

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DO TEMPO DE VIDA DE ENLACES
EM REDES MÓVEIS AD HOC PARA
O MODELO *RANDOM WAYPOINT***

Roberto Ramos Colletti

Brasília, Agosto de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DO TEMPO DE VIDA DE ENLACES
EM REDES MÓVEIS AD HOC PARA
O MODELO *RANDOM WAYPOINT***

Roberto Ramos Colletti

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Elétrica*

Banca Examinadora

Prof. Renato Mariz de Moraes, ENE/UnB

Orientador

Prof. Paulo Roberto de Lira Gondim,

ENE/UnB

Examinador interno

Prof. Paulo Cardieri, FEEC/UNICAMP

Examinador externo

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DO TEMPO DE VIDA DE ENLACES EM REDES MÓVEIS AD
HOC PARA O MODELO RANDOM WAYPOINT

ROBERTO RAMOS COLLETTI

ORIENTADOR: RENATO MARIZ DE MORAES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA DE SISTEMAS ELETRÔNICOS E DE AUTOMAÇÃO

PUBLICAÇÃO: PPGEA.DM - 575/2014

BRASÍLIA/DF: AGOSTO - 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

COLLETTI, ROBERTO RAMOS

Análise do Tempo de Vida de Enlaces em Redes Móveis

Ad Hoc para o Modelo Random Waypoint. [Distrito Federal] 2014.

xvii, 44p., 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia de Sistemas

Eletrônicos e de Automação, 2014)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Redes Ad Hoc

2. Duração de Enlace

3. Duração Residual de Enlace

4. Random Waypoint

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COLLETTI, R. R. (2014). Análise do Tempo de Vida em Enlaces em Redes Móveis Ad Hoc para o Modelo Random Waypoint. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e de Automação, Publicação PPGEA.DM - 575/2014, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 44p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Roberto Ramos Colletti.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise do Tempo de Vida em Enlaces em Redes Móveis Ad Hoc para o Modelo Random Waypoint.

GRAU / ANO: Mestre / 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Roberto Ramos Colletti

SHIS QL 2 Conjunto 1, Casa 6

71610-015 Brasília - DF - Brasil.

Dedicatória

Dedico esse trabalho aos meu pais, Roberto e Déa, ao meu irmão Marcelo, e em especial à minha namorada, Nayara. Sem eles não teria chegado até aqui.

Roberto Ramos Colletti

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Paulo Cardieri pela disposição em avaliar e prestigiar esse trabalho de mestrado. Ao Prof. Paulo Gondim, pela contribuição em minha formação na disciplina de Redes de Comunicação de Dados, fundamental para a realização dessa dissertação, e por avaliar e prestigiar esse trabalho de mestrado. Agradeço, por fim, ao meu orientador e amigo, Prof. Renato Mariz de Moraes, pela contínua inspiração, por guiar esse trabalho durante as situações de incerteza e enxergar possibilidades, sempre sugerindo novos caminhos, além de contribuir com minha formação nas inúmeras disciplinas lecionadas. Obrigado, professores!

Roberto Ramos Colletti

RESUMO

Nesse trabalho, é proposto um modelo analítico para a avaliação do tempo de vida de enlaces (ou LLT, do inglês *link lifetime*) para o modelo de mobilidade *Random Waypoint* (RWP), em redes móveis *ad hoc*. A partir do método do jacobiano para obtenção da função densidade de probabilidade (ou pdf, do inglês *probability density function*) de funções de variáveis aleatórias, as pdfs do tempo de vida do enlace e do tempo de vida residual são desenvolvidas para qualquer escolha de velocidades no RWP. Os resultados obtidos são comparados com simulações de enlaces feitas usando o RWP e o *Uniform Mobility Model* (UMM). Além disso, com uma relação conhecida da teoria de processos de renovação, encontra-se a estatística completa do tempo de vida residual (*Residual Link Lifetimes* ou RLL) correspondente. Ainda, investigam-se alguns cenários de fronteira onde a simulação não se comporta como o modelo, definindo-se seu escopo de aplicação. Por fim, por meio das simulações, mostra-se que o modelo analítico desenvolvido para o RWP pode ser empregado também para descrever o tempo de vida de enlaces no UMM.

ABSTRACT

In this work, we propose an analytical model to evaluate the link lifetime (LLT) for the Random Waypoint (RWP) mobility model. By employing the jacobian method used to obtain the probability density function (pdf) of functions of random variables, we derive the pdfs of link lifetime (LLT) and residual link lifetime (RLL) under any choice of speeds for the RWP model. Results are compared with simulations performed using both RWP and Uniform Mobility Model (UMM). Further on, employing the theory of renewal processes, we derive the corresponding statistics of residual link lifetime. Some limiting scenarios that are shown not to agree with the model are investigated, thus, defining its scope. Lastly, it is shown that the model can be employed to describe link lifetime under UMM.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	MODELOS DE MOBILIDADE	1
1.3	MEDIDAS DE DESEMPENHO E A DURAÇÃO DO ENLACE	5
1.4	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	6
1.5	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	INTRODUÇÃO	7
2.2	<i>Link Lifetime as a Function of Node Mobility in MANETs with Restricted Mobility: Modeling and Applications</i> (WU, X. <i>et al</i> , 2007)	7
2.3	<i>The Impact of Node's Mobility on Link-detection based on Routing Hello Messages</i> (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2010)	9
2.4	<i>Analysis of Link Lifetime in Wireless Mobile Networks</i> (NAYEBI <i>et al.</i> , 2012)	10
2.5	<i>Link Duration of the Random Way Point Model in Mobile Ad Hoc Networks</i> (TSAO <i>et al</i>)	12
2.6	CONCLUSÕES	13
3	MODELO ANALÍTICO PROPOSTO PARA O LLT	14
3.1	INTRODUÇÃO	14
3.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	14
3.2.1	MÉTODO DO JACOBIANO	14
3.2.2	VELOCIDADE RELATIVA DOS NÓS	16
3.2.3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO LLT	20
3.3	CONCLUSÕES	25
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	26
4.1	INTRODUÇÃO	26
4.2	DESCRIÇÃO DOS SIMULADORES	26
4.3	VALIDAÇÃO DA VELOCIDADE RELATIVA	27
4.4	VALIDAÇÃO DOS ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA	29
4.5	VALIDAÇÃO DO MODELO DE LLT	30
4.6	CÁLCULO NUMÉRICO DO RLL	34

4.7	COMPARAÇÃO ENTRE O RWP E O UMM	36
4.8	CONCLUSÕES	38
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	ANEXOS	43
I	DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD	44

LISTA DE FIGURAS

1.1	Fenômeno de distribuição não-homogênea dos nós no RWP.	2
1.2	Fenômeno de decaimento de velocidade no modelo RWP.....	3
1.3	Distribuição homogênea dos nós no UMM.	4
1.4	LLT e RLL	6
2.1	Modelo da estrutura da rede. Retirado de [1].	8
2.2	Cadeia de Markov para avaliação do LLT. Fonte: [1].....	8
2.3	Área $\alpha_{t+\Delta_t}$ usada no cálculo da Equação (2.1). Fonte: [2].....	9
2.4	Resultado analítico e simulações para probabilidade de duração de enlace. Fonte: [2].	10
2.5	Modelo utilizado em Nayebi <i>et al.</i>	11
2.6	Aproximação para velocidades relativas usada em [3].	13
2.7	Durações de enlace para o cenário de $v_{min} = 0.005$, $v_{max} = 0.015$. Fonte: [3].	13
3.1	Modelo geométrico usado para o desenvolvimento do LLT.	21
3.2	Intervalo de integração \mathbb{D}	25
4.1	Velocidades relativas $f_{V_r}(v_r)$ (global) e $f_{V_e}(v_e)$ (em enlaces) - analítica e em simulação, sob os quatro cenários da Tabela 4.1.	28
4.2	Comparação entre os ângulos de incidência analítico e experimentais dos quatro cenários da Tabela 4.1.	30
4.3	LLT analítico (Equação (3.52)) e simulação sob os quatro cenários da Tabela 4.2.	31
4.4	LLT analítico (Equação (3.52)) e simulação em áreas de tamanhos distintos.	32
4.5	Distribuições empíricas do LLT em enlaces com mudança de trajetória.....	33
4.6	RLL numérico obtido a partir da Equação (2.7) para os quatro cenários de mobilidade da Tabela 4.1.	35
4.7	Diferença percentual na distribuição cumulativa complementar do RLL nos cenários de mobilidade 1 e 2.....	36
4.8	LLT dos modelos de mobilidade RWP e UMM.	38

LISTA DE TABELAS

4.1	Cenários de mobilidade usados.	27
4.2	Parâmetros utilizados nas simulações em MATLAB e no ONE.....	29
4.3	Proporções entre enlaces simples e compostos.....	34
4.4	Distâncias médias de trajetória dos nós no RWP.....	37

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

BRD	<i>Borderless Random Direction</i>
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i>
DTN	<i>Delay Tolerant Networks</i>
LLT	<i>Link Lifetime</i>
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network</i>
ONE	<i>Opportunistic Network Simulator</i>
RD	<i>Random Direction</i>
RLL	<i>Residual Link Lifetime</i>
RPGM	<i>Reference Point Group Mobility</i>
RW	<i>Random Walk</i>
RWP	<i>Random Waypoint</i>
UMM	<i>Uniform Mobility Model</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

As redes *ad hoc* móveis sem fio (*MANETs*, do inglês *Mobile Ad hoc NETWORKs*) têm sido objeto de pesquisa extensiva nos últimos anos. Nesse tipo de rede, não há uma entidade central que coordene a comunicação e controle o seu funcionamento. Assim, o funcionamento dos protocolos das camadas física, de acesso e de roteamento (e possivelmente demais camadas) fica a cargo dos próprios nós, que podem ser fixos ou móveis. Outra característica relevante deste tipo de rede é a utilização de protocolos que usam poucos recursos computacionais e consomem pouca energia, visto que estas redes são geralmente compostas por equipamentos portáteis ou móveis, tais como celulares ou sensores, com energia limitada e processadores simples. A característica mais interessante dessas redes móveis é alteração topológica constante e imprevisível, altamente dependente de como os participantes da rede se movimentam dentro da área da rede, o que gera grande impacto em toda a pilha de protocolos e medidas de desempenho. Por exemplo, em [4], é mostrado que a mobilidade da rede pode ser usada para aumentar sua capacidade. Com isso, surge a necessidade do uso de modelos de mobilidade bem definidos para simulação e análise, que podem ou não ter características estocásticas.

1.2 Modelos de mobilidade

A mobilidade é um fator que afeta o desempenho da rede em várias camadas, e é a causa de mudança frequente na topologia. Na literatura existem vários modelos propostos. Alguns deles têm o comportamento altamente estocástico e imprevisível, como o *Random Waypoint* (RWP) [5], o *Uniform Mobility Model* (UMM), o *Random Direction* (RD) [6] e o *Random Walk* (RW) [5], que serão descritos a seguir.

O RWP é um dos modelos mais usados na literatura e um dos que se usa nesse trabalho. Esse modelo foi proposto para avaliar o desempenho do protocolo de roteamento DSR (do inglês *Dynamic Source Routing*) e se tornou padrão na simulação de redes sem fio. Nesse modelo, os nós se movem de acordo com as seguintes regras:

1. Dada uma área de simulação retangular de dimensões arbitrárias, os nós são inicialmente distribuídos de acordo com a distribuição uniforme.
2. Cada nó escolhe um ponto de destino, distribuído uniformemente na área, e viaja até o destino com velocidade V , uniformemente distribuída entre $[v_{min}, v_{max}]$ arbitrários.
3. Ao chegar ao destino, o nó opcionalmente aguarda um tempo de pausa (*pause time*) e então repete o passo anterior.

Apesar de sua simplicidade, o RWP apresenta características não observadas à primeira vista: a velocidade média dos nós tende a zero quando $t \rightarrow \infty$, no caso em que $v_{min} = 0$, nunca atingindo um valor estacionário. Outro problema encontrado diz respeito à distribuição espacial dos nós. No RWP, com o passar do tempo, os nós tendem a se concentrar no centro da área de simulação, em detrimento das bordas. Esse comportamento pode ser indesejável quando se quer avaliar algum protocolo ou medida de desempenho sob um cenário estável e homogêneo, em que todos os nós apresentem as mesmas características. O fenômeno de concentração dos nós é estudado em [7], ao passo que o fenômeno de concentração dos nós é investigado em [8]. A Figura 1.1 ilustra a característica de concentração dos nós no RWP.

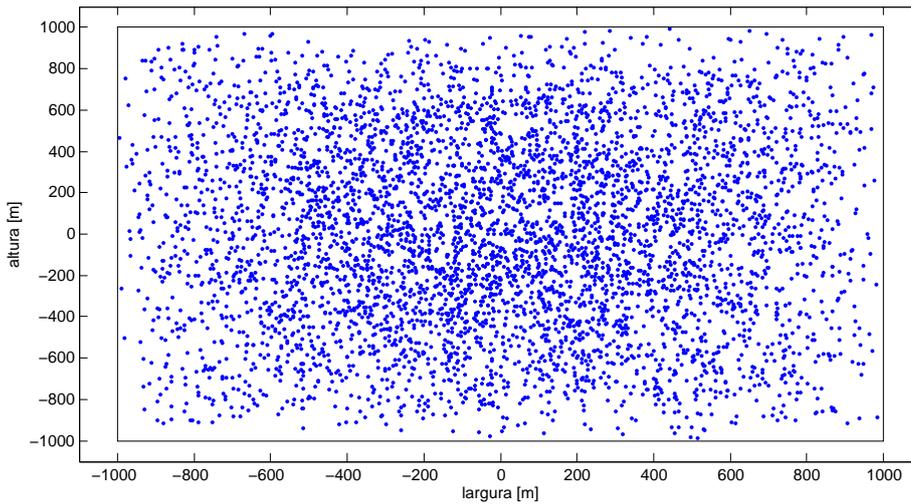


Figura 1.1: Fenômeno de distribuição não-homogênea dos nós no RWP.

Correções para os problemas de concentração dos nós e decaimento de velocidade foram propostas em [6] e [7], respectivamente. O problema de não se atingir a estacionariedade pode ser corrigido escolhendo-se $v_{min} \neq 0$. Dessa forma, a velocidade média tende a decair para um valor diferente de 0, encontrando um valor estacionário. Com essa correção, a distribuição estacionária de velocidade passa a ser dada por

$$f_V(v) = \frac{1}{v \cdot \ln \frac{v_{max}}{v_{min}}}, \quad (1.1)$$

com média $E[V]$ dada por

$$E[V] = \frac{V_{max} - V_{min}}{\ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}. \quad (1.2)$$

A figura 1.2 ilustra o fenômeno de decaimento de velocidade quando $v_{min} = 0$ e quando $v_{min} \neq 0$.

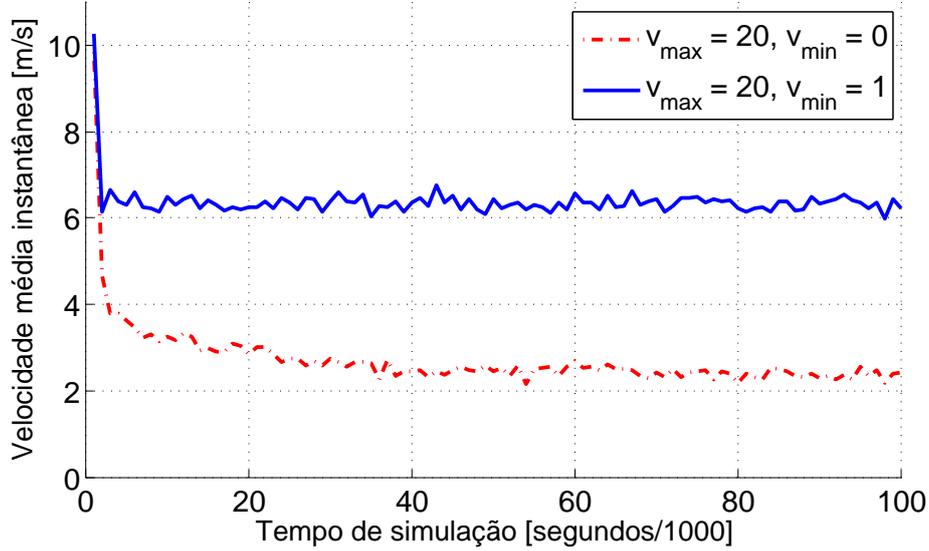


Figura 1.2: Fenômeno de decaimento de velocidade no modelo RWP.

