a taxa efetiva é importante pois esse é o valor de taxa usado no Modelo. Em alguns casos, a sequência de valores discretos da taxa ao longo do tempo não apresenta grande variação ao longo da amostra, apresentando um coeficiente de variação baixo, porém o desvio desses valores em relação à taxa efetiva é alto. Isto ocorre no cenário R3, cujo valor de D_μ é de 82,72% (o par (0,1) possui D_μ de 318,67%), correspondendo ao alto erro do modelo. Os cenários R1 e R2 possuem um desvio de 19,45% e 15,31%, respectivamente.
- $D_\mu^{(1)}$: Métrica D_μ considerando apenas o primeiro valor da amostra de cada par, isto é, valor médio do desvio de $\mu_{i,j}^{(1)}$ em relação à taxa efetiva, para todos os pares que se encontram. Quando o valor inicial da sequência $\mu_{i,j}^{(w)}$ é muito distante do valor final, o erro do modelo em geral também é alto, sendo este

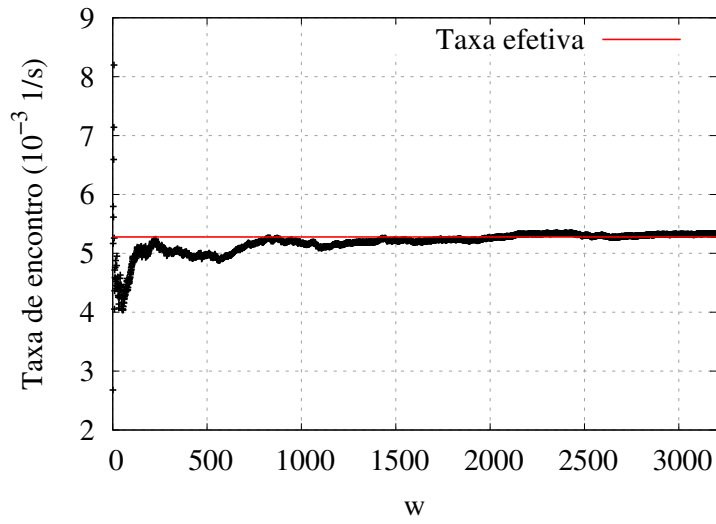
um fator relevante para a análise. Os valores para os cenários R1, R2 e R3 são 57,78%, 59,59% e 168,41%, respectivamente. O valor de R3 chama atenção também nesta métrica.

Voltando aos cenários da família A1 a A10, a Figura 6.10 apresenta exemplos da variação da taxa de encontro ao longo do tempo conforme o método descrito, para o par (1,2) dos cenários A1, A3 e A10. A letra (a) refere-se ao par do cenário A1, onde existe uma certa variação nos primeiros valores da sequência, mas que logo estabiliza no valor muito próximo ao da taxa efetiva. A letra (b) apresenta o gráfico para o par do cenário A3 que mostra uma maior variação dos valores, além de precisar de mais amostras para se atingir valores próximos ao da taxa efetiva. Note a escala de w no gráfico, com quase 10 mil valores, bem mais do que o mostrado nos outros gráficos. A letra (c) refere-se ao cenário A10, que evidencia a variação dos valores ao longo da amostra. Note também a diferença entre os valores da sequência e o último valor, que é a taxa efetiva.

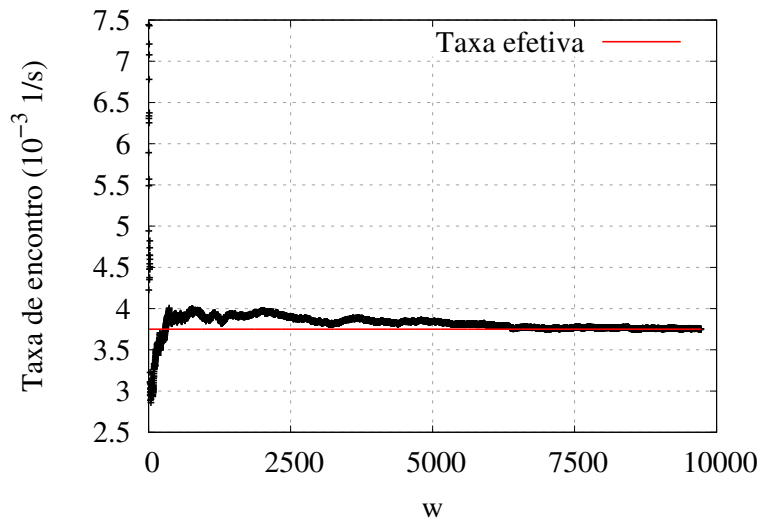
Os valores dos coeficientes de variação médios para os referidos pares são de 0,0206, 0,0374 e 0,1607, respectivamente, para os cenários A1, A3 e A10. Os valores são crescentes e coerentes com a análise.

Os valores do desvio médio relativo à taxa efetiva para os referidos pares são de cerca de 1%, 2% e 20%, respectivamente, para os cenários A1, A3 e A10. Note que a sequência do par do cenário A2 possui coeficiente de variação semelhante à de A1, mas o desvio é o dobro.

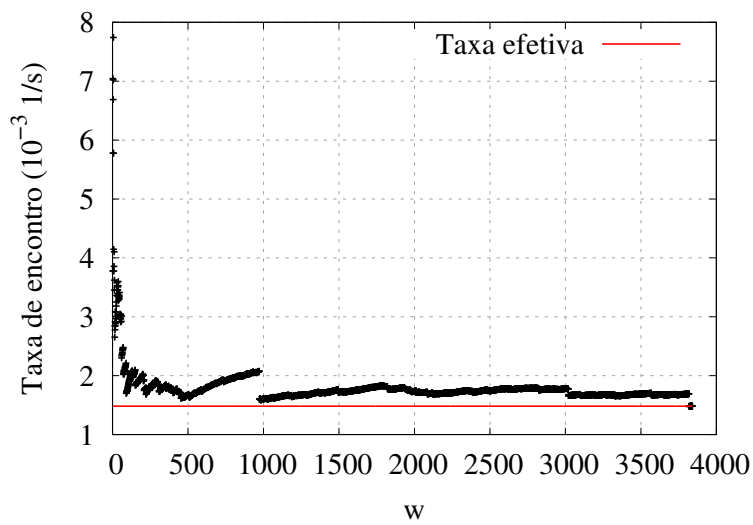
E, finalmente, os valores do desvio do primeiro valor da sequência para os referidos pares são de 49%, 57% e 155%, respectivamente, para os cenários A1, A3 e A10.



(a) Cenário A1 - Par (1,2)



(b) Cenário A3 - Par (1,2)



(c) Cenário A10 - Par (1,2)

Figura 6.10: Taxas de encontro $\mu_{i,j}^{(w)}$ para o par (1,2) do cenário A1, A3 e A10.

A Tabela 6.18 apresenta as três métricas de variabilidade, para todos os cenários A1 a A10. A última coluna mostra novamente o erro do modelo para $k = 1$ para lembrar que os cenários estão ordenados de forma crescente com este erro e para visualizar sua variação com as métricas. Pode-se observar que os cenários apresentam erros maiores quanto maior for o desvio D_μ . O erro do modelo é crescente com esta métrica, porém não há a mesma correlação direta com as outras duas métricas. Como as métricas são o valor médio para todos os pares, o valor final será alto se todos os valores par-a-par forem altos, porém em casos intermediários, onde houverem pares mais bem comportados do que outros, a comparação entre as métricas de cenários diferentes pode não ser diretamente proporcional. Os valores do desvio $D_\mu^{(1)}$ chamam atenção por serem muito altos, até mesmo para o cenário A1. Os cenários cujo erro do modelo é maior do que 20% apresentam valores acima de 1000%, limiar definido para esta métrica.

Tabela 6.18: Métricas de variabilidade das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}$, $w = 1, \dots, W$, para os cenários A1 a A10. A última coluna indica o valor do erro do Modelo II, relativo à simulação, para $k = 1$.

Cenário	CV_μ	D_μ (%)	$D_\mu^{(1)}$ (%)	Erro do modelo para $k = 1$
A1	0,0488	1,1	313	0,56%
A2	0,0591	1,4	459	1,92%
A3	0,1263	1,9	963	7,69%
A4	0,1428	3,6	586	14,69%
A5	0,2545	5,1	1277	25,01%
A6	0,5237	8,2	3713	29,40%
A7	0,3736	12,9	1334	36,41%
A8	0,4053	18,9	1722	49,52%
A9	0,4464	20,4	1324	51,02%
A10	0,4599	62,7	1337	53,48%

Cabe observar que existem outros fatores que influenciam a análise, porém possuem uma avaliação menos objetiva e mais qualitativa. O primeiro é o tamanho da amostra. Esse fator se aplica principalmente a *traces* reais, que, por vezes, são de curta duração, com uma quantidade de eventos de encontros registrados que não é suficiente para se realizar um análise estatística de qualidade.

O segundo é o fato de existirem pares que não se encontram. Se a taxa de encontro é nula, ela não varia. Comparando dois cenários cujas taxas apresentam comportamentos de variabilidade semelhantes, no cenário onde há mais pares com taxa nula, os desvio D_μ tem maior relevância. Por exemplo, em um certo cenário simulado a partir de um *trace* real, 30% dos pares não se encontram. Esse cenário apresentou desvio D_μ de 19% e erro de predição do modelo de 13%. Um segundo cenário apresentou desvio D_μ de 15%, menor que o anterior, mas um erro de predição

de 20%. Neste segundo cenário, metade dos pares não se encontra.

6.2.2 Trace gerado com BonnMotion

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para um *trace* gerado com a ferramenta BonnMotion, apresentada no Capítulo 5, Seção 5.4. Essa ferramenta oferece a opção de gerar *traces* de mobilidade e convertê-los para o formato compatível com o simulador The ONE.

A seguir são apresentados os resultados para o cenário B1, com 15 nós. O modelo de mobilidade é o *Steady State Random Waypoint*, com velocidade média de 20 km/h, tempo de pausa médio de 100 s, em uma área de 1000×1000 m. A duração total do *trace* é de 7 dias.

A Figura 6.11 apresenta o histograma das taxas de encontro efetivas para o cenário B1. Esses valores foram obtidos segundo a metodologia explicada no Capítulo 5. Todos os pares possuem taxas não nulas. Pode-se observar mais uma vez a importância de levar em consideração a heterogeneidade dos encontros entre os nós, pois existem pares com taxas muito diferentes umas das outras. Observa-se também que esse cenário possui taxas mais baixas do que os cenários anteriores.

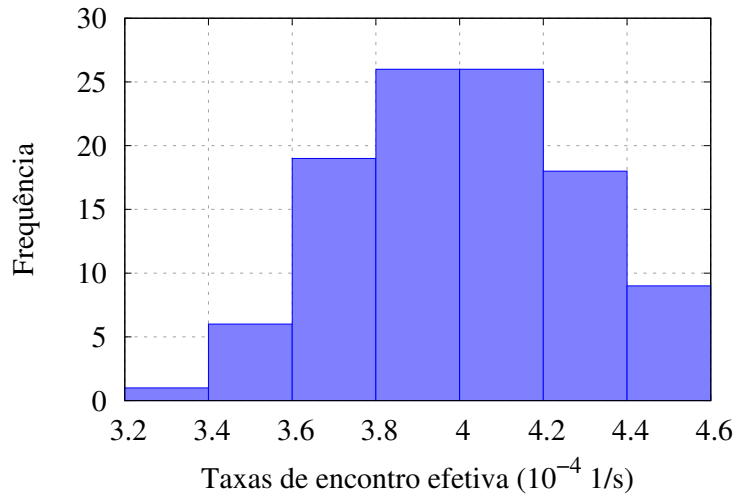


Figura 6.11: Histograma das taxas de encontro efetivas do cenário B1.

Com relação à análise das métricas de ajuste do cenário, temos os seguintes valores. O RMSE entre CCDF empírica e exponencial dos tempos entre encontros é de 0,017 e 3,43%, para o valor médio absoluto e normalizado, respectivamente. Esses valores são considerados baixos. As métricas de variabilidade das taxas de encontro para este cenário são as seguintes: $CV_{\mu} = 0,3785$, $D_{\mu} = 10,9\%$ e $D_{\mu}^{(1)} = 660\%$. Esses valores parecem altos se comparados aos primeiros cenários da seção anterior, porém

os três estão abaixo dos limiares definidos para tais métricas, como será mostrado na consolidação ao final deste capítulo.

A Tabela 6.19 apresenta o comparativo entre os resultados de modelagem e de simulação do atraso de entrega médio para o cenário B1, para valores de k de 1 a 5. O resultado da simulação foi obtido com 2000 amostras. Cabe ressaltar a boa predição do modelo, apresentando erros relativos muito baixos para todos os valores de k .

Tabela 6.19: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário B1.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	2507,65	42,46	2553,47	120,34	1,79%
2	1342,58	23,24	1367,05	75,83	1,79%
3	1031,64	18,47	1049,79	61,66	1,72%
4	903,87	16,80	920,27	52,16	1,78%
5	844,11	16,20	868,82	46,26	2,84%

A Figura 6.12 apresenta a variação do atraso de entrega médio com o aumento do valor de k , para os resultados de simulação do cenário B1. Nesse cenário, a diferença na redução do atraso entre os valores 5 e 10 é de 2,36%, e entre 6 e 10 é de 1,21%. A Tabela 6.20 apresenta os valores da redução no atraso em relação a $k = 1$ para os valores de k apresentados na Figura 6.12.

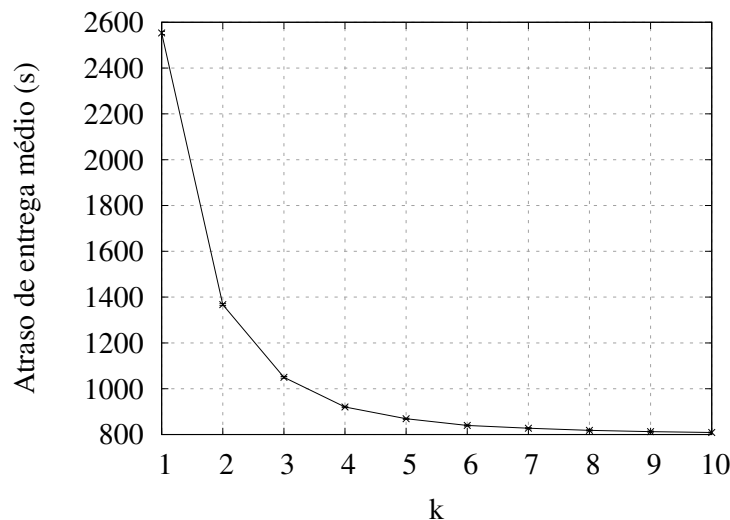


Figura 6.12: Resultados de simulação do atraso de entrega médio com o aumento do valor de k para o cenário B1.

A Figura 6.13 mostra os resultados de simulação e modelagem para o atraso de entrega par-a-par no cenário B1 para $k = 1$, de modo a ilustrar o ajuste do modelo para cada par origem-destino.

Tabela 6.20: Percentual de redução no atraso de entrega médio em relação a $k = 1$, para cenário B1.

k	Redução no atraso em relação a $k = 1$
2	46,46 %
3	58,88 %
4	63,96 %
5	65,97 %
6	67,12 %
7	67,59 %
8	67,96 %
9	68,17 %
10	68,33 %

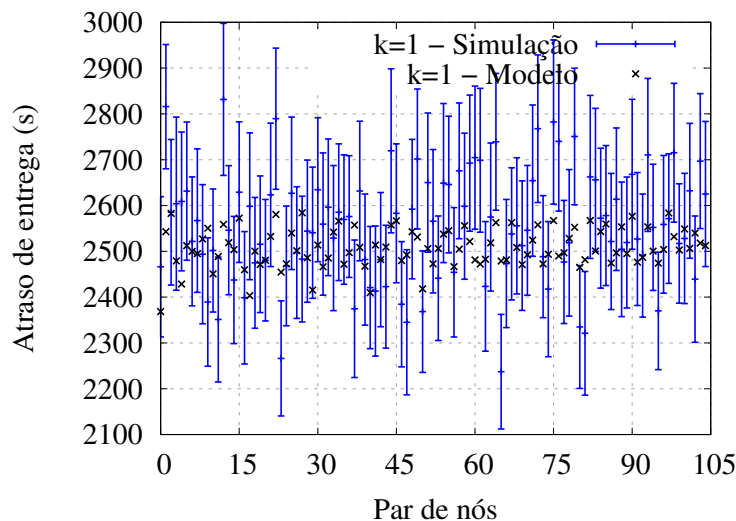


Figura 6.13: Atraso de entrega par-a-par para $k = 1$ obtido com o simulador The ONE e com o Modelo II, para o cenário B1. Resultados de simulação com intervalo de confiança de 98%.

6.2.3 Cenário Unical

O cenário Unical refere-se ao *dataset* identificado como unical/socialblueconn [50] na plataforma CRAWDAD. Os dados foram coletados no campus da Universidade de Calábria (UNICAL) em um experimento com a participação de 15 alunos formando uma rede *ad hoc*, onde cada aluno carrega um equipamento Bluetooth que corresponde a um nó. A duração do experimento foi de 7 dias e coletou dados de encontros entre os nós no período das aulas por meio de uma aplicação chamada *SocialBlueConn*.

O *trace* de encontros original não possui um formato compatível com o The ONE, por isso foi necessário escrever um código de conversão. Cada registro do *trace* contém apenas três informações, as identificações dos dois nós que se encontram e o

instante de tempo em que o encontro ocorre. O *trace* não apresenta a duração dos encontros. Para converter para o formato compatível com o The ONE, foi atribuído o valor de 1 s para a duração de cada encontro, pois esse valor é suficiente para que as transmissões das mensagens ocorram nos experimentos da simulação. Além disso, os registros dos encontros são assimétricos, *i.e.*, um registro do par (1,2) significa que o nó 1 vê o nó 2 mas não necessariamente o contrário ocorre no mesmo instante de tempo. Logo, essa assimetria também foi tratado no código de conversão. As identificações dos nós também foi corrigida para iniciar com 0. O instante de tempo do primeiro encontro registrado no *trace* é considerado como o tempo 0.

Devido ao fato de o experimento ter sido realizado apenas durante o período de aulas dos alunos (a coleta dos dados não é contínua), o *trace* completo possui longos intervalos com ausência de encontros e pode ser dividido em sete *traces* independentes, e cada um corresponde a um dia de experimento. Cada extrato do *trace* original será identificado como Unical-1 a Unical-7. Os extratos têm curta duração, de cerca de 5 horas. O intervalo de tempo considerado por cada extrato e sua duração são conforme indicado a seguir:

- Unical-1: 0 a 16852 s (duração de 16852 s)
- Unical-2: 86421 a 103898 s (duração de 17477 s)
- Unical-3: 172807 a 189482 s (duração de 16675 s)
- Unical-4: 259309 a 276310 s (duração de 17001 s)
- Unical-5: 518661 a 535131 s (duração de 16470 s)
- Unical-6: 604847 a 623438 s (duração de 18591 s)
- Unical-7: 691127 a 709597 s (duração de 18470 s)

A Figura 6.14 apresenta o histograma das taxas de encontro efetivas para o *trace* Unical-1. Esses valores foram obtidos segundo a metodologia explicada no Capítulo 5. Todos os pares possuem taxas não nulas. Pode-se observar a importância de levar em consideração a heterogeneidade dos encontros entre os nós, pois existem pares com taxas muito diferentes umas das outras. As Figuras 6.15 e 6.16 apresentam os histogramas dos demais *traces* dessa família. Todos apresentam uma grande heterogeneidade nas taxas, e todos os pares se encontram, com exceção de um par no *trace* Unical-5. Os *traces* apresentam uma boa quantidade de encontros registrados, sendo de 1506, 1337, 1386, 1488, 3961, 4550 e 3877, o total de encontros nos *traces* Unical-1 a Unical-7, respectivamente.

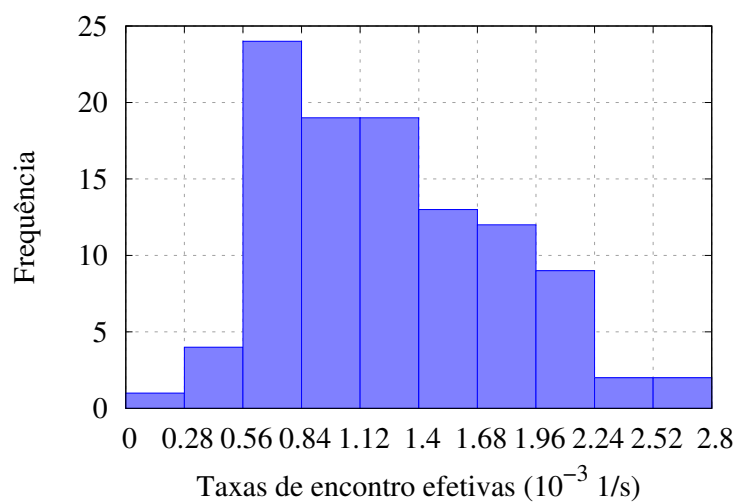
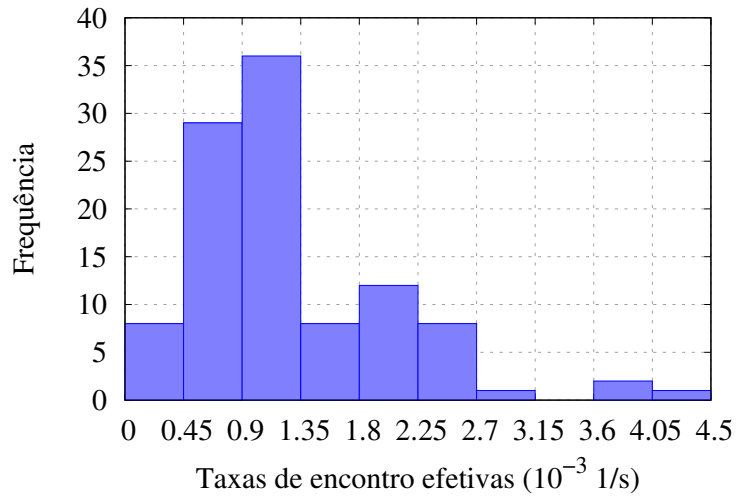
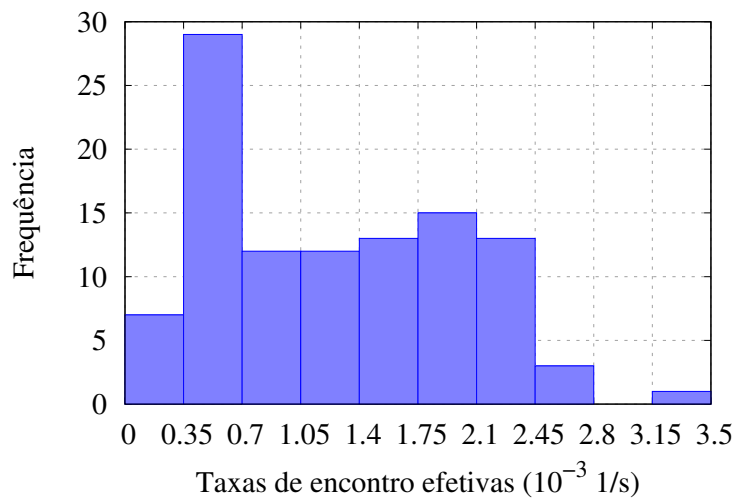


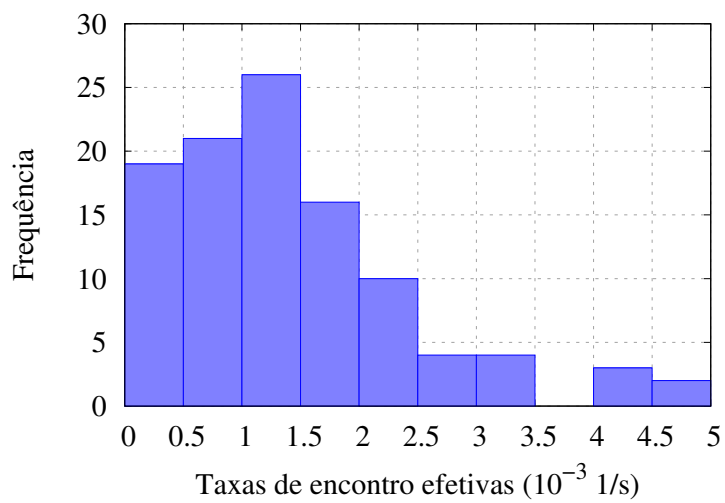
Figura 6.14: Histograma das taxas de encontro efetivas do *trace* Unical-1.