O modelo de mobilidade UMM é o segundo modelo que utilizamos nesse trabalho e foi proposto para ter um comportamento similar ao RWP, também apresentando decaimento de velocidade no início e eventualmente atingindo sua estacionariedade. Entretanto, ao contrário do RWP, esse modelo apresenta a propriedade de distribuição homogênea dos nós na área de simulação, como mostra a Figura 1.3. Nesse modelo, os nós se movimentam da seguinte forma: inicialmente, os nós são distribuídos uniformemente na área de simulação e se movem com velocidade V uniformemente distribuída no intervalo $[v_{min}v_{max}]$ e direção uniformemente distribuída no intervalo $[0, 2\pi)$. Uma vez escolhidas a velocidade e a direção, os nós viajam uma distância D , exponencialmente distribuída com parâmetro μ . Se o nó eventualmente alcançar a fronteira da área de simulação, ele é refletido, como se numa colisão elástica com uma superfície lisa. É pertinente observar que esse modelo foi utilizado nesse trabalho pela sua simplicidade de implementação e por já ter sido usado anteriormente em [9].

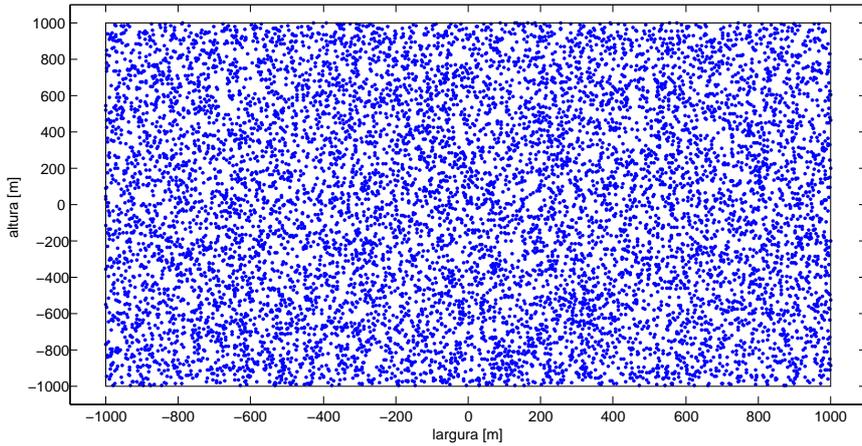


Figura 1.3: Distribuição homogênea dos nós no UMM.

O modelo de mobilidade RD é uma modificação do RWP e também apresenta concentração homogênea dos nós. A modificação consiste em os nós escolherem um ângulo de trajetória em $[0, 2\pi)$ e se movimentarem até atingir os limites da área de simulação. Há ainda uma modificação do RD, o *Borderless Random Direction* (BRD), que consiste em eliminar artificialmente as fronteiras da área de simulação. Isso é feito fazendo com que um nó que saia de um lado da área de simulação, e sem parar, entre de volta pelo lado oposto ao que saiu. Dessa forma, podemos imaginar a área de simulação como sendo um toróide. Não tendo fronteiras de movimento, o modelo elimina os efeitos de borda, que são causados pela mudança de trajetória e velocidade nas bordas da área de simulação. Entretanto, esse cenário sem fronteiras pode ser considerado incoerente se comparado com o mundo real.

O RW é um modelo descrito pela primeira vez por Einstein em 1926 para descrever o movimento das partículas de um gás, e utilizado em redes sem-fio devido ao seu comportamento errático. O movimento dos nós se assemelha bastante ao RD, com a seguinte ressalva: a trajetória do nó só termina assim que ele viaja uma distância d pré-definida ou durante um intervalo t de tempo. Caso o nó encontre a borda da área de simulação, ele é "rebatido" e se movimenta na direção oposta, como se numa colisão elástica com uma superfície lisa.

Outros modelos apresentam certa dependência espacial, como o *Reference Point Group Mobility Model* (RPGM) [5]. Nesse modelo, há os papéis de líder de grupo e membro de grupo: os nós líderes se movimentam de acordo com um caminho pré-definido, enquanto os nós membros se movimentam em direções aleatórias dentro de um raio R_{max} em torno do líder. Ainda, outros modelos apresentam dependência temporal, como o *Gauss-Markov* [10], cujas velocidades são modeladas como processos estocásticos de *Gauss-Markov* e altamente correlacionadas no tempo.

Em alguns outros modelos, há a tentativa de modelar características da vida real, como no modelo de mobilidade *Manhattan* [11], que descreve o movimento de carros e pessoas em ruas dispostas em formato de grade. Mais recentemente, se propões que a natureza do movimento humano seria do tipo *Levy-walk* [12], que é um modelo adaptado do RW onde a distribuição do comprimento das trajetórias é do tipo cauda longa (uma distribuição do tipo cauda longa é aquela

cuja cauda não é limitada por uma exponencial).

Apesar dos comportamentos adversos observados no RWP, decidiu-se pelo seu uso nesse trabalho pelo recorrente emprego em uma grande quantidade de estudos. Nas conferências *MobiHoc* (*ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*) de 2006 a 2010, mostrou-se que em 23% dos trabalhos que empregam modelos de mobilidade, quase um terço (32%) escolheu usar o RWP. Com essa escolha, espera-se que esse trabalho possa servir de auxílio para outros autores que utilizem o RWP e tratem do mesmo tema ou de temas conexos.

1.3 Medidas de desempenho e a duração do enlace

Nas simulações de rede, sempre há o interesse em extrair medidas de desempenho, que servem de indicativo para a eficiência de algum protocolo existente, a eficácia de um protocolo em desenvolvimento, por exemplo, ou até mesmo para validar algum modelo matemático proposto. São várias as medidas de rede disponíveis na literatura. Por exemplo, nas conferências *MobiHoc* de 2006 a 2010, algumas das medidas mais utilizadas em ordem decrescente de utilização são: a taxa de entrega de pacotes, o atraso médio na entrega de pacotes, a taxa de descarte de pacotes, o número de pacotes de controle (de uma ou mais camadas), a vazão (ou *throughput*) e o número médio de saltos [13]. Essas medidas podem ser classificadas como de alto nível, ou seja, sofrem influência de várias camadas de protocolos. Por outro lado, medidas intermediárias ou de baixo nível medem o desempenho de protocolos de camadas mais baixas. Uma dessas medidas é a duração de enlace (LLT, do inglês *link lifetime*, ou ainda, *contact time*). O LLT consiste no intervalo de tempo em que dois nós móveis quaisquer permanecem comunicáveis e é altamente dependente da mobilidade da rede, pois esta por sua vez determina a maneira como cada nó se encontra durante as trajetórias e influencia a capacidade de troca de dados por meio dos enlaces de comunicação. Nas simulações de rede em que o LLT é medido, geralmente os nós têm raios de comunicação bem definidos, o que facilita sua modelagem analítica e avaliação em simulações.

O conhecimento do comportamento do LLT em uma rede é de fundamental importância, uma vez que é uma forma de caracterizar a conectividade da rede, conhecer melhor sua capacidade e confiabilidade, e permitir que algumas questões sejam respondidas sem a recorrência de simulações. Por exemplo, esse conhecimento permite responder a várias questões de projeto de protocolos, como o tamanho ótimo de pacote para que se minimize a perda ou o atraso, ou o tamanho mínimo dos *buffers* usados na transmissão para que não haja perda considerável [1], para melhorar a eficiência na escolha e manutenção de rotas pelos protocolos de roteamento, e para elaborar políticas de qualidade de serviço para usuários [14]. Como exemplos da aplicação dessa medida, em [15], a eficiência do protocolo DSR é melhorada usando-se a informação da duração de enlace. Em [16], propõe-se um protocolo de roteamento que leva em consideração a estabilidade do enlace e o consumo de energia, além de ser comparado com outros protocolos, e em [17], a modelagem do LLT é usada para encontrar a combinação ótima entre o uso de estratégias reativas e proativas de roteamento. Dessa forma, se revelando como um ponto comum em vários estudos, fica evidente o quanto a medida está intrinsecamente relacionada com vários tópicos de redes sem fio.

Uma medida relacionada de interesse é o tempo de vida residual (*residual link lifetime*, ou RLL) de um enlace. O RLL consiste no intervalo de tempo entre um instante aleatório e o fim desse enlace. Na prática, essa medida pode ser traduzida de várias formas: o tempo entre o estabelecimento de uma rota e a quebra do enlace, o tempo restante que um nó tem para transmitir um pacote, ou o tempo de vida medido pelo nó (supondo medições aleatórias), o que suscita grande interesse em conhecê-la, tanto quanto o LLT. A Figura 1.4 ilustra o LLT e o RLL. A duração do enlace é dada por Δt_{LLT} , enquanto o RLL é dado pela diferença $\Delta t_{LLT} - \Delta t_{aleatorio}$.

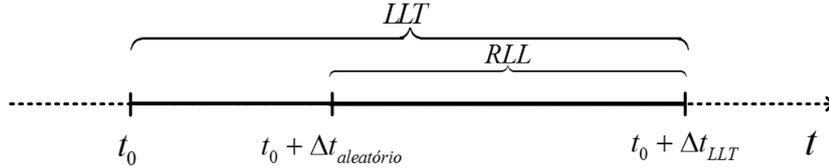


Figura 1.4: LLT e RLL

1.4 Contribuições do trabalho

A principal contribuição desse trabalho é a formulação de um modelo analítico que descreve a estatística completa da duração de enlace em uma rede *ad hoc* móvel sem fio, usando o RWP estável¹ como modelo de mobilidade. Para tanto, investigando a mobilidade dos nós, propusemos ainda uma expressão analítica para a velocidade relativa dos nós.

Ressalta-se que de todos os artigos investigados que tratam da modelagem analítica do LLT, esse trabalho apresenta o resultado analítico que mais se aproxima das simulações com o modelo RWP. Verifica-se também alguns casos extremos onde a simulação não se comporta conforme o modelo. Ainda, mostra-se experimentalmente que o modelo analítico proposto para o RWP pode ser estendido para o UMM, onde a concentração dos nós é homogênea, concluindo-se que o LLT sofre pouca influência da distribuição espacial dos nós nos cenários investigados. Por fim, parte dos resultados desta dissertação foi publicada e apresentada na conferência IEEE ICON 2013 (*19th IEEE International Conference on Networks*) [18].

1.5 Apresentação do manuscrito

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema de estudo, a fim de levantar as principais contribuições e colocá-las em perspectiva com as contribuições desse trabalho. Em seguida, o Capítulo 3 descreve a formulação matemática do modelo de LLT, utilizando o método do jacobiano. No Capítulo 4, são apresentados resultados numéricos do modelo, os quais são comparados com simulações, a fim de validá-los. Por fim, as conclusões do trabalho são apresentadas no Capítulo 5.

¹Como "estável", entende-se que a velocidade média dos nós atinge o regime estacionário e seja não-nula.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

A duração de enlace é uma área de estudo que tem chamado a atenção dos pesquisadores nos últimos anos, embora ainda haja vários tópicos inexplorados a respeito dessa medida. Se faz necessário o registro dos principais artigos que tratam do tema, com a finalidade de contextualizar esse trabalho ao leitor, além de apresentar os principais resultados de cada artigo e utilizá-los como base teórica para o problema estudado aqui. As próximas seções possuem como título cada trabalho analisado.

2.2 *Link Lifetime as a Function of Node Mobility in MANETs with Restricted Mobility: Modeling and Applications* (Wu, X. et al, 2007)

Esse artigo [1] apresenta um modelo analítico de LLT em uma *MANET* com mobilidade restrita. A área total é dividida em várias células, retângulos de dimensões $L \times L$, dentro dos quais os nós são distribuídos e ficam restritos durante todo o tempo. A região de comunicação entre células vizinhas é um círculo com centro no limite entre as duas células, de acordo com a Figura 2.1. A razão é diminuir a interferência excessiva entre células. O modelo de mobilidade escolhido é o *Random Direction*. Para comunicação, um nó escolhe outro nó aleatoriamente, que na maioria das vezes não se encontra na mesma célula. Assim, o tráfego de rede "cruza" as células até chegar ao destino, o que lembra um modelo de redes celulares.

Nesse trabalho, o autor considera o caso em que há mudanças de trajetória durante o tempo de vida dos enlaces, e modela o LLT do nó como uma cadeia de Markov de dois estados (Figura 2.2): no estado S_0 , o nó termina sua trajetória dentro da zona de comunicação, enquanto no estado S_1 , o nó sai da zona antes que sua trajetória termine. P_s é a probabilidade de o nó terminar uma trajetória dentro do raio de comunicação. Quando as trajetórias percorridas são muito maiores que o raio da zona de comunicação, tem-se $P_s \ll 1$ e a probabilidade de transição para o estado

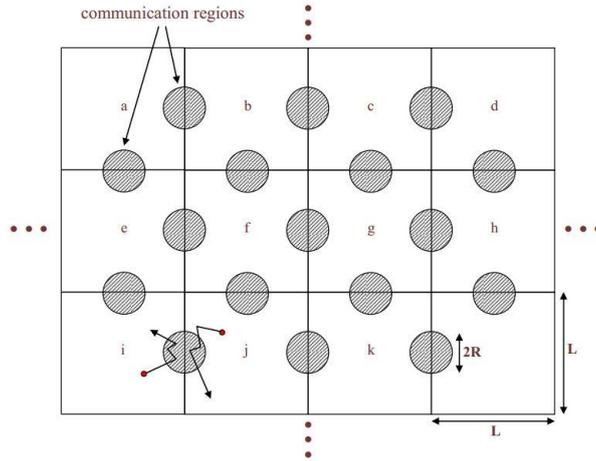


Figura 2.1: Modelo da estrutura da rede. Retirado de [1].

S_1 é muito pequena. Verifica-se que $S_1(t)$, a probabilidade de o nó sair da zona de comunicação em até t unidades de tempo, é uma boa aproximação para o LLT verificado em simulações.

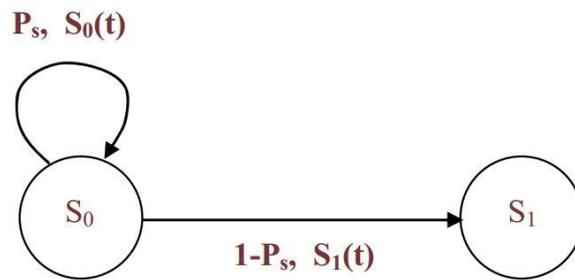


Figura 2.2: Cadeia de Markov para avaliação do LLT. Fonte: [1].

Com o comportamento do LLT caracterizado, o autor propõe dois esquema de segmentação de pacotes, usando transmissão a taxas constantes. O esquema com prioridade em interrupção (*outage*) de transmissão consiste em encontrar um tamanho máximo de pacote tal que satisfaça um requisito de interrupção máximo pré-definido (probabilidade de interrupção). O esquema com prioridade em vazão consiste em elaborar uma função de custo que incorpore o efeito negativo da retransmissão de pacote. Com isso, encontra-se o tamanho ótimo do pacote que maximize a vazão efetiva da rede. Em ambos os esquemas, é verificada a forte dependência entre o tamanho ótimo do pacote e a duração de enlace, o que é usado para maximizar a vazão da rede. Ainda, em ambos os esquemas, é verificada a relação de proporcionalidade entre a duração do enlace e o raio relativo (razão entre o raio de transmissão e a velocidade do nó). Por último, o autor avalia o comportamento assintótico do atraso, vazão e armazenamento de pacotes com relação ao LLT, mais uma vez demonstrando a importância dessa medida.

2.3 *The Impact of Node's Mobility on Link-detection based on Routing Hello Messages (Oliveira et al., 2010)*

Esse artigo [2] realiza um interessante estudo ao investigar a mobilidade da rede com o modelo RWP, e a duração de enlace, com a finalidade de definir alguns dos parâmetros de desempenho do protocolo de roteamento AODV [19]. O AODV periodicamente faz o *broadcast* (difusão) de pacotes vazios com o simples intuito de avisar aos seus vizinhos da conectividade dos enlaces formados, de forma a manter as rotas estabelecidas ativas. A periodicidade dessa difusão é dada pelo temporizador *HELLO_INTERVAL*, e denotada por T_B , e os nós podem considerar um enlace ou rota inválidos depois que deixarem de receber um número arbitrário desses pacotes em sequência, digamos, k pacotes, ou seja, após kT_B unidades de tempo. O autor faz uma análise simplificada da probabilidade de um enlace permanecer ativo após o período arbitrário kT_B , ou seja, $p_{link}(kT_B)$, dada por

$$p_{link}(kT_B) = \frac{\alpha_{t+\Delta t}(kE(v_r)T_B)}{\pi r^2}, \quad (2.1)$$

onde $E(v_r)$ é a velocidade relativa média entre os nós e $\alpha_{t+\Delta t}(kE(v_r)T_B)$ é a área sobreposta da Figura 2.3, dada após o nó percorrer uma distância $kE(v_r)T_B$, ou seja, a distância que se percorre após passado um período de kT_B unidades de tempo.

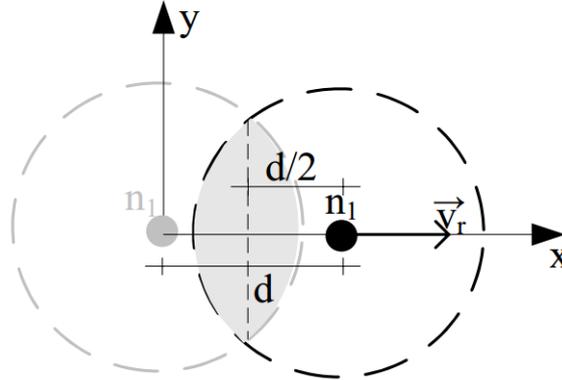


Figura 2.3: Área $\alpha_{t+\Delta t}$ usada no cálculo da Equação (2.1). Fonte: [2].

Para validar a Equação (2.1), foi feita uma simulação sob os cinco cenários de mobilidade do RWP, com velocidade mínima $v_{min} = 1m/s$ e velocidade máxima $v_{max} \in [10, 20, 30, 40, 50]m/s$. O resultado é dado pela Figura 2.4. Esse resultado é importante no sentido de que pode ser comparado com resultados obtidos nesta dissertação, dada a semelhança da contribuição desse artigo com nosso trabalho, permitindo sua comparação com o modelo de duração de enlace proposto aqui.

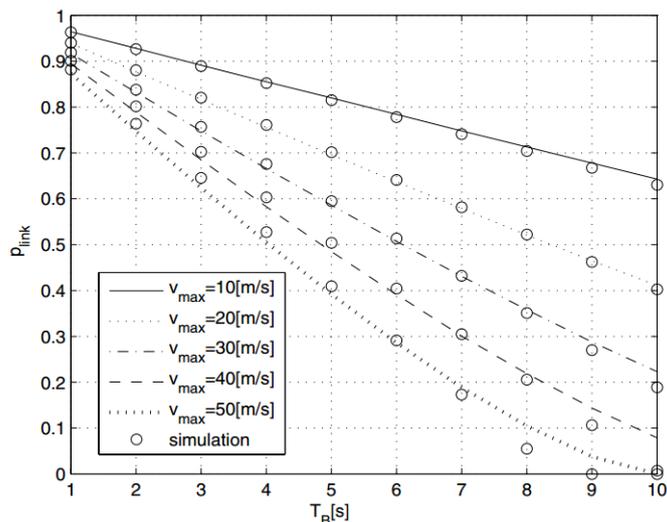


Figura 2.4: Resultado analítico e simulações para probabilidade de duração de enlace. Fonte: [2].

2.4 *Analysis of Link Lifetime in Wireless Mobile Networks (Nayebi et al., 2012)*

Esse artigo [20] apresenta as contribuições mais importantes que foram utilizadas na presente dissertação. Nele, é feito o estudo analítico da distribuição da duração residual do enlace (*residual link lifetime*, ou RLL) sob os modelos de mobilidade *random direction* (RD) e o *borderless random direction* (BRD), bastante utilizados na literatura, mas com comportamento de velocidades distinto do RWP. Ainda, os autores utilizam a teoria de processos de renovação para encontrar a relação entre a duração de enlace (LLT) e a duração residual do enlace (RLL). Simulações de RLL são feitas para os modelos de mobilidade citados e também para o RWP, porém o artigo não contempla estudo analítico para o RWP. Por último, o LLT analítico do modelo RD é comparado com simulações.

Basicamente, o modelo geométrico proposto é dado pela Figura 2.5, que representa o instante aleatório durante a formação de um enlace entre dois nós, N_1 e N_2 . Suas velocidades são representadas respectivamente pelos vetores \vec{V}_1 e \vec{V}_2 , onde V_1 e V_2 são variáveis aleatórias (v.a.s) independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) com distribuição uniforme no intervalo $[0, v_{max}]$, onde v_{max} é a velocidade máxima dos nós. N_1 é colocado como origem do plano cartesiano e N_2 se move com velocidade relativa $\vec{V}_r = \vec{V}_2 - \vec{V}_1$. Para fins de representação, N_2 é colocado ao longo do eixo das abscissas, o que pode ser feito pela rotação do plano cartesiano. p é um valor da v.a. P , a distância residual que falta para N_2 sair do raio de comunicação de N_1 (r). β é o ângulo formado entre a abscissa e \vec{V}_r , e r' é um valor da v.a. R' , descrevendo a distância entre N_1 e N_2 . Em um instante aleatório, supõe-se que N_2 se encontre uniformemente distribuído dentro do raio de comunicação r de N_1 , portanto a função densidade de probabilidade (*pdf*, do inglês *probability density function*) $f_{R'}(r')$ é dada por

$$f_{R'}(r') = \frac{2r'}{r}. \quad (2.2)$$

Da Figura 2.5¹, a duração residual do enlace D é dada por

$$D = \frac{P}{V_r}, \quad (2.3)$$

onde P é a variável aleatória correspondente à distância residual a ser percorrida para que o enlace se quebre.

É mostrado em [20] que a distribuição de D, $f_D(d)$ é dada por

$$f_D(d) = \int_{V_r} f_{V_r}(v_r) \int_{r'} f_{R'}(r') v_r f_{P|R'}(d \cdot v_r | r') dr' dv_r. \quad (2.4)$$

Substituindo a Equação (2.2) em (2.4) e aplicando os limites de integração apropriados, a distribuição $f_D(d)$ do RLL se torna

$$f_D(d) = \begin{cases} h(0, v_{r_{max}}, R - d \cdot v_r), & d \leq \frac{R}{2v_{max}} \\ h(0, R/d, R - d \cdot v_r) + h(R/d, 2v_{max}, d \cdot v_r - R), & \frac{R}{2v_{max}} \leq d \leq \frac{R}{v_{max}} \\ h(0, R/d, R - d \cdot v_r) + h(R/d, 2R/d, d \cdot v_r - R), & d \geq \frac{R}{v_{max}}, \end{cases} \quad (2.5)$$

onde

$$h(a, b, c) = \int_{V_r=a}^b f_{V_r}(v_r) \int_{r=c}^R f_{R'}(r') v_r f_{P|R'}(d \cdot v_r | r') dr' dv_r. \quad (2.6)$$

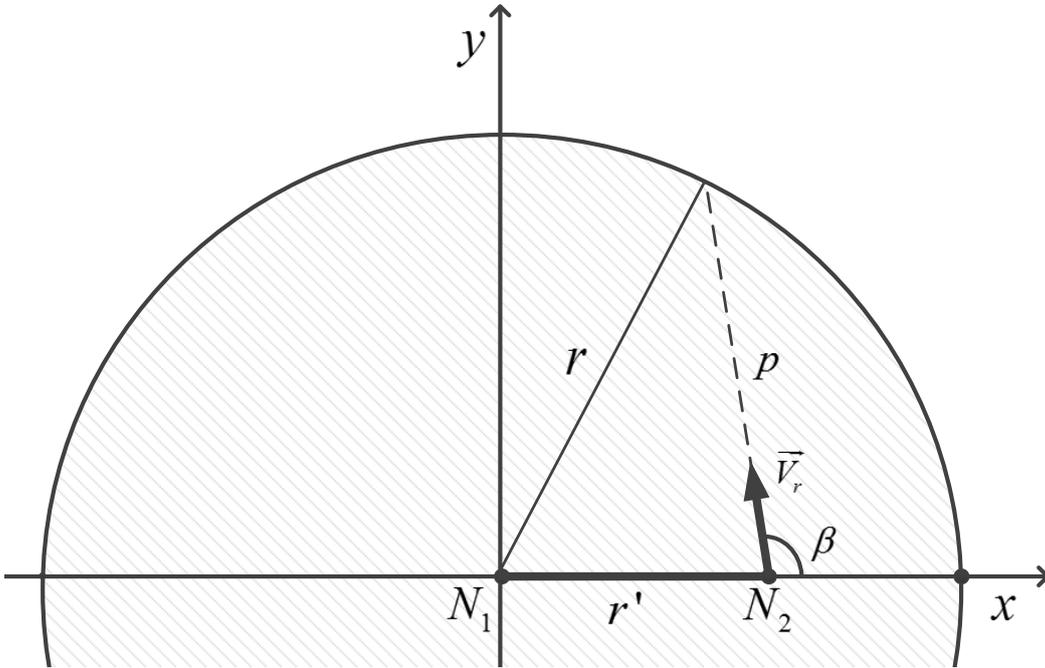


Figura 2.5: Modelo utilizado em Nayebi *et al.*

¹A Figura 2.5 foi redesenhada para a presente dissertação

Dada a distribuição $f_D(d)$ e sua distribuição cumulativa, $F_D(d)$, os autores utilizam um resultado conhecido da teoria de renovação de processos [21], que é a relação entre o tempo de vida residual de um enlace e seu tempo de vida (aqui denominados D e T , respectivamente), dado por

$$f_D(\tau) = \frac{1 - F_T(\tau)}{E[T]}, \quad (2.7)$$

onde $E[T]$ é a média do tempo de vida do enlace.

Analogamente, é possível expressar o tempo de vida em termos do tempo de vida residual de um enlace, dado por

$$f_T(\tau) = \frac{-df_D(\tau)}{d\tau} E[T]. \quad (2.8)$$

A desvantagem de se obter o tempo de vida de um enlace a partir de sua vida residual, usando a Equação (2.8), é a necessidade de se conhecer sua média, $E[T]$, de antemão.

A principal crítica a esse trabalho é que a formulação analítica do RLL é feita somente para o modelo *Random Direction* e sua variante, o *Borderless Random Direction* com velocidades constantes, restringindo sua aplicabilidade a um caso específico de mobilidade, que raramente é observado no mundo real. Além disso, para se encontrar a expressão analítica para a distribuição do LLT a partir do RLL, é necessário conhecer a média do LLT de antemão, o que requer uma análise adicional.

2.5 *Link Duration of the Random Way Point Model in Mobile Ad Hoc Networks (Tsao et al)*

Esse artigo [3] propõe um modelo analítico para a duração do enlace para o RWP baseado em uma análise geométrica dos nós. Uma das contribuições importantes do artigo para a presente dissertação é a derivação dos ângulos de incidência dos nós (a ser abordado no Capítulo 3). Para a modelagem de velocidade relativa V_r entre dois nós com velocidades V_1 e V_2 , entretanto, é usada a seguinte aproximação

$$V_r = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2\cos(\Theta)} \approx \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \left(1 - \frac{V_1V_2}{V_1^2 + V_2^2} \cos(\Theta) \right), \quad (2.9)$$

onde Θ é o menor ângulo entre suas trajetórias. Essa aproximação pode não ser muito precisa em todas as situações. Como mostra a Figura 2.6, considerando dois nós com velocidade de 2m/s, nos casos em que se movem na mesma direção ou em direções parecidas, a aproximação é pouco precisa, ao passo que quando os nós se movem em direções opostas ou quase opostas, a aproximação superestima a velocidade relativa entre eles. Por esse motivo, o modelo proposto no artigo pode reproduzir os resultados de simulações com um erro sistemático, conforme Figura 2.7, em que se observa um desvio entre as curvas teórica e obtidas em simulação.

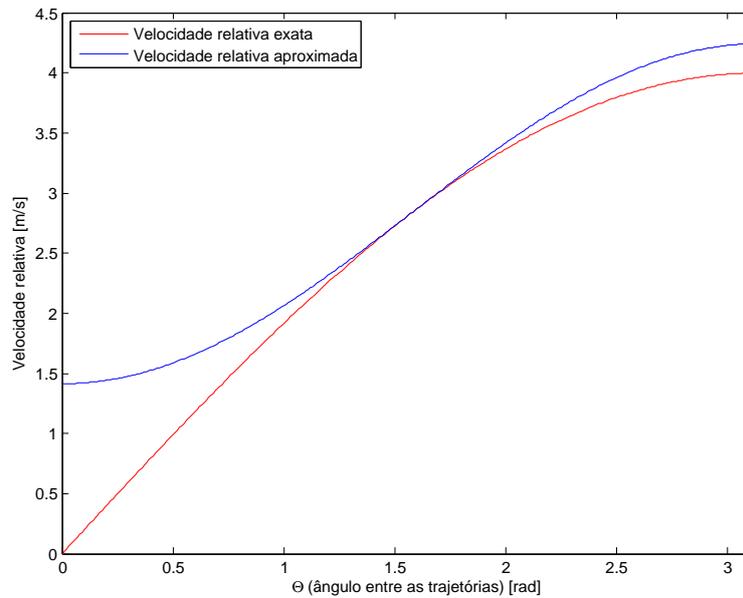


Figura 2.6: Aproximação para velocidades relativas usada em [3].

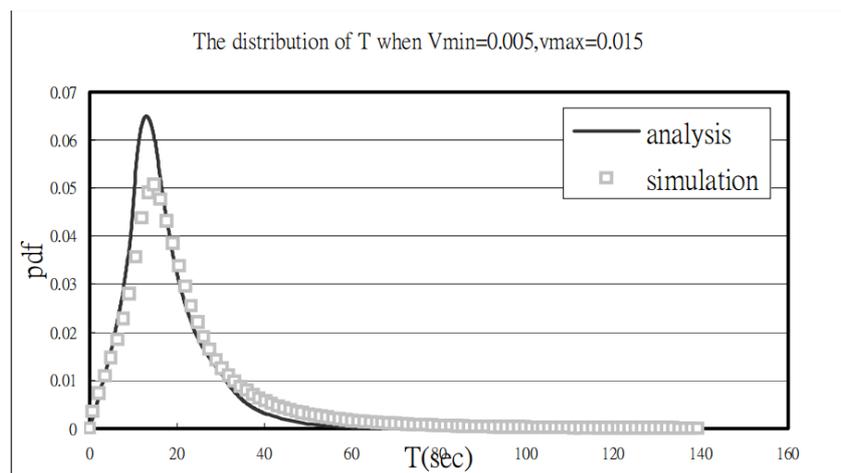


Figura 2.7: Durações de enlace para o cenário de $v_{min} = 0.005$, $v_{max} = 0.015$. Fonte: [3].

2.6 Conclusões

Os trabalhos abordados nesse Capítulo contribuíram significativamente para a elaboração desta dissertação, em especial [20], por fazer um levantamento detalhado sobre a área de pesquisa da dinâmica de enlaces e fornecer referências valiosas para a pesquisa. Demais trabalhos pesquisados e citados, apesar de não serem terem sido detalhados neste Capítulo, também tiveram os resultados explorados e foram de grande serventia na fase de definição do escopo da presente dissertação.

Capítulo 3

Modelo analítico proposto para o LLT

3.1 Introdução

Apresentamos aqui o desenvolvimento matemático do modelo de duração de enlaces em *MANETs* sob o RWP. Sabendo-se que o LLT sofre grande influência do movimento estocástico dos nós, é necessário apresentar preliminarmente as ferramentas matemáticas utilizadas, o desenvolvimento matemático da velocidade relativa dos nós no *Random Waypoint*, seguido pelo desenvolvimento matemático da distribuição de probabilidade do LLT. Por fim, encontra-se o RLL resultante, utilizando uma relação importante entre as duas medidas.

3.2 Formulação matemática

3.2.1 Método do Jacobiano

O método do jacobiano é bastante útil quando se precisa encontrar uma distribuição de probabilidade de alguma v.a. que seja função de uma ou mais v.a.s. O nome do método é explicado pelo uso do jacobiano em sua formulação. O jacobiano nada mais é do que o determinante da matriz jacobiana, que é ferramenta recorrente em diversas áreas do cálculo. Esse método será descrito sucintamente, porém uma demonstração formal pode ser encontrada em [22] [23].

Seja $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ um vetor aleatório contínuo com densidade $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$ conhecida, onde $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$. O vetor $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ é uma transformação de \mathbf{X} , dada por $\mathbf{Y} = g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2, \dots, X_m)$, de modo que $Y_i = g_i(X_1, X_2, \dots, X_m)$, para $i = 1, 2, \dots, m$. Supõe-se que todas as funções g_i têm derivadas parciais contínuas e que o jacobiano da transformação seja diferente de zero para todos os pontos (x_1, x_2, \dots, x_m) , isto é

$$J_g(x) = \begin{vmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \frac{\partial g_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_m} \end{vmatrix}. \quad (3.1)$$

Supõe-se também que o conjunto de equações

$$\begin{aligned} y_1 &= g_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ y_2 &= g_2(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ &\vdots \\ y_m &= g_m(x_1, x_2, \dots, x_m) \end{aligned} \quad (3.2)$$

determina unicamente os x_i 's em função de $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, ou seja, g é bijetora. Representa-se a solução desse sistema por $\mathbf{x} = h(\mathbf{y})$, ou seja,

$$\begin{aligned} x_1 &= h_1(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ x_2 &= h_2(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ &\vdots \\ x_m &= h_m(y_1, y_2, \dots, y_m). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Dessa forma, as variáveis Y_1, Y_2, \dots, Y_m têm densidade conjunta dada por

$$f_{\mathbf{Y}}(\mathbf{y}) = f_{\mathbf{X}}(h(\mathbf{y})) |J_g(h(\mathbf{y}))|^{-1}, \quad (3.4)$$

em que as densidades $f_{\mathbf{X}}$, $f_{\mathbf{Y}}$ e o jacobiano J_g são aplicados nos pontos $x_i = h_i(\mathbf{y})$, para $i = 1, 2, \dots, m$.