(a) Unical-2.

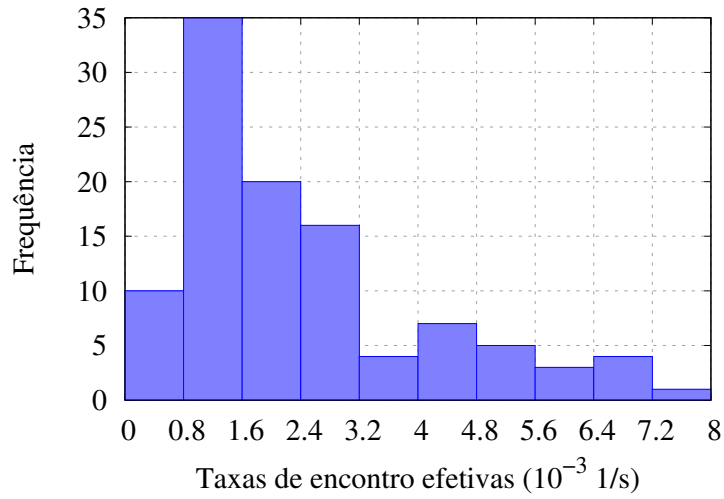


(b) Unical-3.

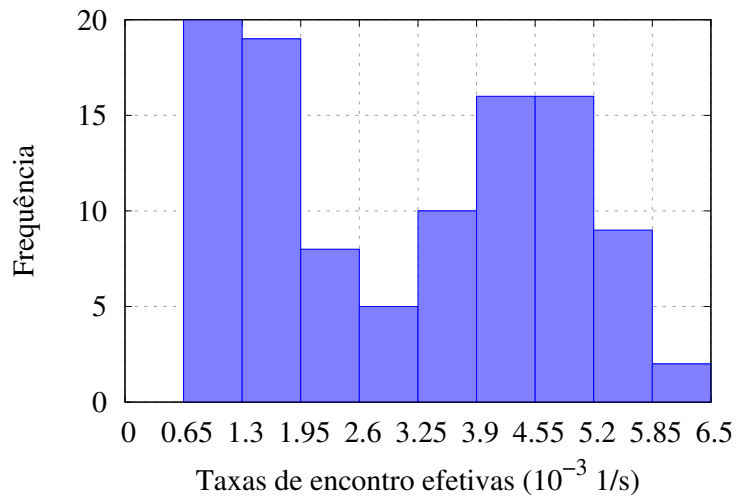


(c) Unical-4.

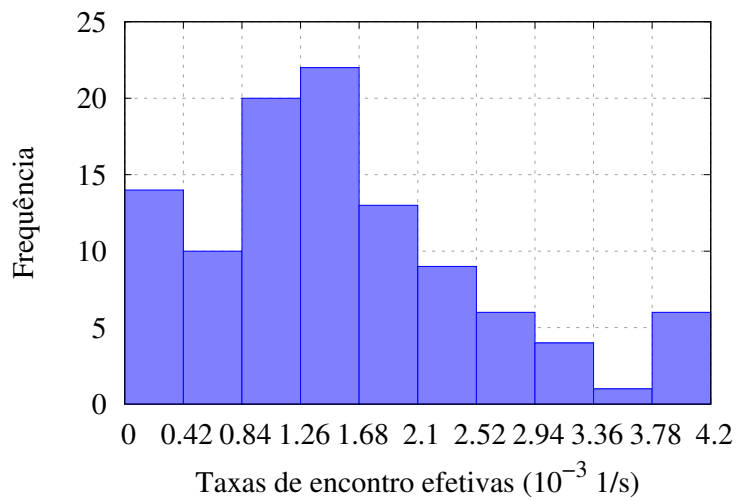
Figura 6.15: Histograma das taxas de encontro efetivas do *traces* Unical-2, Unical-3 e Unical-4.



(a) Unical-5.



(b) Unical-6.



(c) Unical-7.

Figura 6.16: Histograma das taxas de encontro efetivas do *traces* Unical-5, Unical-6 e Unical-7.

Resultados de modelagem e simulação

A Tabela 6.21 mostra o comparativo dos resultados para o atraso de entrega médio obtidos com modelagem e simulação para os cenários Unical-1 a Unical-7, para $k = 1$. Os resultados mostram que o Modelo II apresenta boa precisão nas estimativas inclusive para *traces* reais.

Tabela 6.21: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para os cenários Unical-1 a Unical-7, para $k = 1$.

Cenário	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
Unical-1	793,415	93,665	856,289	258,815	7,34%
Unical-2	839,492	173,262	903,178	264,259	7,05%
Unical-3	844,551	170,227	909,884	250,287	7,18%
Unical-4	734,947	217,328	784,831	444,624	6,35%
Unical-5	446,947	78,549	413,974	86,347	7,96%
Unical-6	395,662	99,197	425,469	331,544	7,00%
Unical-7	654,162	145,716	630,365	163,275	3,77%

A seguir, vamos apresentar os resultados de cada *trace*, para outros valores de k .

A Tabela 6.22 apresenta o atraso de entrega médio obtido com simulação e modelagem para o *trace* Unical-1, para valores de k de 1 a 5. Cabe destacar a boa precisão do modelo para todos os casos. Os mesmos resultados para os *traces* Unical-2 a Unical-7 encontram-se mais adiante nas Tabelas 6.23 a 6.28.

Tabela 6.22: Atraso de entrega médio (s). Resultados obtidos com modelagem e simulação para o cenário Unical-1.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	793,415	93,665	856,289	258,815	7,34%
2	426,760	51,358	443,659	88,648	3,81%
3	330,616	40,050	335,068	61,239	1,32%
4	291,384	35,240	295,731	55,080	1,47%
5	273,167	32,886	278,511	51,036	1,91%

Tabela 6.23: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-2.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	839,492	173,263	903,178	264,259	7,05%
2	449,792	89,806	493,396	112,117	8,83%
3	347,481	67,162	383,943	88,078	9,49%
4	305,276	57,770	339,238	79,017	10,01%
5	285,357	53,435	316,695	73,725	9,90%

Tabela 6.24: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-3.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	844,551	170,227	909,884	250,287	7,18%
2	453,926	94,483	493,581	127,724	8,03%
3	353,120	75,906	376,472	99,606	6,20%
4	311,844	68,570	332,498	92,811	6,21%
5	292,505	65,239	313,938	87,129	6,83%

Tabela 6.25: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-4.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	734,947	217,328	784,831	444,624	6,35%
2	396,374	114,356	400,505	150,024	1,78%
3	309,413	86,383	303,9	106,463	1,81%
4	273,962	74,492	269,062	92,184	1,82%
5	257,381	68,736	253,983	87,307	1,34%

Tabela 6.26: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-5.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	446,947	78,549	413,974	86,347	7,96%
2	239,165	43,272	229,273	54,108	4,31%
3	185,307	35,204	175,019	42,879	5,87%
4	163,021	32,394	153,289	38,343	6,35%
5	152,453	31,329	142,986	36,416	6,62%

Tabela 6.27: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-6.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	395,662	99,197	425,469	331,544	7,00%
2	213,174	51,379	229,136	162,265	6,96%
3	165,868	39,158	186,245	137,332	10,94%
4	121,893	25,753	132,566	66,295	8,05%
5	114,715	24,674	120,855	54,989	5,08%

Tabela 6.28: Atraso de entrega médio (s). Resultados de comparação entre modelagem e simulação para o cenário Unical-7.

k	Modelagem		Simulação		Erro relativo
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	
1	654,162	145,716	630,365	163,275	3,77%
2	354,394	80,754	354,048	97,844	0,09%
3	277,934	64,781	278,543	79,517	0,22%
4	246,893	58,534	246,739	74,182	0,06%
5	232,500	55,752	233,138	74,182	0,27%

A Figura 6.17 apresenta os resultados de simulação e modelagem do atraso de entrega par-a-par para o *trace* Unical-1, para o caso *single-copy*. Alguns pares apresentam uma amostra de valores com desvio padrão muito alto, por isso o intervalo de confiança também é alto nesses casos. A Figura 6.18 adiante apresenta o atraso de entrega par-a-par para os valores de k igual a 2, 3 e 4.

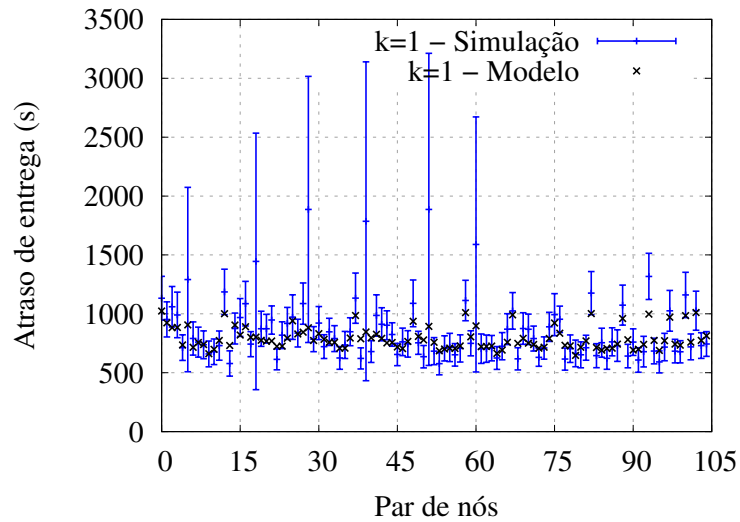
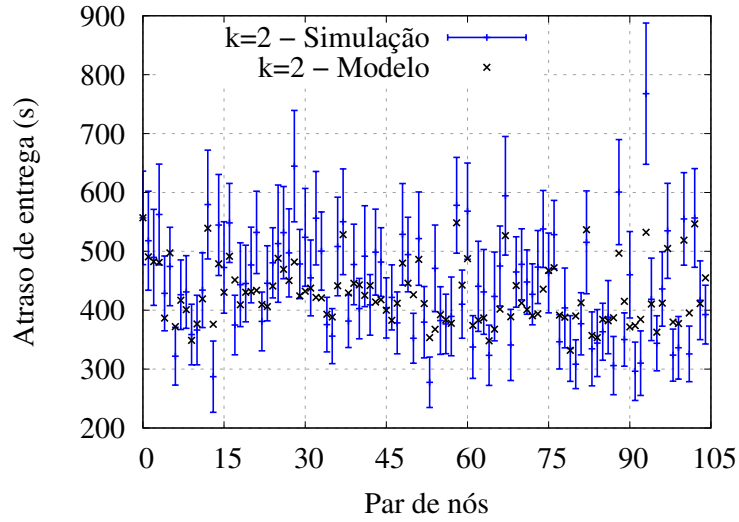
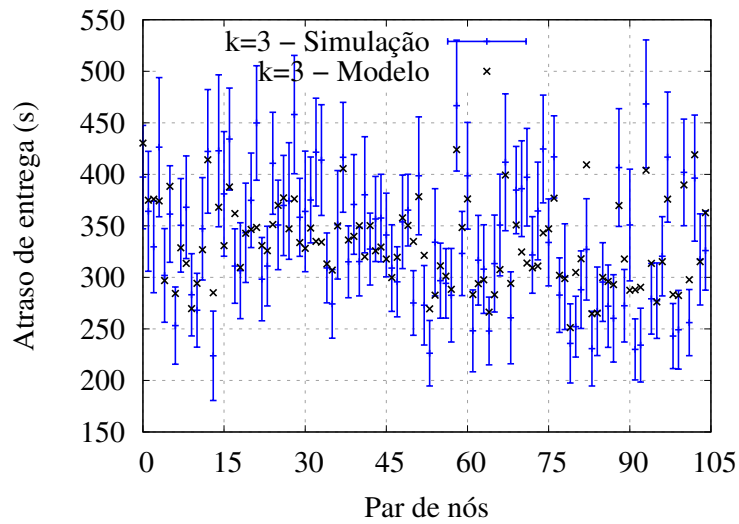


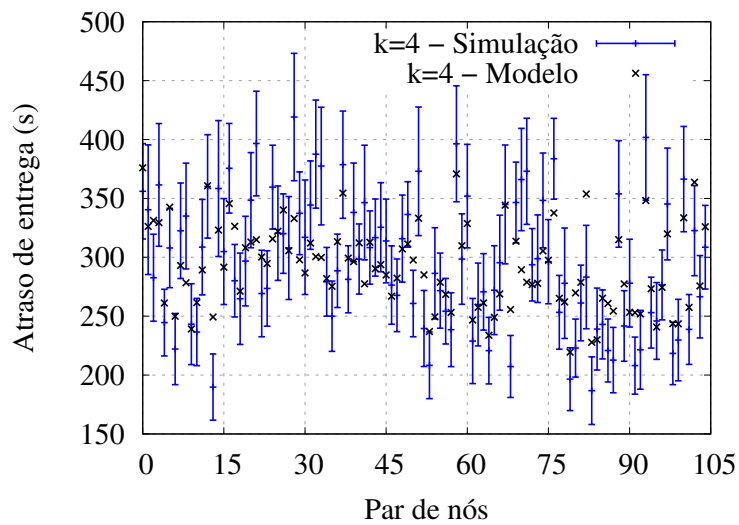
Figura 6.17: Atraso de entrega par-a-par (s). Resultados de simulação, com intervalo de confiança de 98%, e modelagem para o *trace* Unical-1 para $k = 1$.