Uma das condições para a aplicação do método do jacobiano é que a função $g : X \rightarrow Y$ seja bijetora. Se esse não for o caso, podemos particionar o domínio em subdomínios disjuntos onde, em cada um deles, essa condição seja respeitada. Nesse caso, somamos o resultado da aplicação do método dos jacobianos em cada um dos subdomínios para obter a densidade desejada. Assim, denotando por $\mathbb{D}_1, \mathbb{D}_2, \dots, \mathbb{D}_m$ as partições do domínio e sendo $g^{(i)}$ a função g cujo domínio é \mathbb{D}_i , temos

$$f_{\mathbf{Y}}(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^k f_{\mathbf{X}}(h^{(i)}(\mathbf{y})) |J_{g^{(i)}}(h^{(i)}(\mathbf{y}))|^{-1}, \quad (3.5)$$

em que $h^{(i)}$ é a inversa de $g^{(i)}$, referente ao domínio \mathbb{D}_i .

O jacobiano da função h pode ser calculado no lugar do jacobiano de g . Nesse caso, é interessante ressaltar que

$$J_h(\mathbf{y}) = J_g(h(\mathbf{y}))^{-1}, \quad (3.6)$$

Por fim, cabe dizer que se o vetor \mathbf{Y} da transformação tiver dimensão menor que \mathbf{X} , pode-se usar variáveis auxiliares, que sejam funções escolhidas de \mathbf{X} , até a igualdade de dimensões. Depois da transformação, calcula-se a densidade marginal adequada para encontrar a densidade de \mathbf{Y} .

3.2.2 Velocidade Relativa dos nós

Dentro de uma área e instante arbitrários, sejam dois nós quaisquer (formando um enlace ou não), N_1 e N_2 , com movimentos regidos pelo *Random Waypoint*, com vetores de velocidade \vec{V}_1 e \vec{V}_2 , respectivamente. Esses vetores podem ser representados pelos pares de v.a.s (V_1, Θ_1) and (V_2, Θ_2) , representando valores absolutos e direções de N_1 e N_2 , respectivamente. N_1 é colocado como origem do sistema cartesiano onde os dois nós se movem. Dessa forma, N_2 se move em relação a N_1 com velocidade relativa $\vec{V}_r = \vec{V}_2 - \vec{V}_1$. Usa-se $V_r \triangleq |\vec{V}_r|$ para indicar o valor absoluto da velocidade relativa entre dois nós.

Usando a lei dos cossenos, V_r pode ser expresso por

$$V_r = \sqrt{|V_1|^2 + |V_2|^2 - 2|V_1||V_2|\cos(\Theta_2 - \Theta_1)}. \quad (3.7)$$

Tem-se que V_r é uma v.a., que é função de outras quatro v.a.s, e cuja *pdf* pode ser encontrada usando-se o método do jacobiano, utilizado para transformações de variáveis aleatórias, e descrito na seção 3.2.1. Ademais, é interessante notar que podemos utilizar o método do jacobiano no termo $\cos(\Theta_2 - \Theta_1)$, reduzindo-o a uma única v.a. Primeiro, definimos $\Theta = \Theta_2 - \Theta_1$, cuja *pdf* pode ser encontrada em termos de sua função de distribuição acumulada, dada por

$$F_{\Theta}(\theta) = Pr\{\theta_2 - \theta_1 \leq \theta\} = Pr\{\theta_2 \leq \theta + \theta_1\} = \int_{\theta_1=0}^{2\pi} \int_{\theta_2=0}^{\theta+\theta_1} f_{\Theta_1\Theta_2}(\theta_1, \theta_2) d\theta_2 d\theta_1. \quad (3.8)$$

Portanto, usando a regra de diferenciação de Leibniz, tem-se que

$$f_{\Theta}(\theta) = \frac{dF_{\Theta}(\theta)}{d\theta} = \int_{\theta_1=0}^{2\pi} f_{\Theta_1\Theta_2}(\theta_1, \theta + \theta_1) d\theta_1, \quad (3.9)$$

e como θ_1 e θ_2 são independentes e identicamente distribuídos, afinal dois nós quaisquer escolhem suas trajetórias independentemente e da mesma maneira, então

$$f_{\Theta}(\theta) = \int_{\theta_1=0}^{2\pi} f_{\theta_1}(\theta_1) f_{\theta_2}(\theta + \theta_1) d\theta_1. \quad (3.10)$$

Presumindo que θ_1 e θ_2 são distribuídos uniformemente no intervalo $[0, 2\pi]$, então $f_{\Theta_1}(x) = f_{\Theta_2}(x) = \frac{1}{2\pi}$ e

$$f_{\Theta}(\theta) = \frac{1}{4\pi^2} \begin{cases} \theta + 2\pi, & -2\pi \leq \theta \leq 0 \\ -\theta + 2\pi, & 0 \leq \theta \leq 2\pi. \end{cases} \quad (3.11)$$

A partir de (3.11), podemos encontrar a *pdf* do termo $Z \triangleq \cos(\Theta)$, presente em (3.7), utilizando o método do jacobiano. Seja $Y = \cos(\Theta)$ e sua inversa, $X = \Theta = \cos^{-1}(Y)$ então $f_Y(y)$ pode ser escrita como

$$f_Y(y) = f_{\Theta}(h(y))|J_g(h(y))|^{-1}. \quad (3.12)$$

Como já se discutiu na Seção 3.2.1, uma das condições para o uso do método do jacobiano é que a função de transformação seja bijetora, ou seja, tenha uma única solução. Caso contrário, pode-se particionar o domínio em subconjuntos disjuntos, de forma que em cada conjunto, a condição de bijetividade seja atendida. Isto é,

$$f_Y(y) = \sum_{i=1}^k f_{\Theta}(h^{(i)}(y))|J_{g^{(i)}}(h^{(i)}(y))|^{-1}. \quad (3.13)$$

Sabe-se que a equação $Y = \cos(\Theta)$ tem mais de uma solução no intervalo $[-2\pi, 2\pi]$, dadas por $\theta' = \cos^{-1}(y)$ e $\theta'' = 2\pi - \theta'$. Para o segundo intervalo de (3.11), (3.13) pode ser escrita como

$$\begin{aligned} f_Y(y) &= f_{\Theta}(\theta')|J_g(\cos(\theta'))|^{-1} + f_{\Theta}(\theta'')|J_g(\cos(\theta''))|^{-1} \\ &= \left(-\frac{\theta'}{4\pi^2} + \frac{1}{2\pi}\right)|J_g(\cos(\theta'))|^{-1} + \left(-\frac{\theta''}{4\pi^2} + \frac{1}{2\pi}\right)|J_g(\cos(\theta''))|^{-1} \\ &= \left(-\frac{\theta'}{4\pi^2} + \frac{1}{2\pi}\right)|J_g(\cos(\theta'))|^{-1} + \left(-\frac{2\pi - \theta'}{4\pi^2} + \frac{1}{2\pi}\right)|J_g(\cos(\theta'))|^{-1}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Por fim, temos que

$$\begin{aligned} |J_g(\cos(\theta'))|^{-1} &= \left|\frac{d\cos(\theta')}{d\theta'}\right|^{-1} \\ &= |-\text{sen}(\theta')|^{-1} \\ &= |\sqrt{1 - \cos^2(\theta')}|^{-1} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - y^2}}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

e observando que o jacobiano para solução θ'' é igual para a solução θ' , (3.14) logo se torna

$$\begin{aligned} f_Y(y) &= \left(-\frac{\theta'}{4\pi^2} + \frac{1}{2\pi} - \frac{2\pi - \theta'}{4\pi^2} + \frac{1}{2\pi}\right) \frac{1}{\sqrt{1 - y^2}} \\ &= \frac{1}{\pi\sqrt{1 - y^2}}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Analogamente, fazendo o mesmo desenvolvimento para o primeiro intervalo de (3.11), verifica-se o mesmo resultado obtido em (3.16), logo $f_Y(y)$ é finalmente dado por

$$f_Y(y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{1-y^2}}, & -1 \leq y \leq 1 \\ 0, & \text{caso contrario.} \end{cases} \quad (3.17)$$

Agora, usando (3.17), (3.7) pode ser reescrita como

$$V_r = \sqrt{|V_1|^2 + |V_2|^2 - 2|V_1||V_2|Y}, \quad (3.18)$$

que, graças ao desenvolvimento anterior, é agora função de apenas três v.a.s. Utilizando o método do jacobiano, definimos

$$\begin{aligned} V_r &= \sqrt{|V_1|^2 + |V_2|^2 - 2|V_1||V_2|Y} \\ B &= V_1 \\ C &= V_2. \end{aligned} \quad (3.19)$$

A solução desse sistema de equações é dada por

$$\begin{aligned} V_1 &= B \\ V_2 &= C \\ Y &= \frac{V_r^2 - B^2 - C^2}{-2BC}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

O objetivo agora é encontrar a distribuição de V_r . Formulamos então a seguinte transformação de variáveis aleatórias

$$f_{BCV_r}(b, c, v_r) = f_{V_1V_2Y}(b, c, \frac{v_r^2 - b^2 - c^2}{-2bc}) |J_h(b, c, y)|, \quad (3.21)$$

cujo jacobiano é dado por

$$J(V_r, b, c) = \begin{vmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial b} & \frac{\partial v_1}{\partial c} & \frac{\partial v_1}{\partial v_r} \\ \frac{\partial v_2}{\partial b} & \frac{\partial v_2}{\partial c} & \frac{\partial v_2}{\partial v_r} \\ \frac{\partial y}{\partial b} & \frac{\partial y}{\partial c} & \frac{\partial y}{\partial v_r} \end{vmatrix}, \quad (3.22)$$

que calculado a partir de (3.20), resulta em ¹

¹Observa-se que o determinante dado pela Equação (3.23) não depende dos termos $\frac{\partial y}{\partial b}$ e $\frac{\partial y}{\partial c}$, portanto deixados somente indicados.

$$J(V_r, b, c) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{\partial y}{\partial b} & \frac{\partial y}{\partial c} & \frac{v_r}{bc} \end{vmatrix} = \frac{v_r}{bc}. \quad (3.23)$$

Supondo independência² entre V_1 , V_2 e Θ , tem-se

$$f_{BCV_r}(b, c, v_r) = f_{V_1}(b)f_{V_2}(c)f_Y\left(\frac{v_r^2 - b^2 - c^2}{-2bc}\right)\frac{v_r}{bc}. \quad (3.24)$$

Agora, conhecendo as distribuições de V_1 , V_2 (1.2) e de Y (3.16), podemos escrever (3.24) como

$$f_{BCV_r}(b, c, v_r) = \frac{1}{b \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)} \frac{1}{c \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)} \frac{1}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{b^2 + c^2 - v_r^2}{2bc}\right)^2}} \frac{v_r}{bc}, \quad (3.25)$$

e após algumas manipulações,

$$f_{BCV_r}(b, c, v_r) = \frac{2v_r}{\pi bc \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)^2 \sqrt{(2bc)^2 - (b^2 + c^2 - v_r^2)^2}}. \quad (3.26)$$

Por fim, f_{V_r} pode ser obtida encontrando-se a distribuição marginal de (3.26), dada por

$$f_{V_r}(v_r) = \int_{V_{min}}^{V_{max}} \int_{V_{min}}^{V_{max}} \frac{2v_r}{\pi bc \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)^2 \sqrt{(2bc)^2 - (b^2 + c^2 - v_r^2)^2}} dbdc, \quad (3.27)$$

que pode ser avaliada numericamente. Observa-se que a escolha das variáveis auxiliares B e C deve ser feita cuidadosamente, de forma a simplificar a expressão (3.4) e reduzir o trabalho de se encontrar a densidade marginal. Em [24], é observado que geralmente não há fórmula fechada para (3.4), e que até a avaliação numérica dessa expressão costuma ser difícil. Na presente dissertação, testaram-se múltiplas combinações para as variáveis auxiliares, e a combinação dada por (3.19) foi a que resultava na expressão mais simples, facilitando sua avaliação numérica.

É interessante notar que a distribuição da velocidade relativa entre dois nós que formam um enlace, denotada por $f_{V_e}(v_e)$, não é a mesma para dois nós quaisquer, $f_{V_r}(v_r)$ [24]. A relação entre as duas distribuições é dada por

$$f_{V_e}(v_e) = \frac{v_e f_{V_r}(v_e)}{E[V_r]}. \quad (3.28)$$

A explicação para essa diferença é a seguinte: nós mais velozes tendem a visitar outros nós ("cruzando" a área de comunicação) com mais frequência do que os nós lentos o fazem, afinal percorrem uma distância maior dado certo intervalo de tempo. Isso significa que de todos os enlaces formados, existem mais enlaces formados por nós rápidos, em detrimento daqueles formados por nós lentos,

²A independência entre V_1 e V_2 é justificada pela definição do algoritmo do modelo RWP, valendo o mesmo argumento para a independência de V_1 e V_2 à Θ .

ou seja, há uma relação de proporcionalidade entre a velocidade dos nós e o "peso" que esses nós têm na distribuição de velocidade relativa para nós em enlaces - concluindo-se que nós mais velozes "ditam" o comportamento dessa distribuição.

3.2.3 Formulação matemática do LLT

Uma das características desejáveis do modelo de mobilidade RWP é a sua simplicidade. Em cada trajetória, um nó se move em linha reta e em velocidade constante, antes que outra se inicie. No modelo de LLT proposto nesse trabalho, supõe-se que na maioria das vezes, o comprimento das trajetórias seja bem maior do que o raio de comunicação dos nós. Dessa forma, supõe-se aceitável que seja baixa a probabilidade de haver mudança de trajetória em algum dos nós durante a duração total do enlace³. Dessa forma, a duração de enlace é pequena em relação à duração da trajetória dos nós. Mais à frente, estudaremos os cenários onde o modelo se adequa às simulações típicas do RWP, estudando os casos extremos em que não há adequação a esse modelo de mobilidade. Posto isso, prossegue-se com a apresentação do modelo analítico para a duração de enlaces em *MANETs*.

Sejam dois nós quaisquer, N_1 e N_2 , cada um com raio de transmissão r . Considera-se o momento em que um nó entra no raio de comunicação do outro. De acordo com a Figura 3.1, o ponto de entrada de N_2 é a origem do plano cartesiano e N_1 é coaxial a esse ponto em relação ao eixo das abscissas. N_2 entra no raio de comunicação de N_1 com ângulo de incidência β e se move até sair do raio de comunicação desse nó. Para cada ângulo de incidência β , há uma distância de enlace percorrida p , ou seja, P é função da v.a. B e pode ser representado por $P(B)$, ou simplesmente P . Sendo assim, a duração do enlace pode ser expressa por

$$T = \frac{P}{V_e}. \quad (3.29)$$

Ainda da Figura 3.1, durante a formação do enlace, a trajetória se inicia na origem e termina no ponto F , dado pelas coordenadas (x_f, y_f) , logo $p(\beta)$ é a distância de F à origem. F é dado como a intersecção da reta que descreve a trajetória do nó N_2 e a circunferência de raio r com centro em N_1 .

A equação da trajetória de N_2 , $f_r(x)$ é dada por

$$f_r(x) = \tan(\beta)x, \quad (3.30)$$

ao passo que a equação da circunferência que denota a área de comunicação de N_1 , $f_c(x)$ é dada por

$$f_c(x) = \sqrt{2xr - x^2}. \quad (3.31)$$

O ponto de intersecção das duas equações, x_f , é encontrado quando $f_r(x) = f_c(x)$, ou

³Em [1], é proposto um modelo de LLT que considera mudanças de trajetória durante o enlace, mas que também supõe que é pequena essa probabilidade. Esse artigo é revisto no Capítulo 2.

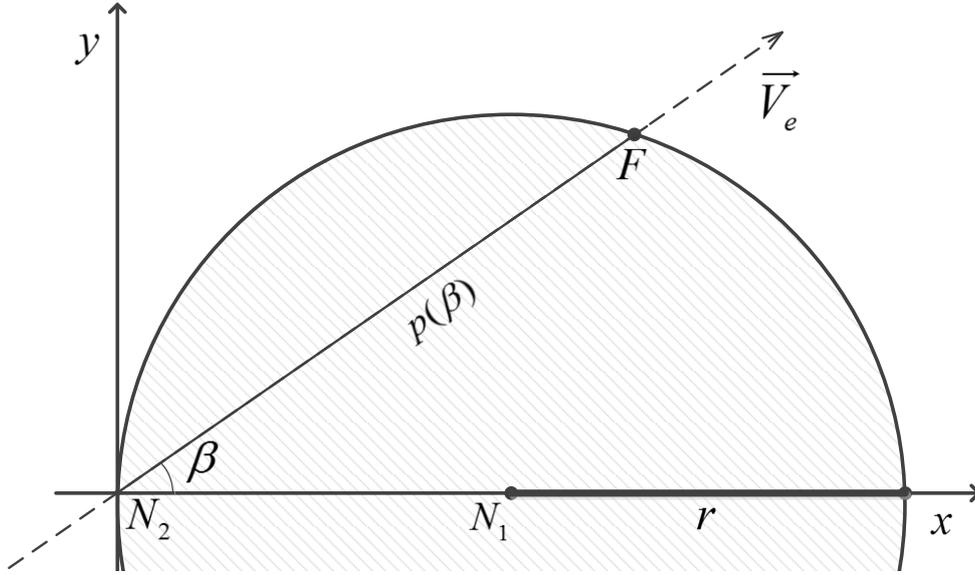


Figura 3.1: Modelo geométrico usado para o desenvolvimento do LLT.

$$\begin{aligned}
 x_f \tan(\beta) &= \sqrt{2x_f r - x_f^2} \\
 x_f^2 \tan^2(\beta) &= 2rx_f - x_f^2 \\
 x_f^2 (\tan^2(\beta) + 1) &= 2rx_f \\
 x_f (\tan^2(\beta) + 1) &= 2r \\
 x_f &= \frac{2r}{\tan^2(\beta) + 1}.
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

Usando a identidade $1 + \tan^2(\beta) = \sec^2(\beta)$, e uma vez que $\sec^2(\beta) = 1/\cos^2(\beta)$, tem-se que

$$x_f = 2r \cos^2(\beta). \tag{3.33}$$

Substituindo a equação (3.33) na equação (3.30), conclui-se que

$$y_f = 2r \tan(\beta) \cos^2(\beta), \tag{3.34}$$

e uma vez que $\tan(\beta) \cos^2(\beta) = \sin(\beta) \cos(\beta)$, y_f é finalmente dado por

$$y_f = 2r \sin(\beta) \cos(\beta). \tag{3.35}$$

Por fim, da Figura 3.1 tem-se que $p(\beta)$ é a distância entre a origem e F (representado pelas coordenadas (x_f, y_f)), portanto, dada por

$$\begin{aligned}
p(\beta) &= \sqrt{x_f^2 + y_f^2} \\
&= \sqrt{(2r)^2 \cos^4(\beta) + (2r)^2 \sin^2(\beta) \cos^2(\beta)} \\
&= 2r \sqrt{\cos^2(\beta) (\cos^2(\beta) + \sin^2(\beta))} \\
&= 2r \cos(\beta).
\end{aligned} \tag{3.36}$$

Conhecendo a distribuição do ângulo de incidência B , é possível encontrar a distribuição de distância de enlace P . De [3], e notando que $\beta \in [-\pi/2, \pi/2]$, a distribuição $f_B(\beta)$ no RWP é dada por

$$f_B(\beta) = \begin{cases} \frac{\cos(\beta)}{2}, & -\pi/2 \leq \beta \leq \pi/2 \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases} \tag{3.37}$$

e sua distribuição cumulativa,

$$F_B(\beta) = \begin{cases} \frac{\sin(\beta)}{2} + \frac{1}{2}, & -\pi/2 \leq \beta \leq \pi/2 \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases} \tag{3.38}$$

$f_B(\beta)$ é validada experimentalmente no Capítulo 4. O termo $1/2$ da equação (3.38) se dá para evitar que $F_B(\beta)$ tenha parte negativa no intervalo de β . Agora é possível encontrar a distribuição de P , $f_P(p)$ em termos de $F_B(\beta)$. Da equação (3.36), tem-se que

$$\begin{aligned}
F_P(p) &= Pr\{P \leq p\} = Pr\{2r \cos(\beta) \leq p\} \\
&= Pr\{\cos(\beta) \leq \frac{p}{2r}\}.
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Continuando o desenvolvimento acima, para se isolar β , é necessário aplicar aos dois lados da desigualdade a função $\arccos(\cdot)$. É interessante notar que essa função é estritamente decrescente no intervalo $[0, 1]$, ou seja, para quaisquer constantes c e d ($c \neq d$) nesse intervalo, com $c \leq d$, então $\arccos(c) \geq \arccos(d)$. Ainda, como a função cosseno é par, temos que $\cos(\beta) = \cos(-\beta)$, então ao se aplicar \arccos , deve se ter o cuidado de trabalhar com o módulo de β . A desigualdade $\cos(\beta) \leq p/2r$ torna-se, portanto, $|\beta| \geq \arccos(p/2r)$, e a equação (3.39) resulta

$$\begin{aligned}
Pr\{P \leq p\} &= Pr\left\{|\beta| \geq \arccos\left(\frac{p}{2r}\right)\right\} \\
&= 2(1 - F_B(\arccos(p/2r))) \\
&= 2\left(1 - \frac{\sin(\arccos(\frac{p}{2r}))}{2} - \frac{1}{2}\right) \\
&= 1 - \sin\left(\arccos\left(\frac{p}{2r}\right)\right).
\end{aligned} \tag{3.40}$$

Da identidade trigonométrica $\sin(\arccos(x)) = \sqrt{1 - x^2}$, tem-se que

$$F_P(p) = \begin{cases} 0, & p < 0 \\ 1 - \sqrt{1 - \frac{p^2}{4r^2}}, & 0 \leq p \leq 2r \\ 1, & p > 2r, \end{cases} \quad (3.41)$$

o que resulta em $f_P(p)$ sendo dada por

$$\begin{aligned} f_P(p) &= \frac{dF_P(p)}{dp} \\ &= -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{p^2}{4r^2}\right)^{-1/2} \left(-\frac{2p}{4r^2}\right) \\ &= \frac{p}{2r\sqrt{4r^2 - p^2}}, \end{aligned} \quad (3.42)$$

e considerando seus intervalos, tem-se finalmente que a distribuição da distância de enlace no RWP é dada por

$$f_P(p) = \begin{cases} 0, & p < 0 \\ \frac{p}{2r\sqrt{4r^2 - p^2}}, & 0 \leq p \leq 2r \\ 0, & p > 2r. \end{cases} \quad (3.43)$$

Supondo-se que as distribuições $f_P(p)$ e $f_{V_e}(v_e)$ são independentes, pode-se usar o método do jacobiano para encontrar a distribuição de T , a duração de enlace. Definem-se então as seguintes v.a.s:

$$\begin{aligned} T &= \frac{P}{V_e} \\ U &= V_e, \end{aligned} \quad (3.44)$$

em que U é a variável auxiliar usada nessa transformação 2×2 . A solução desse sistema de equações é dada por

$$\begin{aligned} V_e &= U \\ P &= TU. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Formula-se então a seguinte transformação de v.a.s

$$f_{TU}(\tau, u) = f_P(\tau u) f_{V_e}(u) |J_h(\tau, u)|. \quad (3.46)$$

O jacobiano $|J_h(\tau, u)|$ é dado por

$$J_h(\tau, u) = \begin{vmatrix} \frac{dv_e}{d\tau} & \frac{dv_e}{du} \\ \frac{dp}{d\tau} & \frac{dp}{du} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ u & \tau \end{vmatrix} = -u. \quad (3.47)$$

Usando as equações (3.28), (3.43) e (3.47), tem-se que

$$\begin{aligned}
f_{TU}(\tau, u) &= \frac{\tau u}{2r\sqrt{4r^2 - (\tau u)^2}} u f_{V_e}(u) | - u | \\
&= \frac{\tau u^2}{2r\sqrt{4r^2 - (\tau u)^2}} f_{V_e}(u),
\end{aligned} \tag{3.48}$$

e naturalmente, $f_T(\tau)$ é a distribuição marginal da equação (3.48) em τ , dada por

$$f_T(\tau) = \int_{\mathbb{D}} \frac{\tau u^2}{2r\sqrt{4r^2 - (\tau u)^2}} f_{V_e}(u) du. \tag{3.49}$$

Normalmente, a velocidade relativa entre os nós varia de $v_e = 0$, caso em que os dois se movem na mesma direção, a $v_e = 2V_{max}$, caso em que se movem em direções opostas, onde V_{max} é a velocidade máxima em que um nó se move, portanto o intervalo de integração da equação (3.49) seria $\mathbb{D} \in [0, 2V_{max}]$. Contudo, do termo $\sqrt{4r^2 - (\tau u)^2}$ do denominador, existe a restrição

$$\begin{aligned}
\sqrt{4r^2 - (\tau u)^2} &\geq 0 \\
4r^2 &\geq (\tau u)^2 \\
\tau &\leq \frac{2r}{u} \\
u &\leq \frac{2r}{\tau}.
\end{aligned} \tag{3.50}$$

A explicação para a restrição no intervalo de integração \mathbb{D} é a seguinte: a duração do enlace τ não pode ser maior do que no caso em que a distância a ser percorrida é a máxima ($2r$), com velocidade u . Nesse caso, a duração do enlace é máxima e dada por $\tau = 2r/u$. A desigualdade $u \leq 2r/\tau$ é equivalente, então temos que $V_e \in [0, 2V_{max}]$, mas $V_e \in [0, 2r/\tau]$, logo o intervalo de integração \mathbb{D} é a intersecção dos dois conjuntos e assim

$$V_e \in [0, \min(2V_{max}, 2r/\tau)] \iff \begin{cases} V_e \in [0, 2V_{max}], & 2V_{max} \leq 2r/\tau \quad (\tau \leq r/V_{max}) \\ V_e \in [0, 2r/\tau], & 2V_{max} \geq 2r/\tau \quad (\tau \geq r/V_{max}). \end{cases} \tag{3.51}$$

Ilustra-se o intervalo de integração \mathbb{D} como a área hachurada da Figura 3.2.

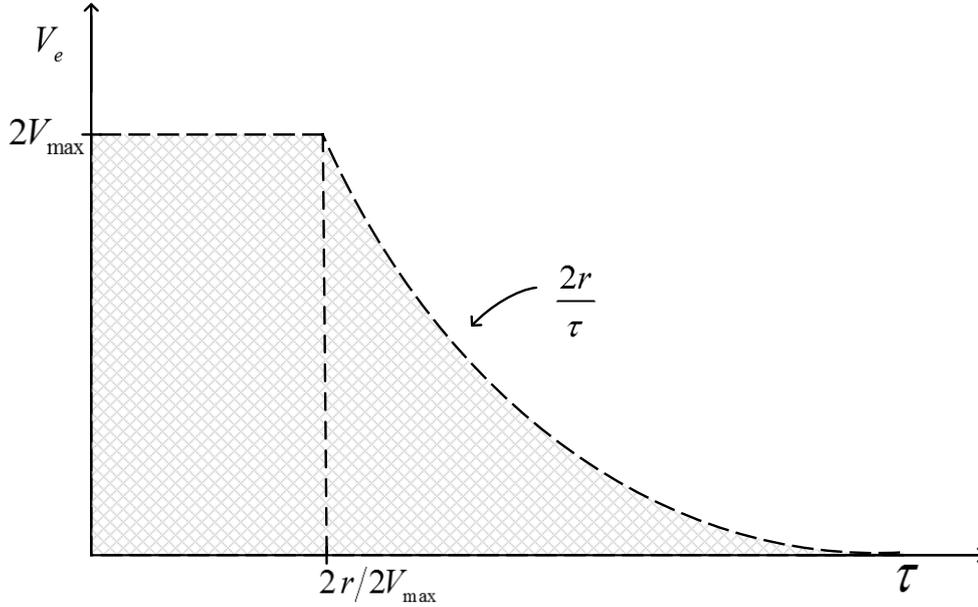


Figura 3.2: Intervalo de integração \mathbb{D} .

Por fim, utilizando a equação (3.51), $f_T(\tau)$ se torna

$$f_T(\tau) = \frac{1}{2r} \begin{cases} \int_0^{2V_{max}} \frac{\tau u^2}{\sqrt{4r^2 - (\tau u)^2}} f_{V_e}(u) du, & \tau \leq \frac{r}{V_{max}} \\ \int_0^{2r/\tau} \frac{\tau u^2}{\sqrt{4r^2 - (\tau u)^2}} f_{V_e}(u) du, & \tau > \frac{r}{V_{max}}, \end{cases} \quad (3.52)$$

que é a expressão final para a distribuição da duração de enlace sob o modelo RWP, do qual se conhece a *pdf* da velocidade relativa $f_{V_e}(v_e)$. Observa-se que a Equação (3.52) pode ser usada para descrever a duração de enlace sob qualquer modelo de mobilidade do qual se conheça a *pdf* da velocidade relativa dos nós, $f_{V_r}(v_r)$, a partir da qual se deriva a *pdf* correspondente da velocidade relativa de nós que formam enlaces, $f_{V_e}(v_e)$. O RLL correspondente pode ser facilmente calculado com métodos numéricos por meio da equação (2.7).

3.3 Conclusões

Até onde se estendeu a pesquisa bibliográfica realizada na presente dissertação, não foi encontrado nenhum trabalho na literatura que tenha proposto uma expressão analítica para a *pdf* do LLT sem o uso de aproximações e considerando todas as características estocásticas do RWP. Desta forma, utilizando-se de algumas contribuições importantes de trabalhos pesquisados, e utilizando nossa contribuição da expressão analítica para a velocidade relativa dos nós no RWP, ressalta-se a originalidade do trabalho desenvolvido. A consistência dos resultados desse Capítulo será verificada no Capítulo 4.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

4.1 Introdução

A fim de reforçar a validade dos resultados obtidos no capítulo 3, apresentam-se nesse capítulo todos os resultados de simulações, procedimentos, métodos e cenários empregados para avaliar o modelo analítico da duração de enlace.

Em primeiro lugar, serão tratados os resultados numéricos de algumas das expressões analíticas do Capítulo 3. São apresentados os resultados numéricos que ilustrem a velocidade relativa e os ângulos de incidência sob o modelo RWP. Esses resultados são comparados com simulações feitas com o auxílio do MATLAB® [25], validando os resultados.

Em seguida, apresentamos os resultados obtidos para o LLT nos simuladores de rede e no MATLAB, sob os modelos RWP e UMM. Também são feitas comparações das simulações com os resultados numéricos e com os resultados da literatura, de forma a consolidar o desenvolvimento matemático do capítulo 3.

Nas simulações de rede, foi utilizado mais de um simulador. Para extrair as medidas de LLT, utilizamos o simulador ONE (*Opportunistic Network Simulator*) [26] e o MATLAB, com código desenvolvido para esse trabalho. Também utilizamos o MATLAB para simular os modelos de mobilidade RWP e UMM e comparar os LLTs observados, e para os demais cálculos numéricos.

4.2 Descrição dos Simuladores

O ONE é um simulador de código aberto implementado em Java, voltado para redes DTN (*Delay Tolerant Networks*) e que implementa vários modelos de mobilidade, dentre eles o *Random Waypoint* e o *Random Walk*, além de mobilidade baseada em mapas (de cidades ou bairros, por exemplo). Sua principal vantagem é a possibilidade de gerar relatórios acerca de medidas de desempenho da rede, dentre eles da duração de enlace, tornando-se atraente para esse trabalho.

O MATLAB é uma linguagem de computação bastante utilizada pela comunidade científica, voltada para cálculos com matrizes, cálculo numérico, algébrico e processamento de sinais, dentre

outras aplicações. Suas principais vantagens são a simplicidade da linguagem, a disponibilidade de uma inúmera gama de rotinas prontas e a facilidade de depurar código. O código desenvolvido em MATLAB simula a mobilidade de uma rede sob os modelos RWP e UMM e realiza as seguintes análises de interesse, em qualquer instante da simulação: distribuição da velocidade instantânea e sua média, concentração espacial dos nós, distribuição dos ângulos de incidência em enlaces e a distribuição do tempo de vida dos enlaces, além de verificar os eventos em que há mudança de trajetórias dentre os enlaces.

4.3 Validação da velocidade relativa

No Capítulo 3, para desenvolver o modelo analítico para o LLT, encontrou-se a distribuição da velocidade relativa do RWP (3.27) e a distribuição de velocidade relativa no caso específico em que nos nós formam um enlace (3.28). Para o cálculo numérico dessas distribuições, vamos usar quatro cenários de velocidade, descritos na Tabela 4.1¹. A fim de se manter a estabilidade do RWP, usou-se $v_{min} \neq 0$ em todos os cenários.

Tabela 4.1: Cenários de mobilidade usados.