(a) $k = 2$



(b) $k = 3$



(c) $k = 4$

Figura 6.18: Atraso de entrega par-a-par (s). Resultados de simulação, com intervalo de confiança de 98%, e modelagem para o *trace* Unical-1.

Influência do valor de k

A Figura 6.19 apresenta a variação do atraso de entrega médio com o aumento do valor de k , para os resultados de simulação com o *trace* Unical-1. O gráfico é semelhante ao das Figuras 6.5 e 6.12, apresentando uma queda acentuada no início com tendência a estabilizar para valores mais altos de k . O aumento no número de cópias de 1 para 2 reduziu o atraso em 48,19%, demonstrando um ganho significativo em desempenho. Comparando, por exemplo, os valores 5 e 10, o ganho na redução do atraso é de apenas 1,41%. Com base nessa análise, o valor de $k = 6$ pode ser considerado uma boa escolha de modo a obter uma redução significativa no atraso em comparação ao caso *single-copy*. Valores mais altos irão demandar mais recursos da rede sem o retorno equivalente no desempenho.

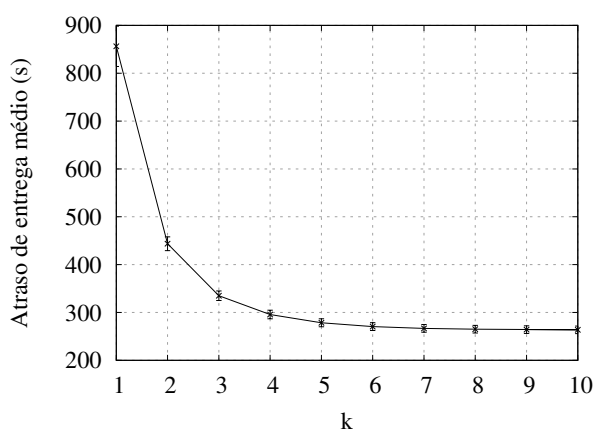


Figura 6.19: Resultados de simulação do atraso de entrega médio com o aumento do valor de k para o cenário Unical-1.

A Tabela 6.29 apresenta os valores da redução no atraso em relação a $k = 1$ para os valores de k apresentados na Figura 6.19 para o cenário Unical-1.

Tabela 6.29: Percentual de redução no atraso de entrega médio em relação a $k = 1$, para cenário Unical-1.

k	Redução no atraso em relação a $k = 1$
2	48,19 %
3	60,87 %
4	65,58 %
5	67,89 %
6	68,52 %
7	68,96 %
8	69,15 %
9	69,26 %
10	69,30 %

Métricas de variabilidade

A título de análise, vamos verificar as métricas de variabilidade relacionadas à sequência de taxas de encontro $\mu_{i,j}^{(w)}$, $w = 1, \dots, W$, apresentadas na Seção 6.2.1, para os cenários Unical. A Tabela 6.30 apresenta as métricas CV_μ , D_μ e $D_\mu^{(1)}$. Observando a tabela, nota-se que os coeficientes de variação e os desvios médios são bem mais altos do que os dos cenários A1 – A10 da referida seção. A terceira métrica, entretanto, apresenta valores menores, inclusive em relação ao cenário A1 cuja valor é 313%, indicando a forte influência que essa métrica possui. Logo, essa análise empírica mostra que o desvio médio de $\mu_{i,j}^{(1)}$ pode ser um bom indicativo quanto à influência da variabilidade das taxas nos resultados.

Tabela 6.30: Métricas de variabilidade das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}$, $w = 1, \dots, W$, para os cenários Unical-1 a Unical-7.

Cenário	CV_μ	D_μ (%)	$D_\mu^{(1)}$ (%)
Unical-1	0,3582	38,0	138
Unical-2	0,3895	52,1	236
Unical-3	0,3855	52,1	183
Unical-4	0,3665	39,4	201
Unical-5	0,3170	27,8	166
Unical-6	0,2507	35,5	137
Unical-7	0,3925	40,8	240

6.2.4 Cenário Infocom 2006

O *trace* Infocom 2006 [51] está disponível na plataforma CRAWDAD sob a identificação `cambridge/haggle/imote/infocom2006`². O experimento que gerou o *trace* foi composto por 98 nós, sendo 20 nós estáticos e 78 nós móveis carregados por participantes da conferência Infocom 2006 durante 4 dias. O *trace* contém os eventos de contatos entre os nós do experimento e entre esses nós e nós externos. Por isso, o *trace* original possui dados de contatos de mais de 4000 nós.

Para os experimentos realizados nesse trabalho, foi utilizado um extrato do *trace* original que contém apenas os eventos de contato entre os 78 nós móveis dos participantes da conferência, pois esses nós formam uma rede oportunista como a que se deseja analisar. Além disso, foram removidos os registros cuja duração do encontro é 0.

A partir do *trace* com dados de 78 nós, foram extraídos quatro *traces* referentes à uma combinação de 10 nós cada um. Os extratos possuem lacunas com ausência de encontros, assim como os *traces* da família Unical apresentada anteriormente.

²<https://crawdad.org/crawdad/cambridge/haggle/20090529/imote/>

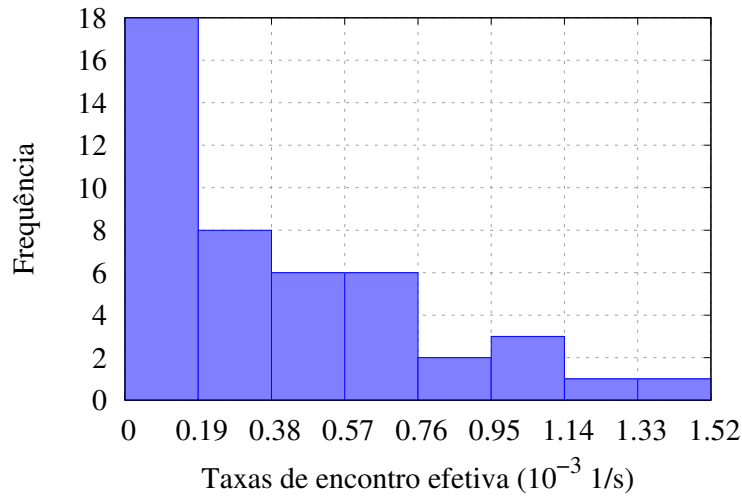
Sendo assim, os experimentos de simulação consideram os trechos de cada *trace* que apresentam a maior duração. Esses *traces* foram identificados como Infocom-1 a Infocom-4. Os trechos têm uma duração que varia entre cerca de 15 a 39 horas, conforme indicado a seguir:

- Infocom-1: 59088 s
- Infocom-2: 59306 s
- Infocom-3: 54158 s
- Infocom-4: 140294 s

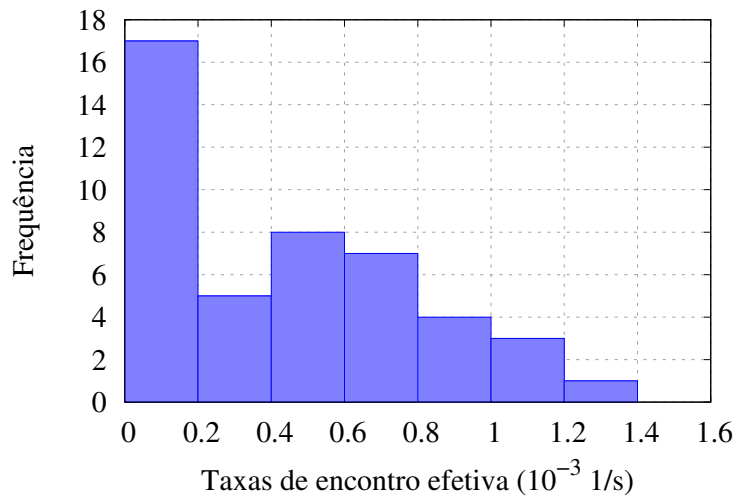
Os *traces* apresentam um padrão de encontros bastante particular. Os quatro cenários apresentam muitos pares que não se encontram, sendo de 17, 16, 26 e 13 o número de pares com taxa nula nos cenários Infocom-1 a Infocom-4, respectivamente. As Figuras 6.20 e 6.21 apresentam os histogramas das taxas de encontro efetivas para cada cenário desta família. Esses valores foram obtidos segundo a metodologia explicada no Capítulo 5. Pode-se notar que, além da questão de haverem muitos pares que não se encontram, os valores das taxas são mais baixos se comparados por exemplo aos dos *traces* da família Unical da seção anterior.

Além disso, o número de encontros registrados em cada *trace* é baixo, sendo de 281, 337, 422 e 383 encontros para os *traces* Infocom-1 a Infocom-4, respectivamente. Comparando com a outra família de *traces* reais apresentada neste documento, mesmo com *traces* de mais curta duração, como as taxas de encontro são mais altas, o número total de encontros é bem maior, variando entre 1506 e 4550, como mencionado na seção anterior. O tamanho da amostra afeta gravemente a obtenção de resultados, como já mencionado neste texto especialmente no final da Seção 6.2.1, e isto será exemplificado a seguir.

A Figura 6.22 apresenta os resultados de simulação e modelagem para o atraso de entrega par-a-par para o cenário A1 quando $k = 1$. Foram realizadas 4600 rodadas de simulação no total, porém o número total de resultados de atraso obtido para cada par não atingiu esse valor devido ao tamanho da amostra de encontros, como será explicado a seguir. Alguns pares de nós origem-destino não apresentaram nenhum resultado válido, isto é, nenhum dos pacotes gerados foram entregues. Isto pode ser observado nos primeiros pares que apresentam somente o valor do resultado do modelo. Além disso, uma outra parcela de pares apresenta valores de atraso muito elevados, e muito distantes da predição do modelo. Isto é devido principalmente ao seguinte fator. Existem poucas possibilidades de caminhos entre os nós para esses pares de origem-destino. Por exemplo, no *trace* existe apenas uma possibilidade de entrega para as mensagens do nó 0 para o nó 9 (par 9 na figura), independente de quando a mensagem é gerada, todas são entregues no mesmo instante no *trace*, em



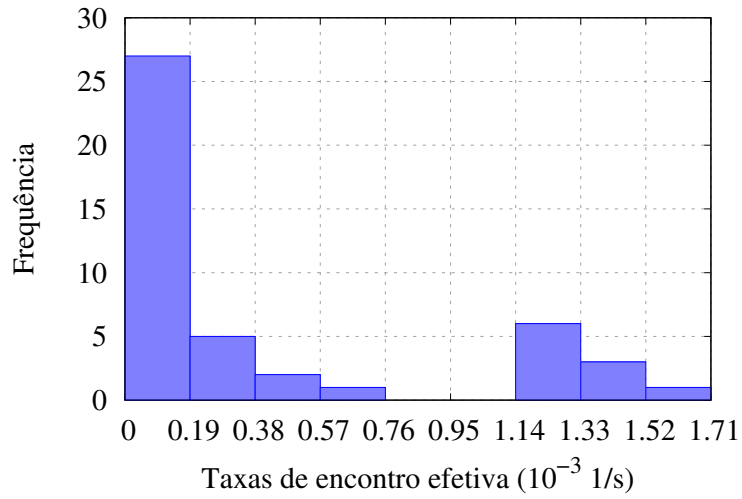
(a) Infocom-1



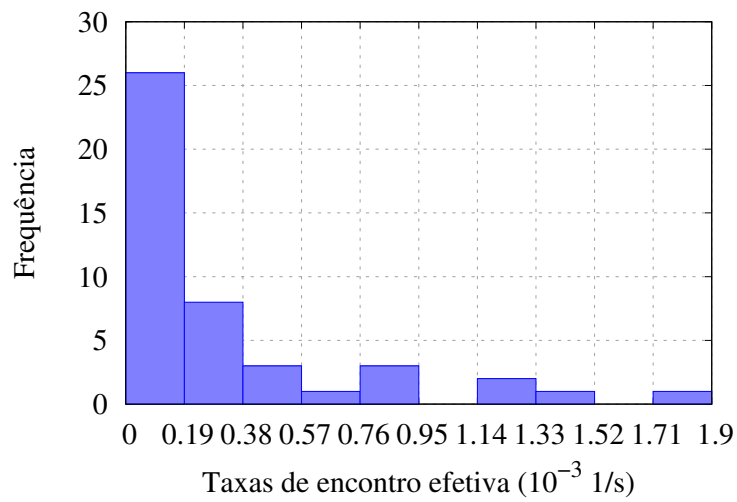
(b) Infocom-2

Figura 6.20: Histograma das taxas de encontro efetivas dos cenários Infocom-1 e Infocom-2.

$t = 47440,00$ s. Observe a Figura 6.23 que mostra os valores do atraso para este par. A taxa de geração de mensagens é 1 a cada 10 s. Como o tempo de entrega de todas é o mesmo, o valor do atraso diminui 10 s a cada rodada, obtendo a reta mostrada na figura. Para avaliar melhor a dinâmica de encontros desses nós, seria necessário um *trace* de maior duração, com uma quantidade maior de encontros para cada par e mais possibilidades de caminhos para as mensagens. Observe a diferença nos resultados para os pares (1,2) e (1,5) conforme mostra a Figura 6.24, letras (a) e (b), respectivamente. É claro que o resultado analítico carrega um desvio, porém esse desvio não corresponde aos valores apresentados por esses pares de comportamento peculiar pelos motivos explicados. Considerando os pares para os quais o resultado



(a) Infocom-3



(b) Infocom-4

Figura 6.21: Histograma das taxas de encontro efetivas dos cenários Infocom-3 e Infocom-4.

de simulação é mais baixo, no caso menor do que 5000 s, o valor médio da simulação é de 3036,97 s e o do modelo é de 2478,90 s, com erro relativo de 18,37%, para $k = 1$.

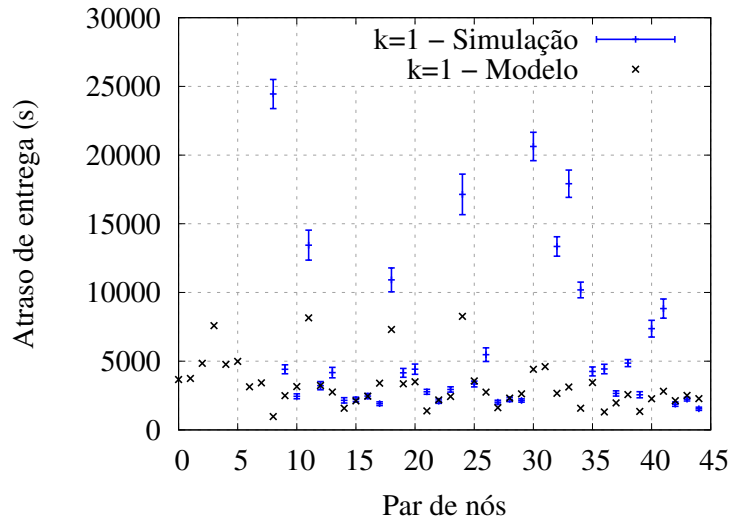


Figura 6.22: Atraso de entrega par-a-par para $k = 1$ obtido com simulação e com o Modelo II, para o cenário Infocom-1. Resultados de simulação com intervalo de confiança de 98%.

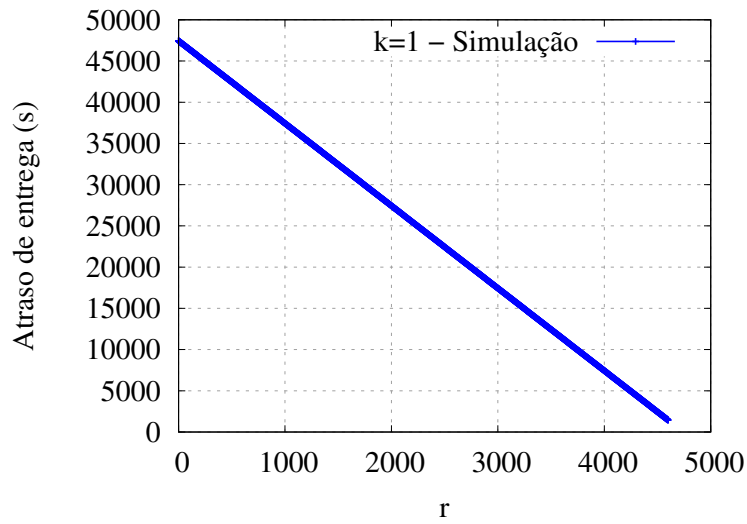
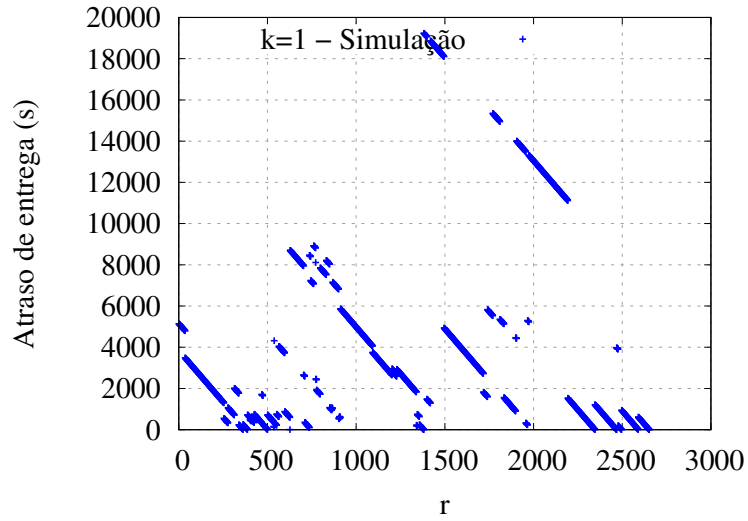
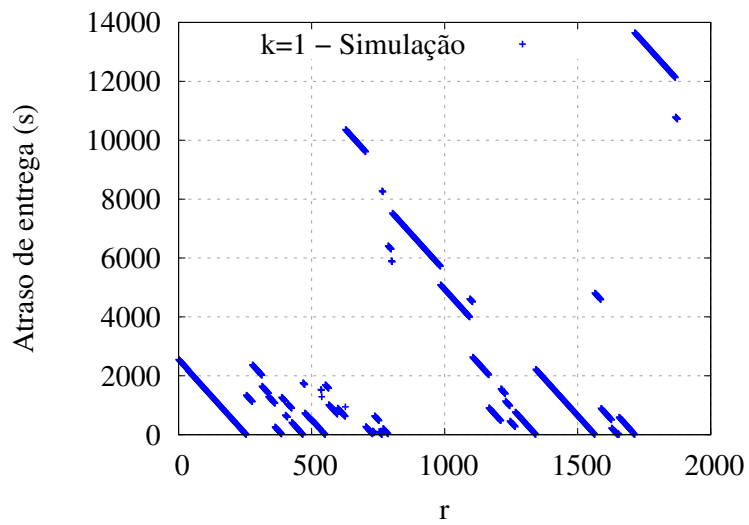


Figura 6.23: Atraso de entrega para $k = 1$ obtido com simulação, referente às mensagens do nó 0 para o nó 9 no cenário Infocom-1 a cada rodada r .



(a) Par (1,2)



(b) Par (1,4)

Figura 6.24: Atraso de entrega para $k = 1$ obtido com simulação para cenário Infocom-1 a cada rodada r .

A seguir, a Tabela 6.31 mostra as métricas de variabilidade das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}, w = 1, \dots, W$, para os cenários Infocom-1 a Infocom-4. Um valor que chama atenção é a segunda métrica para o cenário Infocom-4, que indica que este *trace* não preenche os requisitos de aplicabilidade do Modelo II. Com relação aos demais *traces*, apesar de apresentarem valores para as três métricas até melhores do que os da família Unical apresentam a dificuldade em se obter uma amostra adequada de resultados. Devido ao exposto, não foi dada continuidade à análise desses *traces*.

Tabela 6.31: Métricas de variabilidade das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}, w = 1, \dots, W$, para os cenários Infocom-1 a Infocom-4.

Cenário	CV_{μ}	D_{μ} (%)	$D_{\mu}^{(1)}$ (%)
Infocom-1	0,2496	55,5	131
Infocom-2	0,2269	42,0	94
Infocom-3	0,1278	28,6	64
Infocom-4	0,3650	232,0	394

6.2.5 Consolidação

A Tabela 6.32 apresenta a consolidação das métricas de variabilidade dos cenários apresentados, ordenados pelo valor do erro de modelagem para $k = 1$.

Tabela 6.32: Métricas de variabilidade das taxas de encontro dadas pela sequência $\mu_{i,j}^{(w)}$, $w = 1, \dots, W$, para os cenários apresentados nesta seção.

Cenário	CV_{μ}	D_{μ} (%)	$D_{\mu}^{(1)}$ (%)	Erro do modelo para $k = 1$
A1	0,0488	1,1	313	0,56%
B1	0,3785	10,9	660	1,79%
A2	0,0591	1,4	459	1,92%
Unical-7	0,3925	40,8	240	3,77%
Unical-4	0,3665	39,4	201	6,35%
Unical-6	0,2507	35,5	137	7,00%
Unical-2	0,3895	52,1	236	7,05%
Unical-3	0,3855	52,1	183	7,18%
Unical-1	0,3582	38,0	138	7,34%
A3	0,1263	1,9	963	7,69%
Unical-5	0,3170	27,8	166	7,96%
A4	0,1428	3,6	586	14,69%
A5	0,2545	5,1	1277	25,01%
A6	0,5237	8,2	3713	29,40%
A7	0,3736	12,9	1334	36,41%
A8	0,4053	18,9	1722	49,52%
A9	0,4464	20,4	1324	51,02%
A10	0,4599	62,7	1337	53,48%

Considerando o limiar para o erro da modelagem, relativo aos resultados de simulação, como 20%, temos os seguintes valores para o limiar de cada métrica:

- CV_{μ} : 0,4
- D_{μ} : 60%
- $D_{\mu}^{(1)}$: 1000%

Os três limiares devem ser atendidos em conjunto para que se obtenha um valor adequado para a predição do modelo.

O objetivo principal da análise da variabilidade das taxas de encontro ao longo do tempo apresentada, além do estudo para se definir métricas objetivas, é fornecer ferramentas para a análise dos cenários, de forma que o modelo possa ser aplicado mesmo em casos em que os requisitos da modelagem não sejam completamente atendidos.

Capítulo 7

Conclusão

Este documento apresentou o desenvolvimento de dois modelos matemáticos para predição do atraso de entrega de mensagens fim-a-fim em redes oportunistas, para processos de encaminhamento *single-copy* e *multi-copy*, quando o nó origem pode criar múltiplas cópias da mensagem.

Em ambientes desafiadores à comunicação em rede, onde não há garantia de conectividade fim-a-fim entre origem e destino, novos paradigmas devem ser aplicados de modo a permitir a entrega de mensagens. A arquitetura de rede tolerante a atrasos (DTN - *Delay Tolerant Network*) foi definida e planejada para operar nesse tipo de ambiente. Por meio do uso da técnica de encaminhamento de mensagens *store-carry-forward*, os nós armazenam cópias das mensagens para posterior encaminhamento, assim que houver conexão.