Cenário	$[v_{min}, v_{max}]$	\bar{V}	Observação
1	$[1, 1]m/s$	1	Baixa mobilidade (velocidade constante)
2	$[0, 406, 2]m/s$	1	Baixa mobilidade
3	$[2, 6]m/s$	3,641	Média mobilidade
4	$[6, 20]m/s$	11,628	Alta mobilidade

No cenário 1, a velocidade dos nós é constante. Com isso, a variabilidade na velocidade relativa entre os nós se dá somente pela variação do ângulo entre suas trajetórias. No cenário 2, os nós apresentam a mesma velocidade média do cenário 1, mas com velocidade dos nós uniformemente distribuída em $[0, 406, 2]$ m/s, sendo caracterizado por ser de baixa mobilidade, assim como o cenário 1. Os cenários 3 e 4 apresentam mobilidades média e alta, tendo velocidades uniformemente distribuídas em $[2, 6]m/s$ e $[6, 20]m/s$, respectivamente. Frisa-se que a escolha dos intervalos de velocidade dos cenários 2 a 3 foi feita particionando-se o intervalo $[0.406, 20]$ m/s em intervalos contíguos, de forma que fossem facilmente classificados em situações do mundo real. Como baixa, média e alta mobilidades, podemos imaginar, por exemplo, uma caminhada, uma corrida ou pedalada, e velocidades típicas de carros ou motocicletas em vias urbanas, respectivamente.

A Figura 4.1 apresenta as distribuições de velocidade relativa global e em enlaces, calculadas numericamente para os quatro cenários de mobilidade da Tabela 4.1, utilizando as Equações (3.27) e (3.28), respectivamente, e comparadas com a distribuição de velocidade relativa em enlaces verificada em simulações no MATLAB do modelo RWP. Não se julgou necessário verificar em simulação

¹A velocidade dos nós no RWP é distribuída uniformemente no intervalo $[v_{min}, v_{max}]$, mas a velocidade média observada em regime estacionário, \bar{V} , não é a média da distribuição uniforme, mas aquela dada pela Equação (1.1).

a *pdf* da velocidade relativa global, afinal sua estatística não é de interesse nesse trabalho. A finalidade de se ilustrar seu resultado numérico é de demonstrar que há uma diferença entre essa v.a. e a velocidade relativa somente em enlaces. Em todos os cenários, há uma diferença considerável entre as estatísticas da velocidade relativa global (entre quaisquer nós) e as da velocidade relativa em enlaces. Como havia sido explicado na Seção 3.2.2, nós com velocidade maior tendem a formar mais enlaces, portanto a distribuição de velocidade relativa em enlaces é dominada por nós mais rápidos, causando um deslocamento na densidade da curva para valores mais altos de velocidade. Verifica-se que, pela proximidade das curvas de velocidades relativas teóricas e das obtidas nas simulações, a Equação (3.27) modela apropriadamente o comportamento de mobilidade dos nós no RWP para os diversos cenários de mobilidade propostos.

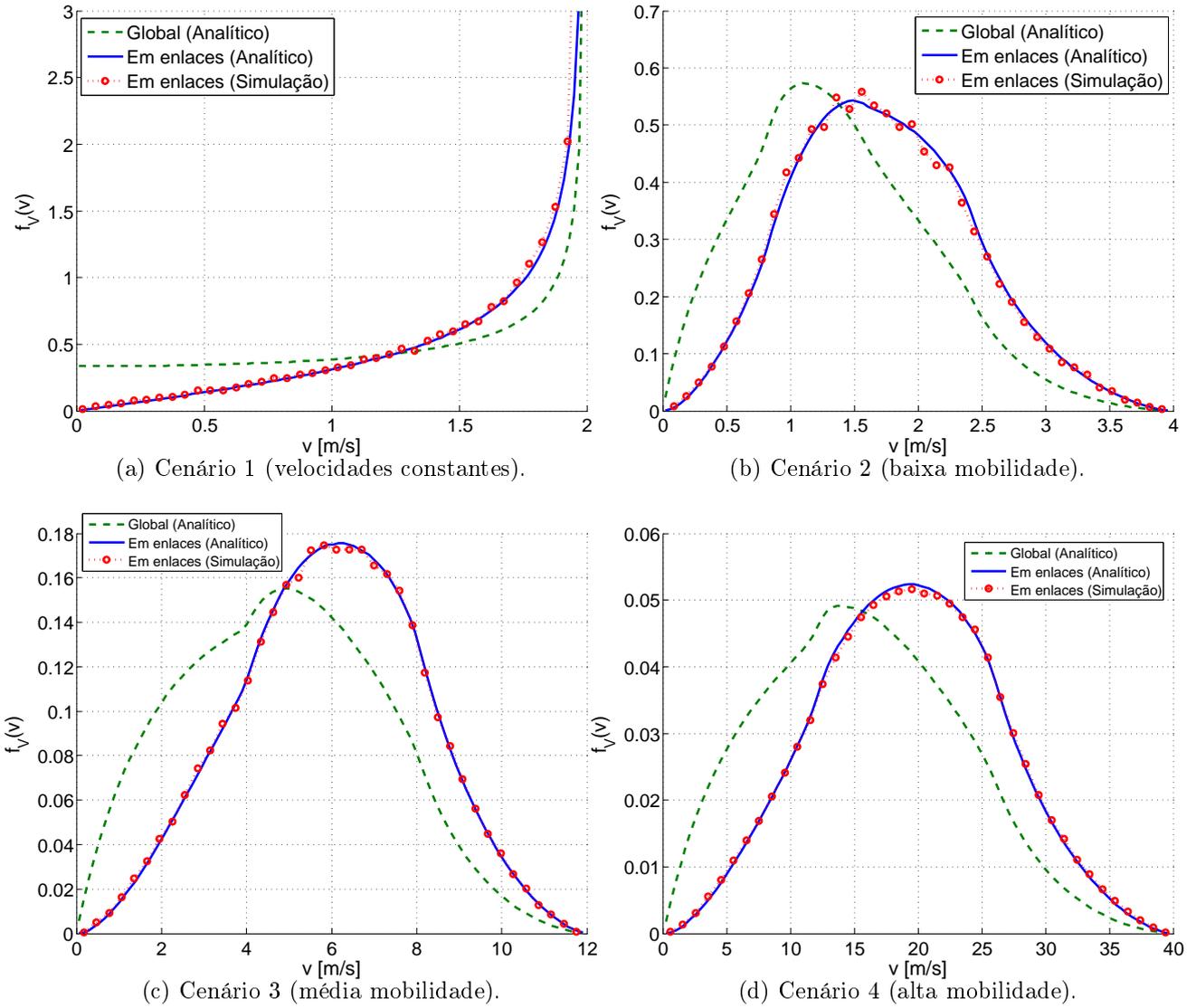


Figura 4.1: Velocidades relativas $f_{V_r}(v_r)$ (global) e $f_{V_e}(v_e)$ (em enlaces) - analítica e em simulação, sob os quatro cenários da Tabela 4.1.

4.4 Validação dos ângulos de incidência

Para os ângulos de incidência do RWP, comparou-se a distribuição analítica $f_B(\beta)$ (Equação (3.37)) com as distribuições empíricas encontradas nas simulações de MATLAB, com os parâmetros da Tabela 4.2. Foi utilizado um intervalo de aquecimento (*warmup*) para desconsiderar o transiente de simulação. Utilizou-se também ao fim da simulação um intervalo de descanso (*cooldown*), para evitar a quebra prematura de enlaces com o fim da simulação. Dessa forma, dentro desse intervalo não é permitida a formação de enlaces, mas somente a quebra daqueles que já existiam. Em relação à quantidade de 420 nós, verificou-se que esse valor foi o suficiente para garantir uma observação detalhada das estatísticas da simulação. Em simulações com 4.200 nós, demais parâmetros inalterados, o ganho em qualidade dos resultados foi irrisório, mas o aumento observado no tempo de simulação foi polinomial. O algoritmo de leitura do LLT em MATLAB verifica os possíveis enlaces entre todos os nós. Dessa forma, com 420 nós, teremos $\binom{420}{2} = 87.990$ verificações. Aumentando o número de nós em 10 vezes (4.200 nós), teríamos $\binom{4200}{2} = 8.817.900$ verificações, aproximadamente 100 vezes mais! Por fim, a granularidade é o intervalo de tempo entre medições de duração do enlace.

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados nas simulações em MATLAB e no ONE.

Parâmetro	MATLAB	ONE
Área	2000m x 2000m	2000m x 2000m
Duração [s]	10.000	50.000
Número de nós	420	420
Raio de Comunicação [m]	100	100
Mobilidade	Tabela 4.1	Tabela 4.1
Tempo de <i>warmup</i> [s]	2000	2000
Tempo de <i>cooldown</i> [s]	1000	Não há
Granularidade [s]	1	1

A Figura 4.2 ilustra as distribuições dos ângulos de incidência observadas em simulações, sob os quatro cenários de mobilidade da Tabela 4.1, comparadas com a distribuição teórica. Verifica-se a semelhança entre a distribuição dos ângulos de incidência (Equação (3.37)) e as distribuições empíricas encontradas nas simulações dos quatro cenários de mobilidade, dada a sobreposição de todas as curvas. Com isso, conclui-se que não há impacto da mobilidade nos ângulos de incidência dos nós, nos cenários de mobilidade estudados, o que corrobora a robustez do modelo de LLT proposto.

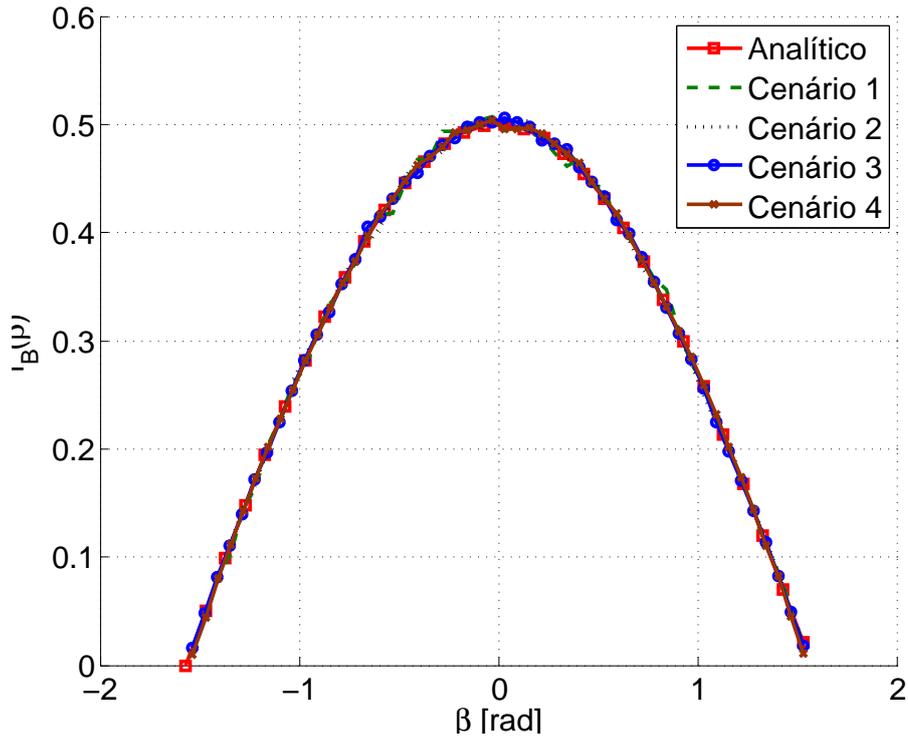


Figura 4.2: Comparação entre os ângulos de incidência analítico e experimentais dos quatro cenários da Tabela 4.1.

4.5 Validação do modelo de LLT

Com a velocidade relativa e os ângulos de incidência validados, prosseguimos para a validação do modelo de LLT. Para tanto, avaliou-se numericamente a Equação (3.52) e o resultado foi comparado com simulações de rede executadas no ONE, utilizando os parâmetros da Tabela 4.2. A Figura 4.3 ilustra a comparação entre o modelo analítico e as simulações realizadas sob os quatro cenários de mobilidade da Tabela 4.1. Colocam-se algumas observações a respeito desse resultado: à medida que a mobilidade da rede aumenta, a densidade do LLT é "achatada" em relação ao eixo das abscissas, concentrando-se cada vez mais próxima à origem, indicando que, naturalmente, com o aumento da velocidade, os enlaces tendem a durar menos. Ainda, nota-se que mesmo com a variação na escala de mobilidade (Figuras 4.3b a 4.3d), a forma da curva de distribuição do LLT não se altera, (efetuando-se os devidos ajustes na escala dos eixos), o que indica que existe uma escalabilidade da medida em relação à mobilidade da rede. Por fim, verifica-se pela proximidade entre as curvas analíticas e de simulação que o modelo descreve o LLT com boa precisão em todos os cenários investigados.

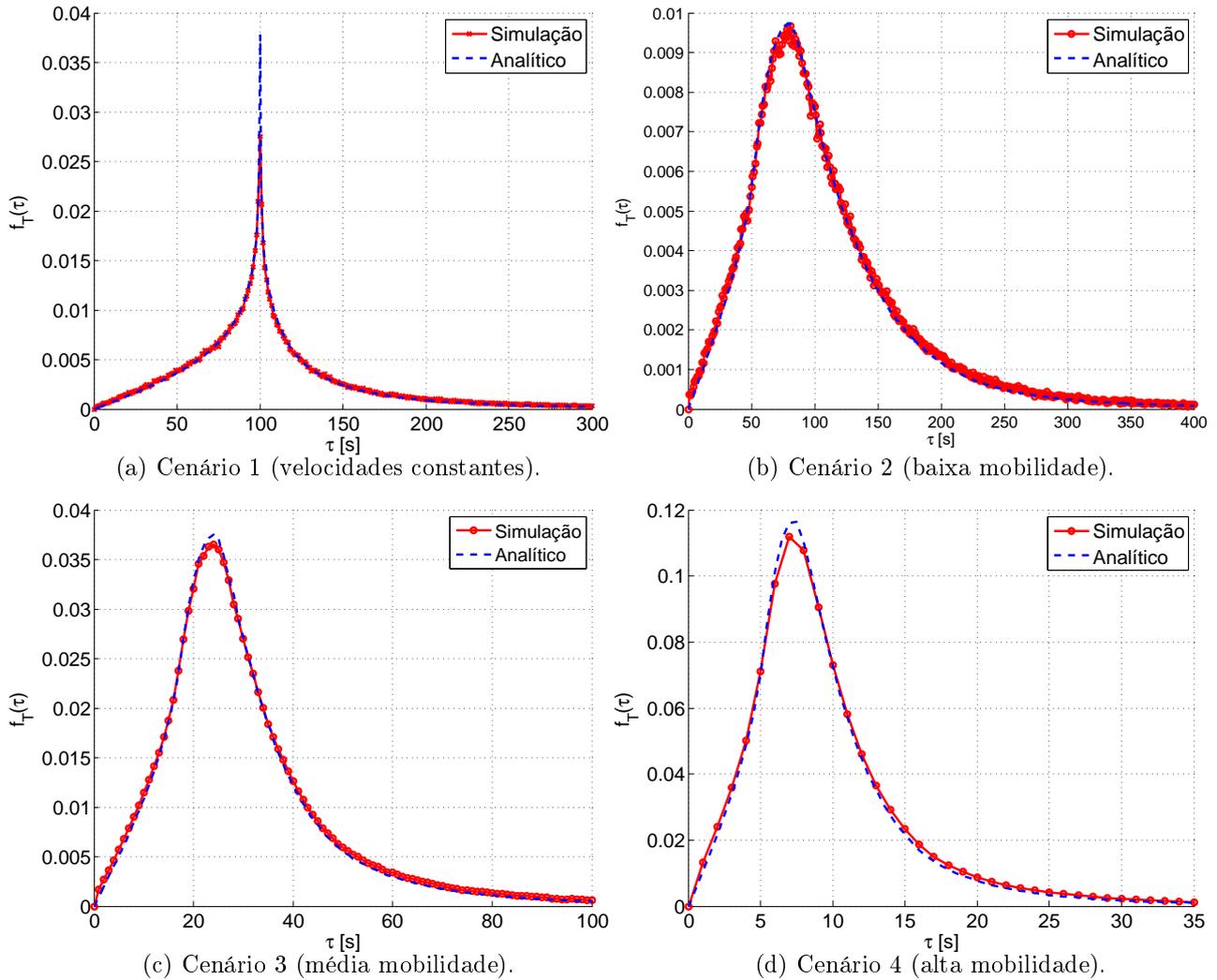


Figura 4.3: LLT analítico (Equação (3.52)) e simulação sob os quatro cenários da Tabela 4.2.