Redes oportunistas são um tipo de rede tolerante a atrasos na qual a mobilidade dos nós é usada como um meio de aumentar a conectividade da rede. A mobilidade cria oportunidades para novos encontros entre os nós, aumentando as possibilidades de conexão. Os nós podem trocar mensagens mesmo que não exista uma rota fim-a-fim entre eles.

Desde que esse conceito surgiu na literatura, foram propostos diversos protocolos para encaminhamento oportunista. Apesar dessa diversidade, existe uma lacuna nessa área de pesquisa que é a carência de modelos matemáticos mais abrangentes para este tipo de ambiente.

A importância e a demanda por um modelo genérico já foram mencionadas em publicações da área, e essa lacuna é considerada um problema importante a ser resolvido no contexto de avaliação de desempenho para protocolos de encaminhamento oportunistas. Além da sua importância, a complexidade e os desafios da modelagem matemática também devem ser considerados.

O foco principal da modelagem desenvolvida neste trabalho é a dinâmica de encontros entre os nós, levando em consideração a heterogeneidade na mobilidade dos mesmos, que pressupõe que as taxas de encontro de cada par de nós são diferentes,

podendo inclusive existir pares que nunca se encontram. O objetivo é modelar o processo de encaminhamento de mensagens e obter o valor esperado do atraso de entrega das mensagens fim-a-fim.

A modelagem desenvolvida possui três vantagens principais: leva em consideração a heterogeneidade das taxas de encontro entre os pares, não restringe a regra de encaminhamento, e engloba esquemas *single-copy* e *multi-copy*, permitindo que o nó origem crie múltiplas cópias da mensagem e, assim, reduza o atraso de entrega.

O primeiro modelo proposto, Modelo I, foi inspirado em um modelo *single-copy* da literatura e expandido para o caso *multi-copy*. O Modelo I foi motivado pelo desejo de aplicar essa modelagem no caso onde a origem pode criar múltiplas cópias da mensagem.

A solução de criar cópias da mensagem é uma estratégia válida para aumentar o desempenho de protocolos por meio da redução do atraso de entrega. O nó intermediário para o qual a origem encaminha a mensagem possui grande impacto no atraso de entrega fim-a-fim. Com o aumento do número de cópias independentes, é possível ampliar as possibilidades de caminhos da origem ao destino e permitir que a mensagem siga um caminho mais rápido até a entrega. Por isso, é importante modelar matematicamente esquemas *multi-copy*.

Além disso, um modelo *multi-copy* oferece a possibilidade de analisar o desempenho do protocolo em relação ao aumento do número de cópias. O atraso de entrega diminui com esse aumento, conforme é esperado, uma vez que a disseminação da mensagem é mais rápida se houver mais cópias da mesma trafegando na rede. A redução do atraso, no entanto, tem um custo que é o aumento do gasto de recursos de rede. Uma modelagem *multi-copy* pode ser utilizada para analisar o *trade-off* entre gasto de recursos e atraso, e até mesmo para encontrar o número de cópias ótimo para determinado cenário ou protocolo. Os resultados apresentados mostraram que com duas cópias apenas já é possível obter um ganho de mais de 40% em alguns cenários, e que um pequeno número de cópias é suficiente para se atingir mais de 60% de redução no atraso em comparação ao esquema *single-copy*.

Para resolver as equações do Modelo I, é necessário analisar as distribuições das variáveis aleatórias envolvidas no cálculo do atraso. Essa análise pode ser simplificada quando a distribuição do tempo entre encontros é exponencial, que é o caso da maioria dos cenários estudados na literatura. Ainda assim, para lidar com a complexidade das equações, é preciso usar aproximações.

O desenvolvimento do Modelo II foi motivado pelo desejo de obter um modelo com alto nível de acurácia, sem utilizar nenhuma aproximação. Baseado na teoria de cadeias de Markov absorventes, o processo de encaminhamento de mensagens desde sua criação até a entrega foi modelado como um processo Markoviano em uma cadeia com estados absorventes, cujo evento de absorção representa um evento

de entrega. O Modelo II engloba ambos os casos *single-copy* e *multi-copy*. Para o caso em que a distribuição dos tempos entre encontros for exponencial, os únicos parâmetros necessários para aplicar o modelo são os valores das taxas de encontro.

Os modelos foram validados por meio da comparação dos resultados analíticos com resultados de simulação. Três ferramentas de simulação foram utilizadas: um simulador próprio especialmente desenvolvido para este trabalho e os simuladores de redes ns-3 e The ONE. O *software* BonnMotion também foi utilizado para a geração de *traces* de mobilidade sintéticos.

O simulador próprio, batizado de *Multi-copy Simulator* (MCS), surgiu da necessidade de realizar experimentos em um ambiente de simulação mais controlado, com foco nos encontros entre os nós, que são tratados como eventos discretos. O usuário pode fornecer como entrada um *trace* de encontros ou simplesmente os valores das taxas de encontro dos pares quando a distribuição do tempo entre encontros for exponencial.

Os simuladores ns-3 e The ONE são bem conhecidos e bastante utilizados na literatura. O simulador ns-3 foi usado na obtenção de resultados preliminares. Com o avanço do trabalho, o simulador The ONE mostrou-se uma ferramenta mais adequada aos experimentos, suprimindo a necessidade de utilizar um *software* de conhecimento público e de livre acesso.

Os resultados obtidos mostram uma boa precisão dos modelos, em especial para o Modelo II, tanto para *traces* sintéticos quanto para *traces* reais, em ambos os casos *single-copy* e *multi-copy*. O Modelo II apresentou erros muito baixos, menores do que 1% em alguns casos, para os *traces* sintéticos que atendem aos requisitos do modelo. No caso dos *traces* reais simulados, para os quais foi obtido uma amostra adequada, o Modelo II apresentou erros menores do que 10% na grande maioria dos casos.

Durante o período de estudo dedicado a esta pesquisa, uma grande quantidade de experimentos foi realizada. O presente documento apresenta uma consolidação dos resultados obtidos, com o objetivo de mostrar não somente a boa precisão da modelagem mas também de apresentar uma análise da aplicabilidade da mesma.

Essa análise foi feita com base em três métricas representativas da variabilidade das taxas de encontro ao longo do tempo, característica que se mostrou relevante e de grande influência nos resultados analíticos. Com base na análise de tais métricas e do valor do erro do modelo para cada cenário, foi possível obter um limiar geral para as métricas. Os três limiares devem ser atendidos em conjunto, caso contrário, a boa acurácia do modelo não pode ser garantida.

É importante destacar que, para o processo de encaminhamento oportunista de múltiplas cópias para o qual a modelagem foi desenvolvida, o Modelo II apresenta uma alta precisão na estimativa do atraso de entrega de mensagens fim-a-fim,

cumprindo o objetivo para o qual foi proposto. Assim, a modelagem matemática apresentada nesta tese contribui para o desafiador campo de pesquisa de análise de desempenho em redes oportunistas com mobilidade heterogênea.

7.1 Trabalhos Futuros

Como foi mencionado em alguns trechos ao longo do texto, a complexidade computacional do Modelo I é alta, da ordem de $O(n^k)$, sendo n o número de nós e k o limite de cópias. É interessante analisar detalhadamente a complexidade do Modelo II, que envolve a complexidade do algoritmo de geração do espaço de estados e o cálculo do atraso de entrega a partir da matriz fundamental, de modo a fazer uma comparação com a complexidade do pior caso do Modelo I. Nos experimentos realizados neste trabalho, o Modelo II apresentou enorme vantagem em termos de tempo de execução na prática, porém, para fins de uma análise comparativa da complexidade computacional teórica, a complexidade desse modelo deverá ser levantada.

Com relação ao processo *multi-copy* descrito e modelado nesta tese, o mesmo pode sofrer algumas modificações de modo a considerar outras maneiras de lidar com a criação de cópias na rede, permitindo a análise de desempenho de outros protocolos de múltiplas cópias. Tais modificações podem permitir a comparação de desempenho de diferentes esquemas *multi-copy*.

Por exemplo, existe a possibilidade de considerar que o nó intermediário no processo (*relay*) também possa criar cópias da mensagem, além do nó origem. Isto pode reduzir o atraso de entrega fim-a-fim. Outro exemplo é criar uma restrição para que um nó não fique com mais de uma cópia da mesma mensagem ao mesmo tempo, de modo a permitir que cada cópia siga um caminho diferente na rede.

O Modelo II, em especial, tem a característica de ser flexível quanto a modificações no processo de criação de cópias e na acomodação de diferentes protocolos. Para tal, é necessário alterar o algoritmo de construção do espaço de estados e redefinir as probabilidades de transição e o tempo para sair de cada estado transiente.

Outra linha de ação, um pouco mais complexa que as anteriores, é inserir na modelagem a variabilidade das taxas de encontro ao longo do tempo, tendo em vista esta ser uma característica de grande relevância, como discutido no texto. Uma possibilidade é definir janelas de tempo dentro das quais as taxas são constantes, porém variáveis entre as janelas. Essa ideia representa uma extensão da presente modelagem e requer o estudo detalhado dos cenários para os quais a pesquisa for direcionada, de modo a atender os requisitos do processo a ser modelado.

Referências Bibliográficas

- [1] BOLDRINI, C., CONTI, M., PASSARELLA, A. “Performance modelling of opportunistic forwarding under heterogeneous mobility”, *Computer Communications.*, v. 48, pp. 56–70, 2014. doi: 10.1016/j.comcom.2014.03.028.
- [2] FALL, K. “A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets”. In: *Proceedings of 2003 ACM SIGCOMM: Conference on Applications Technologies Architectures and Protocols for Computer Communications*, v. 25, pp. 27–34, 2003. doi: 10.1145/863955.863960.
- [3] KHABBAZ, M. J., ASSI, C. M., FAWAZ, W. F. “Disruption-Tolerant Networking: A Comprehensive Survey on Recent Developments and Persisting Challenges”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials.*, v. 14, pp. 607–640, 2012. doi: 10.1109/SURV.2011.041911.00093.
- [4] PELUSI, L., PASSARELLA, A., CONTI, M. “Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks”, *IEEE communications Magazine*, v. 44, n. 11, 2006.
- [5] CHAKCHOUK, N. “A survey on opportunistic routing in wireless communication networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 17, n. 4, pp. 2214–2241, 2015. doi: 10.1109/COMST.2015.2411335.
- [6] CC, S., RAYCHOUDHURY, V., MARFIA, G., et al. “A Survey of Routing and Data Dissemination in Delay Tolerant Networks”, *Journal of Network and Computer Applications*, v. 67, n. C, pp. 128–146, maio 2016. ISSN: 1084-8045. doi: 10.1016/j.jnca.2016.01.002.
- [7] VAHDAT, A., BECKER, D. *Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks*. Relatório técnico, CS-2000-06, Duke University, 2000.
- [8] GROSSGLAUSER, M., TSE, D. “Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks”. In: *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings.*, v. 3, pp. 1360–1369. IEEE, 2001. doi: 10.1109/INFCOM.2001.916631.

- [9] SPYROPOULOS, T., PSOUNIS, K., RAGHAVENDRA, C. S. “Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks”. In: *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pp. 252–259. ACM, 2005. doi: 10.1145/1080139.1080143.
- [10] MATSUDA, T., TAKINE, T. “(p, q)-Epidemic routing for sparsely populated mobile ad hoc networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 26, n. 5, pp. 783–793, 2008. doi: 10.1109/JSAC.2008.080605.
- [11] DEDE, J., FÖRSTER, A., HERNÁNDEZ-ORALLO, E., et al. “Simulating opportunistic networks: Survey and future directions”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 20, n. 2, pp. 1547–1573, 2018.
- [12] SPYROPOULOS, T., PSOUNIS, K., RAGHAVENDRA, C. S. “Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The single-copy case”, *IEEE/ACM transactions on networking*, v. 16, n. 1, pp. 63–76, 2008.
- [13] SPYROPOULOS, T., PSOUNIS, K., RAGHAVENDRA, C. S. “Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The multiple-copy case”, *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, v. 16, n. 1, pp. 77–90, 2008.
- [14] DIAS, G. M. D. S., REZENDE, J. F. D., SALLES, R. M. “Mathematical modeling of delivery delay for multi-copy opportunistic networks with heterogeneous pairwise encounter rates”, *Information Sciences*, v. 475, pp. 142–160, 2019.
- [15] SMALL, T., HAAS, Z. J. “The shared wireless infostation model: a new ad hoc networking paradigm (or where there is a whale, there is a way)”. In: *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*, pp. 233–244. ACM, 2003. doi: 10.1145/778415.778443.
- [16] GROENEVELT, R., NAIN, P., KOOLE, G. “The message delay in mobile ad hoc networks”, *Performance Evaluation.*, v. 62, n. 1-4, pp. 210–228, 2005. doi: 10.1016/j.peva.2005.07.018.
- [17] ZHANG, X., NEGLIA, G., KUROSE, J., et al. “Performance modeling of epidemic routing”, *Computer Networks.*, v. 51, n. 10, pp. 2867–2891, 2007. doi: 10.1016/j.comnet.2006.11.028.
- [18] ISLAM, M. T., AKON, M., ABDRABOU, A. L., et al. “Modeling Epidemic Data Diffusion for Wireless Mobile Networks”. In: *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, pp. 1–5. IEEE, 2011.

- [19] DIAS, G. M. S., SALLES, R. M. “Epidemic SIR Model Applied to Delay-Tolerant Networks”. In: *30th Brazilian Telecommunications Symposium, SBrT’12*. SBrT, 2012.
- [20] YAO, H., HUANG, H., ZENG, D., et al. “An energy-aware deadline-constrained message delivery in delay-tolerant networks”, *Wireless Networks.*, v. 20, n. 7, pp. 1981–1993, 2014. doi: 10.1007/s11276-014-0720-3.
- [21] MARANHÃO, J. P. A., ROLLA, V. G., CURADO, M., et al. “A Model for Epidemical DTN Considering Effects of Path Loss and Interference”, *IEEE Communications Letters.*, v. 18, n. 12, pp. 2213–2216, 2014. doi: 10.1109/LCOMM.2014.2367125.
- [22] WANG, Q., HAAS, Z. J. “Performance analysis of epidemic routing for delay-tolerant networks”. In: *Resource Management in Mobile Computing Environments*, Springer, pp. 579–594, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-06704-9_26.
- [23] YUAN, P., LIU, P. “Data fusion prolongs the lifetime of mobile sensing networks”, *Journal of Network and Computer Applications.*, v. 49, pp. 51–59, 2015. doi: 10.1016/j.jnca.2014.11.005.
- [24] HERNÁNDEZ-ORALLO, E., MURILLO-ARCILA, M., CALAFATE, C. T., et al. “Analytical evaluation of the performance of contact-Based messaging applications”, *Computer Networks (2016).*, 2016. doi: 10.1016/j.comnet.2016.07.006.
- [25] DIAS, G. M. D. S. *Modelo Epidemiológico SIR Aplicado a Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões*. Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2013.
- [26] KERMAK, W. O., MCKENDRICK, A. G. “A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics”, *Proceedings of the Royal Society of London Series A Containing Papers of a Mathematical and Physical Character 19051934*, v. 115, n. 772, pp. 700–721, 1927. Disponível em: <<http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1927.0118>>.
- [27] SMALL, T., HAAS, Z. J. “Resource and performance tradeoffs in delay-tolerant wireless networks”. In: *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pp. 260–267. ACM, 2005.

- [28] HAAS, Z. J., SMALL, T. “A new networking model for biological applications of ad hoc sensor networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 14, n. 1, pp. 27–40, 2006.
- [29] DE ABREU, C. S., SALLES, R. M. “Modeling message diffusion in epidemical DTN”, *Ad Hoc Networks*, v. 16, pp. 197–209, 2014. doi: 10.1016/j.adhoc.2013.12.013.
- [30] HUANG, H., ZENG, D., GUO, S., et al. “Stochastic analysis on epidemic dissemination of lifetime-controlled messages in DTNs”. In: *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International*, pp. 1578–1583. IEEE, 2013.
- [31] LUO, X., LIU, G., HUANG, H. “Buffer capacity-constrained epidemic routing model in mobile ad-hoc networks”. In: *Computational Science and Engineering (CSE), 2014 IEEE 17th International Conference on*, pp. 1443–1448. IEEE, 2014.
- [32] IP, Y.-K., LAU, W.-C., YUE, O.-C. “Performance modeling of epidemic routing with heterogeneous node types”. In: *Communications, 2008. ICC’08. IEEE International Conference on*, pp. 219–224. IEEE, 2008.
- [33] SPYROPOULOS, T., TURLETTI, T., OBRACZKA, K. “Routing in delay-tolerant networks comprising heterogeneous node populations”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 8, n. 8, pp. 1132–1147, 2009. doi: 10.1109/TMC.2008.172.
- [34] LEE, C.-H., OTHERS. “Exploiting heterogeneity in mobile opportunistic networks: An analytic approach”. In: *Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on*, pp. 1–9. IEEE, 2010.
- [35] PICU, A., SPYROPOULOS, T. “Minimum Expected*-cast Time in DTNs”, *Bioinspired Models of Network, Information, and Computing Systems*, pp. 103–116, 2010.
- [36] PICU, A., SPYROPOULOS, T. “Performance of distributed algorithms in DTNs: Towards an analytical framework for heterogeneous mobility”. In: *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, pp. 1–6. IEEE, 2011. doi: 10.1109/GLOCOM.2011.6134354.
- [37] PICU, A., SPYROPOULOS, T., HOSSMANN, T. “An analysis of the information spreading delay in heterogeneous mobility DTNs”. In: *World of*

Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2012 IEEE International Symposium on a, pp. 1–10. IEEE, 2012.

- [38] PICU, A., SPYROPOULOS, T. “Forecasting DTN performance under heterogeneous mobility: The case of limited replication”. In: *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2012 9th Annual IEEE Communications Society Conference on*, pp. 569–577. IEEE, 2012.
- [39] PAJEVIC, L., KARLSSON, G. “Modeling opportunistic communication with churn”, *Computer Communications*, 2016. doi: 10.1016/j.comcom.2016.04.018.
- [40] LEE, C.-H., OTHERS. “Exploiting Heterogeneity for Improving Forwarding Performance in Mobile Opportunistic Networks: An Analytic Approach”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 15, n. 1, pp. 150–162, 2016. doi: 10.1109/TMC.2015.2407406.
- [41] SERMPEZIS, P., SPYROPOULOS, T. “Delay analysis of epidemic schemes in sparse and dense heterogeneous contact networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 16, n. 9, pp. 2464–2477, 2017.
- [42] BURLEIGH, S., HOOKE, A., TORGERSON, L., et al. “Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary internet”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 41, n. 6, pp. 128–136, 2003. doi: 10.1109/MCOM.2003.1204759.
- [43] ROSS, S. M. *Stochastic Processes*. John Wiley and Sons, 1996.
- [44] KERÄNEN, A., OTT, J., KÄRKKÄINEN, T. “The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation”. In: *SIMUTools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, New York, NY, USA, 2009. ICST. ISBN: 978-963-9799-45-5.
- [45] CONAN, V., LEGUAY, J., FRIEDMAN, T. “Characterizing pairwise inter-contact patterns in delay tolerant networks”. In: *Proceedings of the 1st international conference on Autonomic computing and communication systems*, p. 19. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2007.
- [46] ALENAZI, M. J. F., CHENG, Y., ZHANG, D., et al. “Epidemic Routing Protocol Implementation in Ns-3”. In: *Proceedings of the 2015 Workshop on Ns-3, WNS3 '15*, pp. 83–90, New York, NY, USA, 2015. ACM. ISBN: 978-1-4503-3375-7. doi: 10.1145/2756509.2756523.

- [47] NAVIDI, W., CAMP, T. “Stationary distributions for the random waypoint mobility model”, *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 1, pp. 99–108, 2004. doi: 10.1109/TMC.2004.1261820.
- [48] NAVIDI, W., CAMP, T., BAUER, N. “Improving the accuracy of random waypoint simulations through steady-state initialization”. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Modeling and Simulation*, pp. 319–326, 2004.
- [49] “BonnMotion, A Mobility Scenario Generation and Analysis Tool, Documentation”. Disponível em <http://sys.cs.uos.de/bonnmotion/doc/README.pdf>, 2016.
- [50] CAPUTO, A., SOCIEVOLE, A., RANGO, F. D. “CRAWDAD dataset unical/socialblueconn (v. 2015-02-08)”. Disponível em <https://crawdad.org/unical/socialblueconn/20150208/contacts>, 2015. traceset: contacts.
- [51] SCOTT, J., GASS, R., CROWCROFT, J., et al. “CRAWDAD dataset cambridge/haggle (v. 2009-05-29)”. Disponível em <https://crawdad.org/cambridge/haggle/20090529/imote>, 2009. traceset: imote.
- [52] BIBINGER, M. “Notes on the sum and maximum of independent exponentially distributed random variables with different scale parameters”, *arXiv:1307.3945 [math.PR]*, 2013.

Apêndice A

Análise empírica da distribuição de probabilidade do atraso de entrega para cópias individuais

Este apêndice apresenta a análise empírica realizada com os resultados de simulação com o objetivo de encontrar uma distribuição de probabilidade aproximada para a variável aleatória $D_{i,d}$, presente na Eq. 2.1.

Considere uma rede com N nodes. Seja Ω o conjunto de todos os pares de nós (s,d) , onde $s \neq d$, logo temos que $|\Omega| = N(N - 1)$. Para cada rodada de simulação, a origem s gera uma mensagem para o destino d para todos os pares $(s,d) \in \Omega$. Para cada par (s,d) , existe um valor correspondente de atraso de entrega, que é um valor amostral da variável aleatória $D_{s,d}$. A duração de cada rodada é longa o suficiente para que todas as mensagens sejam entregues.

Foi observado empiricamente que, para o caso em que a distribuição do tempo entre encontros é exponencial, é possível aproximar com bom ajuste a distribuição das variáveis $D_{s,d}$ para uma distribuição exponencial.

Para analisar a distribuição de probabilidade empírica das variáveis aleatórias $D_{s,d}$, foi utilizado o método de melhor ajuste (*best fit*) para comparar a função de distribuição acumulada complementar (CCDF - *complementary cumulative distribution function*) empírica com uma referente à distribuição exponencial. Foi executado um mínimo de 200 rodadas, obtendo assim uma amostra com no mínimo 200 observações de cada variável. Para o método de *best fit* foi utilizada a função *fit* do *software gnuplot*¹.

A Figura A.1 mostra os gráficos das duas funções, empírica e a exponencial obtida com o método de *best fit*. Pode-se observar que a CCDF Empírica possui um ajuste muito bom com uma CCDF Exponencial. De fato, o erro médio quadrático

¹<http://www.gnuplot.info/>

(RMSE - *root mean square error*) entre elas é de apenas 2,42%. Esta figura refere-se a um par de nós do cenário S1 descrito no Capítulo 5, Seção 5.2, no caso o par $(s, d) = (0, 9)$.