Na validação do modelo de LLT com os cenários de mobilidade escolhidos, mantivemos inalterados tanto o raio de transmissão quanto as dimensões da área de simulação. É interessante que se conheça para quais combinações desses parâmetros o modelo analítico não se comporta conforme esperado, com a finalidade de definir seu escopo de aplicação. Dessa forma, estudam-se alguns cenários extremos onde haja distorção significativa entre o modelo e a simulação. Sendo assim, realizaram-se no ONE algumas simulações em que se variou o tamanho da área de simulação em quatro casos distintos: $150 \times 150\text{m}$, $200 \times 200\text{m}$, $300 \times 300\text{m}$ e $2000 \times 2000\text{m}$. Os demais parâmetros da simulação são os da Tabela 4.2. A Figura 4.4 ilustra os resultados de duração de enlace dessas simulações sob os quatro cenários de mobilidade da Tabela 4.1.

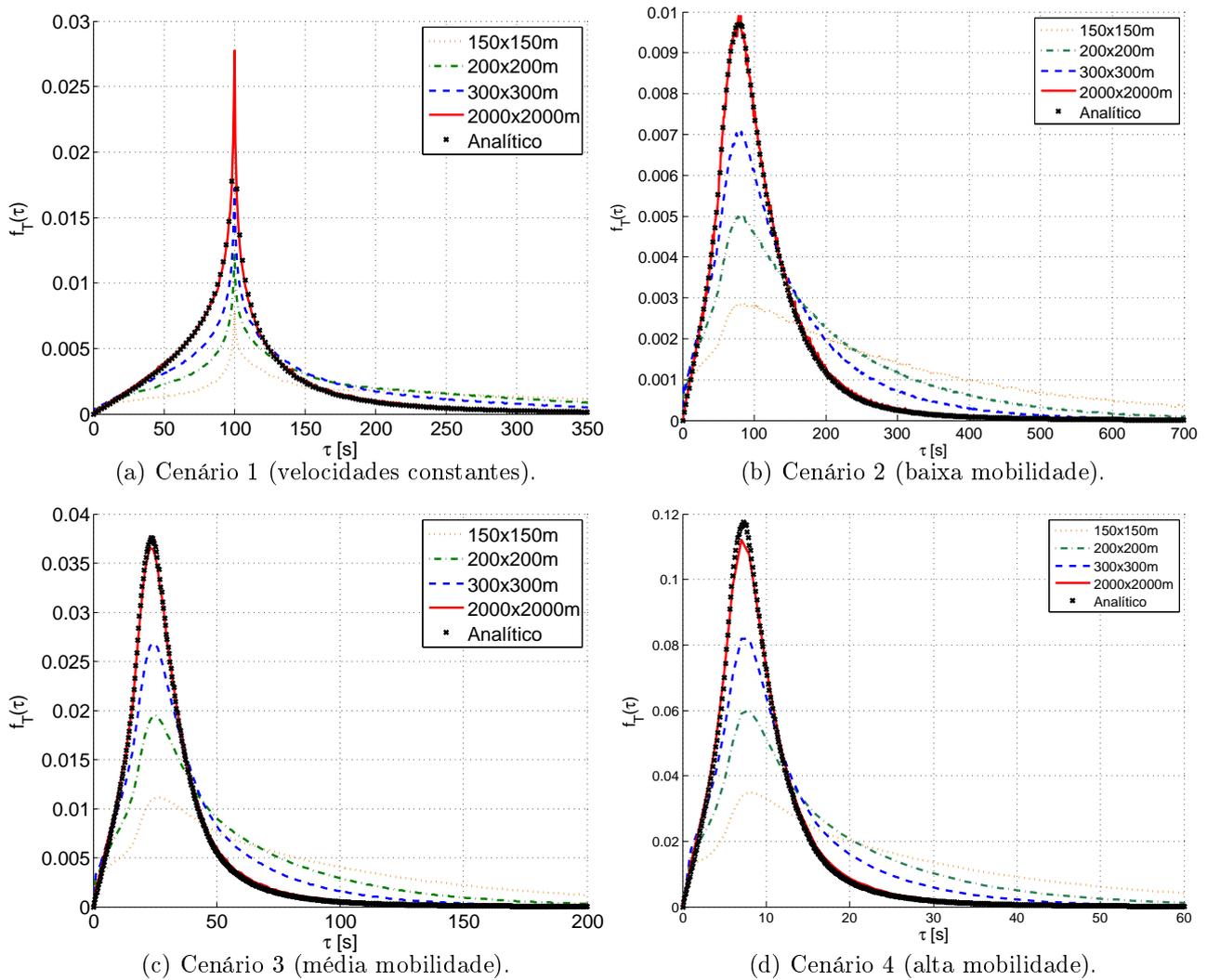


Figura 4.4: LLT analítico (Equação (3.52)) e simulação em áreas de tamanhos distintos.

Nos quatro cenários de mobilidade, verifica-se que à medida que a área de simulação é reduzida, as curvas do LLT passam a ter uma concentração maior em enlaces duradouros e menor em enlaces curtos. Observa-se também que o LLT é especialmente sensível às variações nas dimensões da área de simulação para valores pequenos, próximos ao valor do raio de comunicação. Em todos os cenários de mobilidade, a variação no LLT entre as áreas de $150 \times 150m$ e $200 \times 200m$ é tão significativa quanto a variação entre as áreas de $300 \times 300m$ e $2000 \times 2000m$, embora na última comparação, a área seja aumentada em mais de 40 vezes, enquanto na primeira, o aumento é apenas de 1,7 vezes. Na área de $2000 \times 2000m$, não há variação significativa no comportamento do LLT quando comparada ao modelo analítico, levando à conclusão de que o aumento na área de simulação acima desse valor não provoca mudança no comportamento do LLT, para um raio de comunicação dos nós de $100m$. Os casos em que o LLT das simulações não condiz com o LLT do modelo analítico se devem ao efeito de mudança de trajetórias durante a formação de enlaces. Com uma área de simulação pequena, os nós têm pouco espaço para se movimentarem e acaba sendo mais difícil que se afastem o suficiente para que os enlaces sejam quebrados.

Para investigar o impacto das mudanças de trajetória no LLT, utilizando o MATLAB, coletaram-

se separadamente as estatísticas de enlaces com e sem mudanças de trajetórias, sob os cenários da Tabela 4.2. A Figura 4.5 ilustra as distribuições da duração de enlaces "compostos", em que há ao menos uma mudança de trajetória (legenda "LLT composto"), dos enlaces "simples", em que não há mudanças de trajetória (legenda "LLT simples") e de todos os enlaces observados (legenda "LLT global"). Como se nota, em todos os cenários de mobilidade há uma significativa diferença entre o LLT global e o composto, o que em primeira análise limitaria a aplicação do modelo somente a enlaces simples. No LLT composto, há uma densidade acentuada em enlaces mais duradouros, o que indica que, em geral, ao se mudar de trajetória durante um enlace, há um aumento em sua sobrevivência. Por outro lado, apesar dessa diferença, a proximidade entre as distribuições do LLT simples e do global em todos os cenários deve-se à ocorrência minoritária de mudanças de trajetória nos enlaces, como mostrado na Tabela 4.3, não ultrapassando o percentual de 15% em nenhum dos quatro cenários observados. Essas observações vão ao encontro das suposições feitas a respeito de mudança de trajetória em enlaces, no Capítulo 3. Por último, verifica-se também da Tabela 4.3 que a mobilidade dos nós é proporcional à quantidade de enlaces formados no tempo.

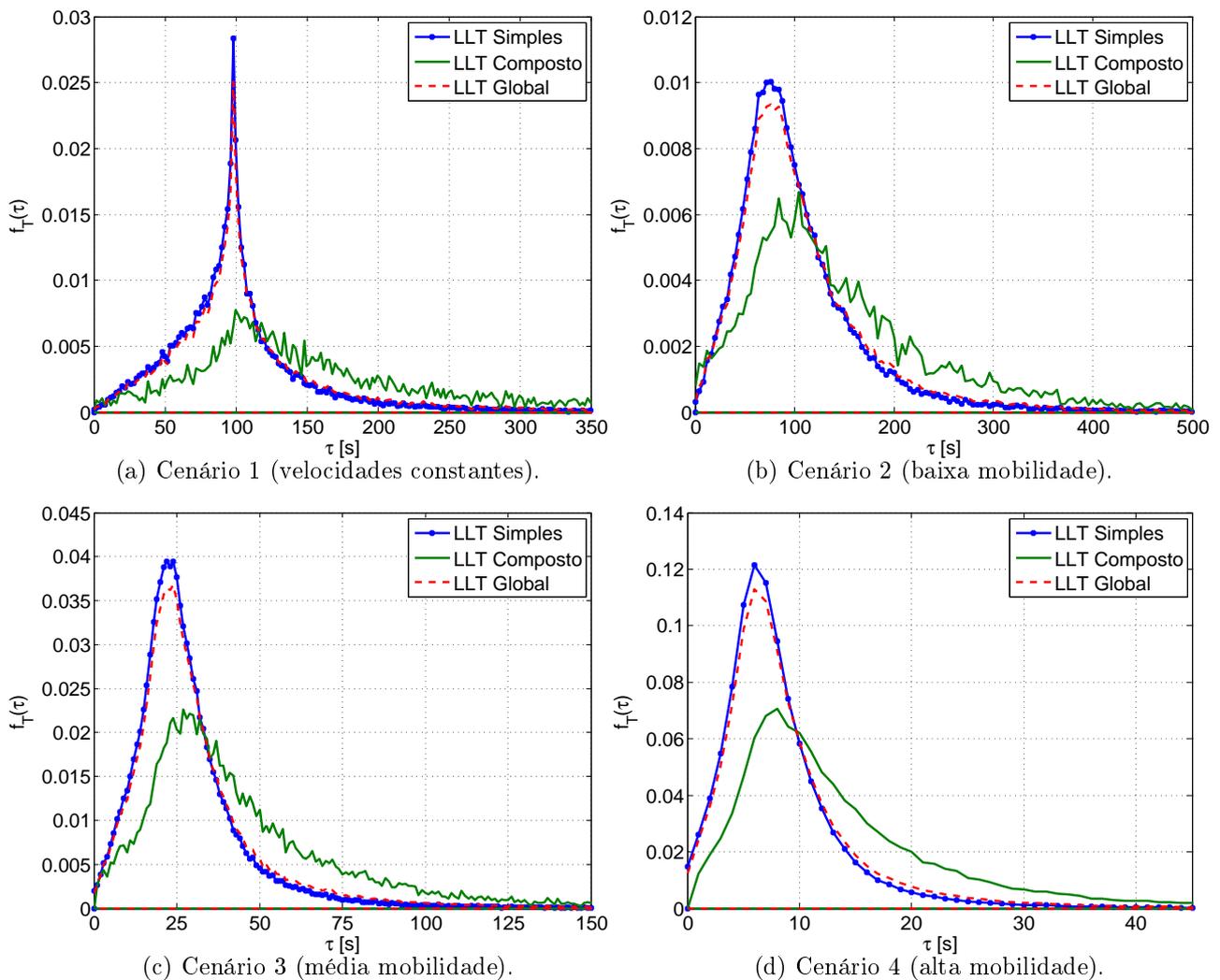


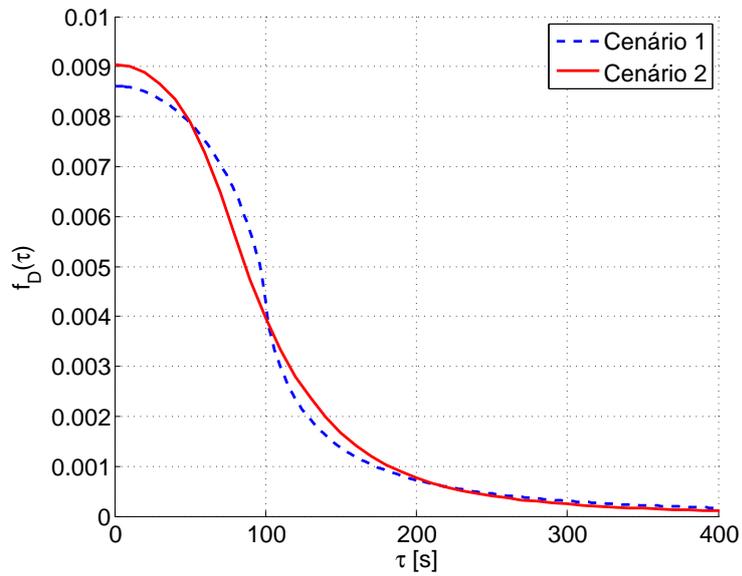
Figura 4.5: Distribuições empíricas do LLT em enlaces com mudança de trajetória.

Tabela 4.3: Proporções entre enlaces simples e compostos.

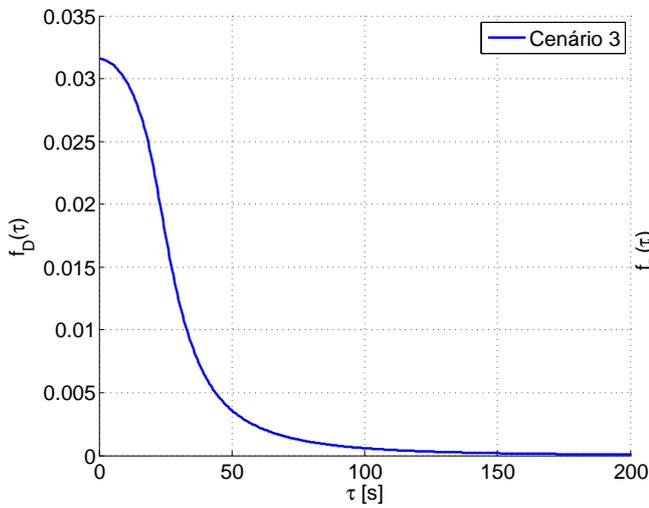
Cenário	Enlaces totais	Enlaces simples	Enlaces compostos
1	44.124	37.481 (84,95%)	6.643 (15,05%)
2	47.898	40.627 (84,82%)	7.271 (15,18%)
3	172.813	147.108 (85,13%)	25.705 (14,87%)
4	555.927	478.414 (86,06%)	77.513 (13,94%)

4.6 Cálculo numérico do RLL

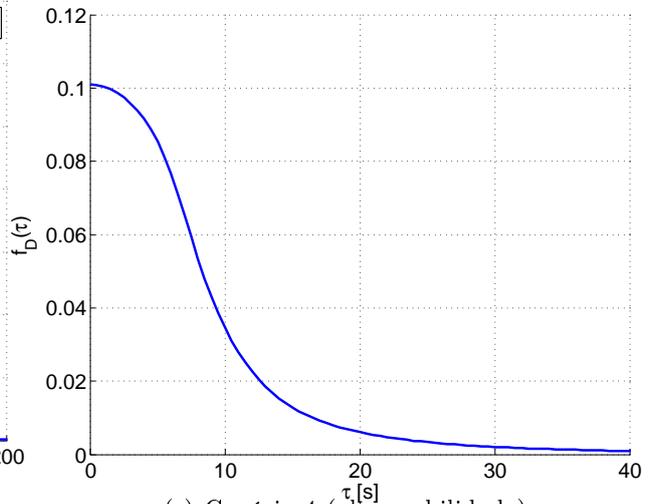
Utilizando a Equação (2.7), calculou-se numericamente a distribuição do RLL para os quatro cenários de mobilidade da Tabela 4.1. Os resultados são ilustrados na Figura 4.6. Com esse resultado, observa-se que ainda que os cenários 1 e 2 apresentem a mesma velocidade média dos nós em regime estacionário, a distribuição do RLL nos dois cenários é distinta. Para demonstrar essa diferença, a Figura (4.7) ilustra a diferença percentual entre as distribuições cumulativas do RLL nos cenários 1 e 2, tomando como referência o cenário 2, que usa a distribuição aleatória de velocidades do RWP. Essa diferença encontra o máximo em $\tau = 138s$, isto é, no cenário 1, a probabilidade da duração residual ser menor que 138s é aproximadamente 20% maior que no cenário 2. Essa diferença também é considerável para outros valores de τ ($\tau = 90s$, por exemplo). Assim, frisa-se que o modelo do RLL sob o RWP de velocidades constantes não deve ser usado como aproximação ao modelo do RWP de velocidades uniformemente distribuídas, como é feito em [20].



(a) Cenários 1 e 2 (baixa mobilidade).



(b) Cenário 3 (média mobilidade).



(c) Cenário 4 (alta mobilidade).

Figura 4.6: RLL numérico obtido a partir da Equação (2.7) para os quatro cenários de mobilidade da Tabela 4.1.