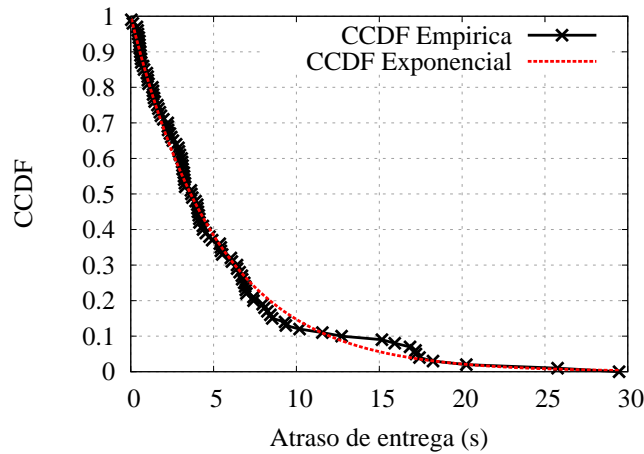
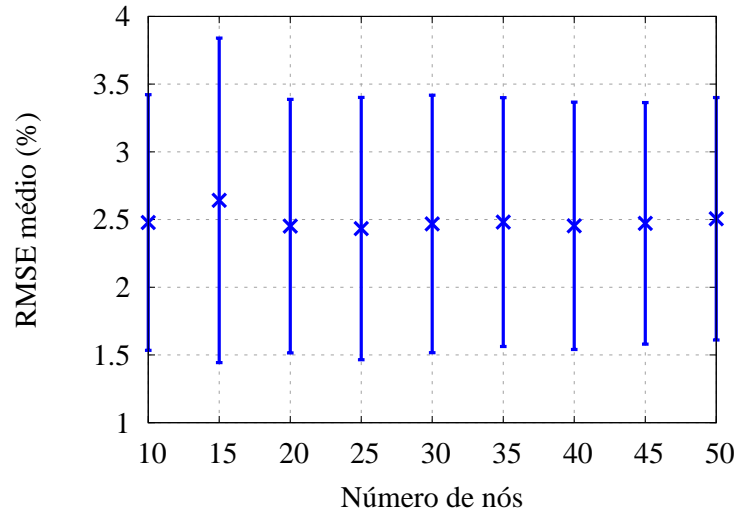


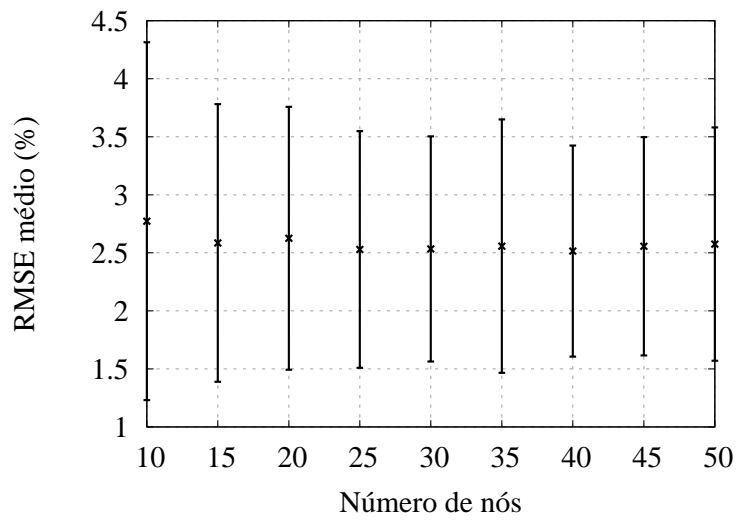
Figura A.1: Comparação entre CCDF Empírica e CCDF Exponencial da variável $D_{0,9}$, cenário S1. RMSE = 2,42%.

Para uma análise ampla, é importante calcular o RMSE referente a todos os pares do cenário, além de analisar diversos cenários distintos. A métrica usada para esta análise é o valor médio do RMSE de todos os pares, $\text{RMSE}_{\text{médio}}$. As Figuras A.2-(a) e A.2-(b) mostram os valores de $\text{RMSE}_{\text{médio}}$ obtidos para os cenários S2 e S3 (descritos no Capítulo 6, Seção 6.1.1), respectivamente, variando o número total de nós. Pode-se observar que os valores são baixos. Esses resultados são uma amostra ilustrativa da análise realizada ao longo de diversos cenários simulados.

Como o ajuste da CCDF Empírica das variáveis com uma CCDF Exponencial é bastante satisfatório, podemos considerar que tais variáveis possuem uma distribuição de probabilidade que se aproxima da distribuição exponencial.



(a) Cenário S2



(b) Cenário S3

Figura A.2: $RMSE_{\text{médio}}$ entre CCDF Empírica e CCDF Exponencial de melhor ajuste.

Apêndice B

Prova completa da Eq. (3.12)

Este apêndice apresenta a prova completa da Eq. (3.12). As variáveis seguem as definições e as notações apresentadas no Capítulo 3.

Sejam X, Y variáveis aleatórias. Seja g uma função de X e Y . O valor esperado de $g(X, Y)$, por definição, é dado por:

$$E[g(X, Y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) f_{X,Y}(x, y) dx dy, \quad (\text{B.1})$$

onde $f_{X,Y}(x, y)$ é a função de distribuição de probabilidade conjunta de X e Y .

Sejam $X = D_{r_1,d}$, $Y = T_{s,n_2} + D_{n_2,d}$ e $g(X, Y) = \min(X, Y)$. A função $\min(X, Y)$ pode ser definida da seguinte forma:

$$\min(X, Y) = \begin{cases} x, & x \leq y \\ y, & y < x \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

Os valores esperados $E[X]$ e $E[Y]$ são conhecidos e não negativos. Logo, quebrando a Eq. (B.1) e fazendo as devidas substituições, temos que:

$$\begin{aligned} E[\min(X, Y)] &= \int_0^{+\infty} \int_0^y \min(x, y) f_{X,Y}(x, y) dx dy + \int_0^{+\infty} \int_y^{+\infty} \min(x, y) f_{X,Y}(x, y) dx dy \\ &= \int_0^{+\infty} \int_0^y x f_{X,Y}(x, y) dx dy + \int_0^{+\infty} \int_y^{+\infty} y f_{X,Y}(x, y) dx dy \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

Como X e Y são independentes, temos que $f_{X,Y}(x, y) = f_X(x) f_Y(y)$. Assim:

$$E[\min(X, Y)] = \int_0^{+\infty} f_Y(y) \int_0^y x f_X(x) dx dy + \int_0^{+\infty} y f_Y(y) \int_y^{+\infty} f_X(x) dx dy \quad (\text{B.4})$$

Considerando que $D_{r_1,d} \sim \text{Exp}(\lambda_1)$, $T_{s,n_2} \sim \text{Exp}(\lambda_2)$ e $D_{n_2,d} \sim \text{Exp}(\lambda_3)$, temos

que as funções de distribuição de probabilidade de X e Y são dadas por:

$$f_X(x) = \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} \quad (\text{B.5})$$

$$f_Y(y) = \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 y} - e^{-\lambda_3 y}) \quad , \quad (\text{B.6})$$

onde $\lambda_1 = 1/E[D_{r_1,d}]$, $\lambda_2 = 1/E[T_{s,n_2}]$ e $\lambda_3 = 1/E[D_{n_2,d}]$. A Eq. B.6 é o resultado da função de distribuição de probabilidade da soma de duas variáveis aleatórias exponenciais independentes [52].

O próximo passo é resolver as integrais internas da Eq. B.4.

$$\begin{aligned} \int_0^y x f_X(x) dx &= \int_0^y x \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} dx = \lambda_1 \frac{e^{-\lambda_1 x}}{\lambda_1^2} (-\lambda_1 x - 1) \Big|_0^y \\ &= -\frac{e^{-\lambda_1 x}}{\lambda_1} (\lambda_1 x + 1) \Big|_0^y = -\frac{e^{-\lambda_1 y}}{\lambda_1} (\lambda_1 y + 1) - \left(-\frac{e^{-\lambda_1 \cdot 0}}{\lambda_1} (\lambda_1 \cdot 0 + 1) \right) \\ &= -\frac{e^{-\lambda_1 y}}{\lambda_1} (\lambda_1 y + 1) + \frac{1}{\lambda_1} \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

$$\begin{aligned} \int_y^{+\infty} f_X(x) dx &= \int_y^{+\infty} \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} dx = -e^{-\lambda_1 x} \Big|_y^{+\infty} = \lim_{x \rightarrow +\infty} (-e^{-\lambda_1 x}) - (-e^{-\lambda_1 y}) \\ &= e^{-\lambda_1 y} \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

Substituindo as equações B.6, B.7 e B.8 em B.4, temos que:

$$\begin{aligned} E[\min(X, Y)] &= \int_0^{+\infty} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 y} - e^{-\lambda_3 y}) \left(-\frac{e^{-\lambda_1 y}}{\lambda_1} (\lambda_1 y + 1) + \frac{1}{\lambda_1} \right) dy + \\ &\quad \int_0^{+\infty} y \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 y} - e^{-\lambda_3 y}) (e^{-\lambda_1 y}) dy \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 y} - e^{-\lambda_3 y}) \left(-\frac{e^{-\lambda_1 y}}{\lambda_1} (\lambda_1 y + 1) + \frac{1}{\lambda_1} \right) dy + \\ &\quad \int_0^{+\infty} y \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 y} - e^{-\lambda_3 y}) (e^{-\lambda_1 y}) dy \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

Resolução da primeira integral da Eq. (B.9):

$$\begin{aligned}
& \int_0^{+\infty} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 y} - e^{-\lambda_3 y}) \left(-\frac{e^{-\lambda_1 y}}{\lambda_1} (\lambda_1 y + 1) + \frac{1}{\lambda_1} \right) dy \\
&= \int_0^{+\infty} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1 (\lambda_3 - \lambda_2)} (e^{-\lambda_2 y} - e^{-\lambda_3 y}) (-e^{-\lambda_1 y} (\lambda_1 y + 1) + 1) dy \\
&= \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1 (\lambda_3 - \lambda_2)} \left(\int_0^{+\infty} -(e^{-\lambda_2 y} - e^{-\lambda_3 y}) e^{-\lambda_1 y} (\lambda_1 y + 1) dy + \int_0^{+\infty} (e^{-\lambda_2 y} - e^{-\lambda_3 y}) dy \right) \\
&= \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1 (\lambda_3 - \lambda_2)} \left(- \int_0^{+\infty} e^{-(\lambda_2 + \lambda_1) y} \lambda_1 y dy - \int_0^{+\infty} e^{-(\lambda_2 + \lambda_1) y} dy \right. \\
&\quad \left. + \int_0^{+\infty} e^{-(\lambda_3 + \lambda_1) y} \lambda_1 y dy + \int_0^{+\infty} e^{-(\lambda_3 + \lambda_1) y} dy + \int_0^{+\infty} e^{-\lambda_2 y} dy - \int_0^{+\infty} e^{-\lambda_3 y} dy \right) \\
&= \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1 (\lambda_3 - \lambda_2)} \left(- \frac{\lambda_1 e^{-(\lambda_2 + \lambda_1) y} (-(\lambda_2 + \lambda_1) y - 1)}{(\lambda_2 + \lambda_1)^2} \Big|_0^{+\infty} - \frac{e^{-(\lambda_2 + \lambda_1) y}}{-(\lambda_2 + \lambda_1)} \Big|_0^{+\infty} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\lambda_1 e^{-(\lambda_3 + \lambda_1) y} (-(\lambda_3 + \lambda_1) y - 1)}{(\lambda_3 + \lambda_1)^2} \Big|_0^{+\infty} + \frac{e^{-(\lambda_3 + \lambda_1) y}}{-(\lambda_3 + \lambda_1)} \Big|_0^{+\infty} + \frac{e^{-\lambda_2 y}}{-\lambda_2} \Big|_0^{+\infty} - \frac{e^{-\lambda_3 y}}{-\lambda_3} \Big|_0^{+\infty} \right) \\
&= \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1 (\lambda_3 - \lambda_2)} \left(-\frac{\lambda_1}{(\lambda_2 + \lambda_1)^2} - \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_1} + \frac{\lambda_1}{(\lambda_3 + \lambda_1)^2} + \frac{1}{\lambda_3 + \lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_3} \right)
\end{aligned} \tag{B.10}$$

Resolução da segunda integral da Eq. (B.9):

$$\begin{aligned}
& \int_0^{+\infty} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 y} - e^{-\lambda_3 y}) e^{-\lambda_1 y} y dy \\
&= \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} \left(\int_0^{+\infty} e^{-(\lambda_2 + \lambda_1) y} y dy - \int_0^{+\infty} e^{-(\lambda_3 + \lambda_1) y} y dy \right) \\
&= \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} \left(\frac{e^{-(\lambda_2 + \lambda_1) y}}{(\lambda_2 + \lambda_1)^2} (-(\lambda_2 + \lambda_1) y - 1) \Big|_0^{+\infty} - \frac{e^{-(\lambda_3 + \lambda_1) y}}{(\lambda_3 + \lambda_1)^2} (-(\lambda_3 + \lambda_1) y - 1) \Big|_0^{+\infty} \right) \\
&= \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} \left(\frac{1}{(\lambda_2 + \lambda_1)^2} - \frac{1}{(\lambda_3 + \lambda_1)^2} \right)
\end{aligned} \tag{B.11}$$

Finalmente, somando as expressões (B.10) e (B.11), temos que:

$$E[\min(X, Y)] = \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1 (\lambda_3 - \lambda_2)} \left(-\frac{1}{\lambda_2 + \lambda_1} + \frac{1}{\lambda_3 + \lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_3} \right) \tag{B.12}$$