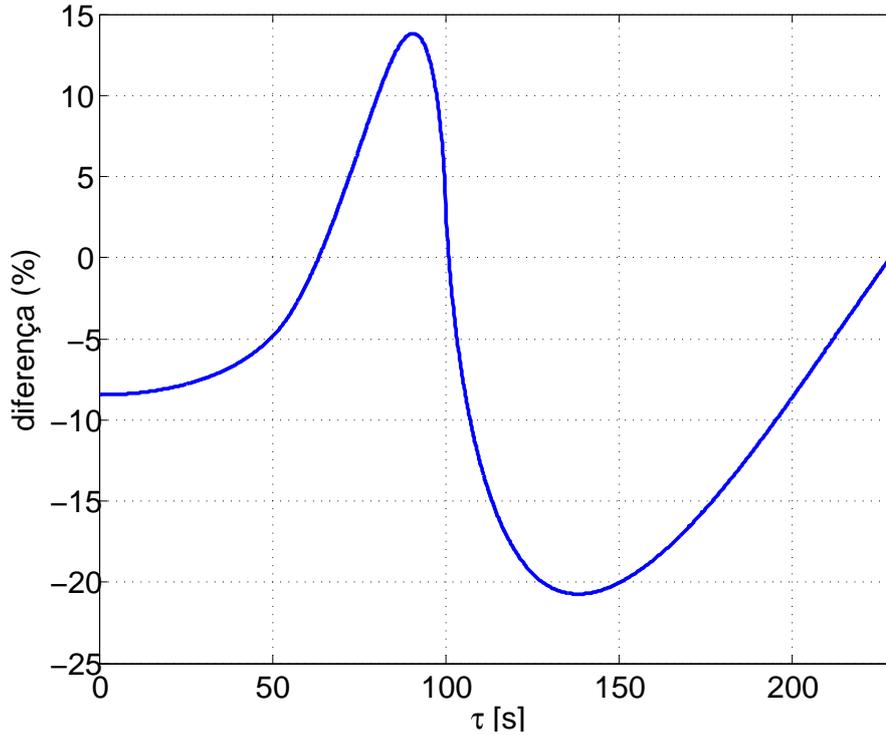


Figura 4.7: Diferença percentual na distribuição cumulativa complementar do RLL nos cenários de mobilidade 1 e 2.

4.7 Comparação entre o RWP e o UMM

Ainda com o intuito de conhecer a aplicabilidade do modelo de LLT proposto, verificou-se em simulações no MATLAB o comportamento do LLT sob o modelo de mobilidade UMM para os quatro cenários de mobilidade da Tabela 4.1. Lembra-se do Capítulo 1 que a principal diferença entre o UMM e o RWP é em relação à distribuição espacial dos nós. No UMM, essa distribuição é homogênea em regime estacionário, enquanto no RWP, há uma concentração maior no centro da área de simulação. Outra diferença importante diz respeito à distribuição das distâncias de trajetória, que no UMM é definida como exponencial de média μ , enquanto no RWP, essa distribuição se dá em consequência da maneira como os nós escolhem seus destinos em cada trajetória. Dessa forma, para fazer uma comparação justa entre os dois modelos de mobilidade, verificamos qual a distância média percorrida nas simulações do RWP, usando-as como parâmetro μ da distribuição de distâncias do UMM. Observa-se que tanto no RWP como no UMM, na trajetória de cada nó, a velocidade e distância são independentes, portanto a distância média de trajetória deve ser a mesma em todos os cenários de velocidade, conforme verificado em simulação no MATLAB e mostrado na Tabela 4.4. No RWP, como as coordenadas de início e fim de cada trajetórias são uniformemente distribuídas dentro da área de simulação, a distância média é influenciada pelo tamanho dessa área. Na área de $2000 \times 2000\text{m}$, nos quatro cenários, a maior variação em relação à média de 1.064m foi de $2,3\%$, no cenário 2.

Tabela 4.4: Distâncias médias de trajetória dos nós no RWP.

Cenário	Distância média [m]
1	1.075
2	1.087
3	1.053
4	1.042
Média	1.064

As distribuições empíricas do LLT no RWP e no UMM são dadas pela Figura 4.8. Nota-se que em todos os cenários, as distribuições do LLT nos dois modelos de mobilidade são muito semelhantes, indicando que a distribuição espacial dos nós na área de simulação não interfere no comportamento da duração dos enlaces nos cenários de mobilidade estudados. Isso permite que o modelo de LLT, que foi formulado para o RWP, seja estendido ao UMM sem a necessidade de ajustes. Ainda, nas simulações de rede, é possível se beneficiar da escolha de um dos dois perfis de distribuição espacial dos nós enquanto a estatística dos enlaces seja essencialmente a mesma. Contudo, ao se utilizar o UMM, sugere-se cautela na escolha da média da distribuição exponencial da distância de trajetória (μ), que quando pequena, acarreta em mais mudanças de trajetórias no tempo e durante os enlaces, modificando sua distribuição de forma não prevista pelo modelo proposto, como já foi mostrado.

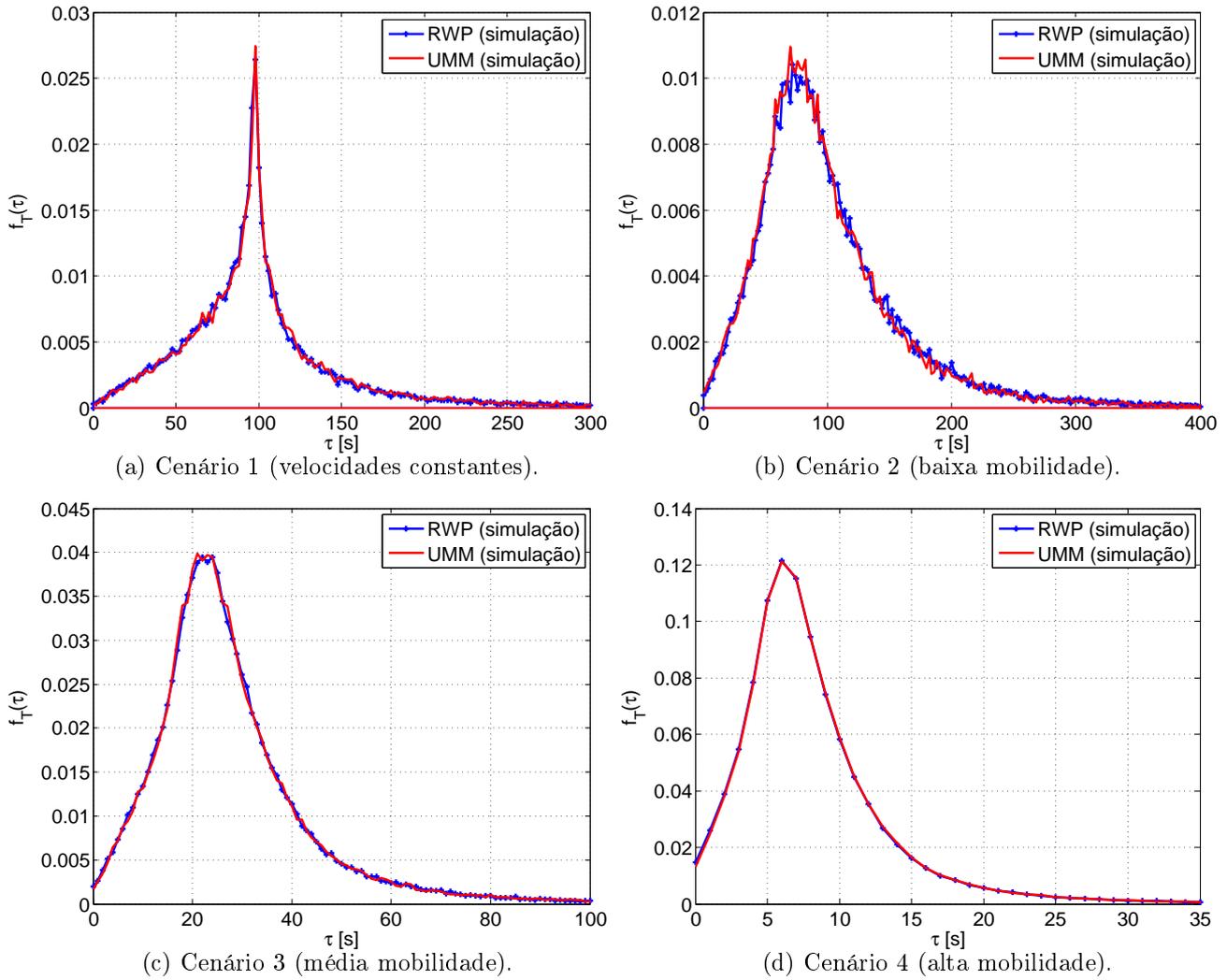


Figura 4.8: LLT dos modelos de mobilidade RWP e UMM.

4.8 Conclusões

Os resultados das simulações feitas no MATLAB e no ONE demonstraram a fidelidade com que modelo proposto descreve o comportamento dos enlaces em uma rede sob o modelo de mobilidade RWP, validando-o sob os diversos cenários de mobilidade propostos. Para tanto, utilizou-se a expressão analítica para a *pdf* da velocidade relativa dos nós em enlaces, formulada no Capítulo 3, a qual foi validada por meio de simulações nesse Capítulo. Por fim, conferindo solidez ao modelo, validou-se também a suposição feita em [3] a respeito da distribuição dos ângulos de incidência.

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

Nesse trabalho investigou-se a duração de enlaces em *MANETs* com o modelo de mobilidade RWP. Com a análise da dinâmica dos nós, propusemos uma equação para a distribuição da velocidade relativa dos nós, o que permitiu que se formulasse um modelo analítico para a distribuição de probabilidade do LLT. Por meio de simulações sob vários cenários de mobilidade, verificou-se que o modelo conseguiu reproduzir com êxito os comportamentos observados dessa medida na prática. Para delimitar o escopo de aplicação, estudaram-se os casos extremos em que o modelo não correspondeu às simulações, justificados pelos pressupostos simplificadores tomados em seu desenvolvimento, que não levam em consideração as mudanças de trajetória em enlaces. Mostramos também que o modelo proposto se estende às redes com mobilidade dada pelo UMM, concluindo que a distribuição dos nós na área de simulação, nos cenários investigados, exerce pouca influência na estatística do LLT. Ao contrário do que se mostrou em trabalhos anteriores, mostramos também que não é apropriado usar o modelo de velocidades constantes para descrever LLT em cenários com comportamento estocástico de velocidade, argumento que se aplica também para o RLL correspondente.

Como tópicos para trabalhos futuros, é sugerido que se investigue o modelo de LLT que considere as mudanças de trajetória. Como foi verificado, a distribuição de probabilidade nesses casos é distinta daquela encontrada para o modelo proposto, onde não se consideram mudanças. Esse resultado pode ser aproveitado para aprimorar ainda mais o desempenho da rede, fazendo com que protocolos tirem proveito dessas situações, que são atípicas. Com esse estudo, é possível que se investigue com mais profundidade o comportamento de duração das rotas, compostas de um ou mais enlaces. Como foi mostrado, o LLT tem forte dependência da mobilidade da rede, portanto outra sugestão é que se desenvolva ou modifique algum protocolo de roteamento que possa maximizar uma medida de desempenho ao escolher o tamanho de pacote adequado para cada situação de mobilidade. Ainda nessa direção, trabalhos futuros também podem investigar o impacto do LLT em diversos protocolos e medidas de camadas superiores de redes de comunicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WU, X.; SADJADPOUR, H.; GARCIA-LUNA-ACEVES., J. Link lifetime as a function of node mobility in manets with restricted mobility: Modeling and applications. Em: *International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks and Workshops (WiOpt)*. Chipre: IEEE, Abril de 2007. p. 1–10.
- [2] OLIVEIRA, R. et al. The impact of node’s mobility on link-detection based on routing hello messages. Em: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC)*. Sidney, Austrália: IEEE, Abril de 2010. p. 1–6.
- [3] TSAO Y. WU, W. L. C.; KUO, J. Link duration of the random way point model in mobile ad hoc networks. Em: *Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC)*. Las Vegas, Nevada, Estados Unidos da América: IEEE, Abril de 2006.
- [4] GROSSGLAUSER, M.; TSE, D. Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks. Em: *IEEE/ACM Transactions on Networking*. : IEEE, Agosto de 2002. Vol. 10, n. 4, p. 477–486.
- [5] CAMP, J. B. T.; DAVIES, V. A survey of mobility models for ad hoc network research. Em: *IEEE Wireless Communications and Mobile Computing (IEEE WCMC)*. : IEEE, 2002. Vol. 2, p. 483–502.
- [6] ROYER, E.; MELLIAR-SMIT, P.; MOSER, L. An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks. Em: *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC)*. Helsinki, Finlândia: IEEE, Junho de 2001. Vol. 3, p. 857–861.
- [7] YOON, J.; LIU, M.; NOBLE, B. Random waypoint considered harmful. Em: *Joint Conference of the IEEE Computer and Communications (IEEE INFOCOM)*. São Francisco, Estados Unidos da América: IEEE, março de 2003.
- [8] BETTSTETTER, C.; WAGNER, C. The spatial node distribution of the random waypoint mobility model. Em: *Mobile Ad-Hoc Netzwerke, 1. deutscher Workshop uber Mobile Ad-Hoc Netzwerke (WMAN)*. Ulm, Alemanha: , março de 2002. Vol. 5, p. 41–58.
- [9] COLLETTI, R. R.; NASCIMENTO, F. S. Modelos de mobilidade estáveis para redes *ad hoc*. 2012. 61 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Redes de Computadores). Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

- [10] LIANG, B.; HAAS, Z. Predictive distance-based mobility management for pcs networks. Em: *Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*. : IEEE, março de 1999. Vol. 3, p. 1377–1384.
- [11] JAYAKUMAR, G.; GOPINATH, G. Performance comparison of manet protocols based on manhattan grid mobility model. Em: *Journal of Mobile Communication*. : Medwell Journals, 2008. Vol. 2, n. 1, p. 18–26.
- [12] RHEE, I. et al. On the levy-walk nature of human mobility. Em: *IEEE Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM)*. Phoenix, Estados Unidos da América: IEEE, Abril de 2008.
- [13] HIRANANDANI, D.; OBRACZKA, K.; GARCIA-LUNA-ACEVES, J. Manet protocol simulations considered harmful: the case for benchmarking. Em: *IEEE Wireless Communications*. : IEEE, Setembro de 2013. Vol. 20, n. 4, p. 82–90.
- [14] CAROFIGLIO, G. et al. Route stability in manets under the random direction mobility model. Em: *IEEE Transactions on Mobile Computing*. Los Alamitos, California, Estados Unidos da América: IEEE, Setembro de 2009. Vol. 8, n. 9, p. 1167–1179.
- [15] TSENG, Y.-C.; LI, Y.-F.; CHANG, Y.-C. On route lifetime in multihop mobile ad hoc networks. Em: *IEEE Transactions on Mobile Computing*. : IEEE, Outubro de 2003. Vol. 2, n. 4, p. 366–376.
- [16] RANGO, F. G. F. D.; FAZIO., P. Link-stability and energy aware routing protocol in distributed wireless networks. Em: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (IEEE TPDS)*. : IEEE, Abril de 2012. Vol. 23, n. 4, p. 713–726.
- [17] SAMAR, P.; WICKER, S. Link dynamics and protocol design in a multihop mobile environment. Em: *Mobile Computing, IEEE Transactions on*. : IEEE, Setembro de 2006. Vol. 5, n. 9, p. 1156–1172.
- [18] COLLETTI, R. R.; MORAES, R. M. Evaluation of link lifetime for the random waypoint mobility model. Em: *IEEE International Conference on Networks (ICON)*. Cingapura: IEEE, Dezembro de 2013. p. 1–5.
- [19] PERKINS, C.; BELDING-ROYER, E. *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. Julho de 2003. Disponível em <<http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3561.txt>>. Acessado em Agosto de 2014.
- [20] NAYEBI, A.; SARBAZI-AZAD, H. Analysis of link lifetime in wireless mobile networks. Em: *Ad Hoc Networks*. Amsterdam, Holanda: Elsevier, Setembro de 2012. Vol. 10, p. 1221–1237.
- [21] ROSS, S. M. *Introduction to Probability Models*. 10. ed. Estados Unidos da América: Academic Press Inc., 1985.
- [22] NASCIMENTO, M. *Probabilidade e Variáveis Aleatórias*. 3. ed. São Paulo, Brasil: Editora da Universidade de São Paulo, 2011.

- [23] PAPOULIS, A. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. 4. ed. Reino Unido: McGraw-Hill, 2002.
- [24] ZHAO, C.; SICHITIU., M. Contact time in random walk and random waypoint: Dichotomy in tail distribution. Em: *Ad Hoc Networks*. Holanda: Elsevier, março de 2011. Vol. 9, n. 2, p. 152–163.
- [25] MATHWORKS. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., Agosto de 2014. Disponível em <www.mathworks.com>. Acessado em Agosto de 2014.
- [26] KERÄNEN, A.; OTT, J.; KÄRKKÄINEN, T. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. Em: *SIMUTools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*. Bruxelas, Belgica: ICST, março de 2009.

ANEXOS

I. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

"Dissertação.pdf" - Dissertação em formato digital;

"Rotinas.rar" - Rotinas em MATLAB utilizadas para simulações feitas nesse trabalho.